

Evaluación de la seguridad en las márgenes de carretera

Carlos Arturo Domínguez Lira

Doctorando, Departamento de Ingeniería Civil. Transportes. UPM, España

José María Pardillo Mayora

Rafael Jurado Piña

Profesor titular, Departamento de Ingeniería Civil. Transportes. UPM, España

RESUMEN

Numerosos modelos estadísticos han sido desarrollados para estudiar la relación entre la frecuencia y severidad de los accidentes viales y las características de la carretera. Sin embargo existen pocos modelos que expliquen las relaciones entre las características de las márgenes de la carretera y los accidentes por salida de la calzada. En la presente comunicación se presentan los resultados iniciales de una investigación que se desarrolla actualmente en el Departamento de Ingeniería Civil - Transportes de la Universidad Politécnica de Madrid en el marco del proyecto de investigación DISCAM subvencionado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas en la convocatoria para el año 2006 de ayudas para la realización de proyectos de I+D+i ligados al desarrollo del PEIT, cuyo objetivo fundamental consiste en el desarrollo de herramientas analíticas que permitan mejorar la seguridad en el diseño de las carreteras y de la configuración de sus márgenes. A partir del análisis del problema de la accidentalidad por salida de la calzada y de los elementos que son considerados como factores clave en el origen de este tipo de accidentes de circulación se plantea un procedimiento de caracterización de los niveles de seguridad en función de la configuración de las márgenes y las características de la carretera. Para ello se han estudiado los registros de accidentalidad, de las características de las márgenes y de las características del trazado de una muestra de carreteras españolas, todo ello con el fin de desarrollar una metodología práctica y sencilla para la evaluación de la seguridad de las márgenes de carreteras existentes.

1. ANTECEDENTES

A diferencia de los numerosos estudios realizados sobre la influencia de las características del diseño geométrico de la calzada y su relación con la frecuencia de los accidentes viales, actualmente son escasas las evaluaciones realizadas sobre la analogía existente entre las características físicas de la carretera y sus márgenes con las salidas de la calzada y la severidad de dichos accidentes. Según datos de la Dirección General de Tráfico (DGT), los accidentes por salida de la calzada representaron en España en el año 2006 el 35 % del total de víctimas mortales provocadas por los accidentes de tráfico, una cifra algo superior al porcentaje promedio de 30% de toda Europa (Amengual, 2007). Estas cifras convierten a los accidentes por salida de la calzada como el tipo de accidente más común y de mayor severidad. Por ello

se puede inferir en la necesidad imperiosa de tomar medidas que reduzcan la cantidad de los accidentes de tráfico y sus consecuencias, y de forma particular, los accidentes por salida de la calzada.

Bajo este contexto, el Departamento de Ingeniería Civil: Transportes, de la Universidad Politécnica de Madrid, actualmente desarrolla el programa de investigación denominado DISCAM subvencionado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas en la convocatoria para el año 2006 de ayudas para la realización de proyectos de I+D+i ligados al desarrollo del Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte en el marco del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004-2007, cuyo objetivo fundamental es el desarrollo de herramientas analíticas que permitan mejorar la seguridad en el diseño de las carreteras y de la configuración de sus márgenes, constituyendo por tanto una parte integrante de dicho proyecto el presente estudio.

2. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo de la investigación desarrollada ha sido el plantear una metodología para la evaluación de los niveles de peligrosidad de las márgenes de la carretera a partir de su configuración física. En base a un estudio de la configuración y estado de las márgenes, así como de las características del trazado y tráfico se determinarán aquellas variables representativas que permitan desarrollar un índice de peligrosidad de márgenes.

3. ESTADO DEL ARTE

El análisis detallado de los accidentes viales permite determinar que la salida de los vehículos de la calzada es uno de los tipos de accidentes más comunes y de los que conjugan altos niveles de severidad. En los años sesenta se realizan los primeros estudios formales como un intento de comprender este tipo particular de accidentes (Ross, 1995). De dicho estudio se conciben tres principios que se consideran básicos en la previsión de los accidentes por salida de la calzada. En primer lugar se intentará mantener el vehículo dentro de la calzada; posteriormente se mueven, remedian o protegen objetos potencialmente peligrosos para los vehículos que pudiesen salir de la calzada y en una última instancia se minimizará la severidad de los accidentes por salida de la calzada. Estos principios se deberán contemplar en toda actuación que se disponga sobre la seguridad de las márgenes de una carretera.

En cuanto a los propios modelos de análisis de la seguridad de las márgenes de carretera y las salidas de la calzada, se han de distinguir dos grandes grupos: los modelos basados en estudios de probabilidad y los modelos basados en análisis de datos de accidentes. Los modelos probabilísticos han sido los más desarrollados dada la dificultad técnica y práctica de los modelos estadísticos de contar con una serie de datos precisos y completos para el estudio de los accidentes por salida de la calzada. En el planteamiento de los modelos probabilísticos se

han de distinguir cuatro elementos fundamentales:

1. Determinación de la frecuencia de las salidas de la calzada. Las variables consideradas son el tipo de carretera y la intensidad de tráfico.
2. Relación entre la frecuencia de las salidas de la calzada y la probabilidad de que se produzca un accidente. Las variables consideradas son el tamaño del vehículo, la velocidad de salida, el ángulo de salida y la orientación del vehículo.
3. Estimación del nivel de severidad de la colisión (daños materiales, lesiones leves, lesiones graves, lesiones mortales).
4. Estimación del coste de los accidentes producidos como consecuencia de las salidas de la vía y sus consecuentes proporciones coste-beneficio.

En base a estos principios probabilísticos se han desarrollado programas informáticos de análisis coste-beneficio para diversas alternativas de diseño de márgenes como el denominado RSAP (Roadside Safety Analysis Program. King y Dean, 2003) mismo que tiene su base teórica en la guía americana AASHTO para el diseño de márgenes (Roadside Design Guide. AASHTO, 2002). Por otro lado están los modelos basados en el análisis de datos, destacando en este campo las estimaciones con modelos estadísticos. Los modelos de regresión se han empleado para estudiar la frecuencia total de accidentes, que suele tomarse como la variable dependiente a partir de una serie de variables explicativas tales como características geométricas de la carretera y el tráfico. En el campo de estudio de los accidentes por salida de la calzada se identifican aquellos estudios sobre zonas específicas así como los estudios con objetos específicos localizados en las márgenes de carretera. En algunos estudios se han definido escalas generales para la caracterización de las márgenes de las carreteras para su empleo en modelos de regresión. En 1988 Zegeer elaboró un trabajo que consistía en establecer una o más escalas de medida que permitiesen evaluar la peligrosidad de las márgenes y que fueran representativas de la peligrosidad del conjunto de las márgenes a lo largo del tramo de carretera considerado. Desde el punto de vista estadístico una escala basada en la peligrosidad se consideró como la más adecuada dado que proporcionaba la capacidad de expresar las condiciones de las márgenes mediante una variable independiente que a su vez puede ser incluida en un modelo de estimación de la frecuencia de los accidentes de manera similar al ancho de carriles, el ancho de arcenes u otras características de la carretera.

En resumen, son considerables los estudios e investigaciones que se han desarrollado para establecer la frecuencia y severidad de los accidentes por salida de la calzada, más sin embargo son escasos los trabajos relativos a determinar los niveles de peligrosidad propios de las características de las márgenes y que pueden servir como un medio para predecir los accidentes por salida de la calzada para una variedad de tráfico, condiciones geométricas de la carretera y condiciones físicas de las márgenes.

4. INVESTIGACIÓN DESARROLLADA

El método empleado para definir un índice de peligrosidad de las márgenes se ha basado en el análisis estadístico de la relación existente entre la configuración de las márgenes y la frecuencia y severidad de los accidentes por salida de la calzada con el objeto de identificar las combinaciones de características de la configuración de las márgenes que dan como resultado valores homogéneos de la frecuencia y severidad de los accidentes. Dichas combinaciones de características han permitido caracterizar distintos niveles para el índice de peligrosidad de las márgenes propuesto. Para el estudio se han empleado los datos de accidentalidad registrados en una muestra significativa de tramos de 500 metros de longitud para un intervalo de tiempo de seis años. De este modo, en primer lugar se han seleccionado variables consideradas básicas en cuanto a la peligrosidad que pueden tener las márgenes. Dicha peligrosidad dependerá tanto de variables relacionadas con las características físicas de las márgenes como de otras variables relacionadas con la probabilidad de que se produzca en un determinado tramo una salida de la calzada. Por ello, en la metodología propuesta se han tenido en cuenta las siguientes variables:

- *Pendiente de las márgenes.* Discretizada en tres intervalos.
- *Existencia de obstáculos en las márgenes.* Distancia desde el borde de plataforma discretizada en cuatro intervalos.
- *Trazado del tramo.* Tramo en curva o tramo en recta.
- *Barrera de seguridad.* Existencia o no de barrera de seguridad para los tramos analizados.

Para cada una de dichas características se han definido unos indicadores categóricos. Los efectos de las condiciones físicas de las márgenes así como del trazado en la peligrosidad de las márgenes son comprobados mediante dos índices. Éstos índices evalúan la accidentalidad en función del nivel de exposición al riesgo, y son los siguientes:

- *Índice de peligrosidad de los accidentes por salida de la calzada.* Relación entre el número de accidentes por salida de la calzada en una margen, así como el volumen de tráfico registrado para los seis años del estudio.

$$IP_s = \frac{(\text{Número de accidentes por salida de la calzada})}{(\text{IMD})(0.50)(365)(6)} \times 10^8 \quad (1)$$

- *Índice de severidad de los accidentes por salida de la calzada.* Relación entre el número de víctimas graves (mortales y heridos graves) de los accidentes por salida de la calzada en una margen con el volumen de tráfico registrado para los seis años del estudio.

$$ISs = \frac{(\text{Número de víctimas graves de accidentes por salida de la calzada})}{(\text{IMD})(0.50)(365)(6)} \times 10^8 \quad (2)$$

Con el objetivo de obtener las distintas combinaciones entre las características de configuración de las márgenes y a su vez unos niveles de peligrosidad, se ha realizado un estudio comparativo de los índices de peligrosidad y severidad medios por salida de la calzada para cada categoría analizada. Para evaluar el grado de significación de las diferencias de los índices de accidentalidad entre dos categorías se ha aplicado un contraste de igualdad de medias.

4.1 Definición de un índice de peligrosidad de las márgenes

Una vez obtenidos los valores medios para la frecuencia y severidad de los accidentes homogéneos para las 48 combinaciones posibles se proponen 7 categorías o niveles de peligrosidad para las márgenes de carretera, utilizando para ello valores numéricos desde el nivel 1 que representa condiciones de márgenes óptimas para recuperar el control del vehículo sin provocar ninguna lesión hasta el nivel 7 que representa condiciones de márgenes extremas con alta probabilidad de colisionar con objetos, sufrir volcaduras y lesiones muy severas. Con dicho indicador de peligrosidad de las márgenes se está en condiciones de representar mediante una variable la influencia de la configuración física de las márgenes en la frecuencia y severidad de los accidentes por salida de la calzada (Tabla 1).

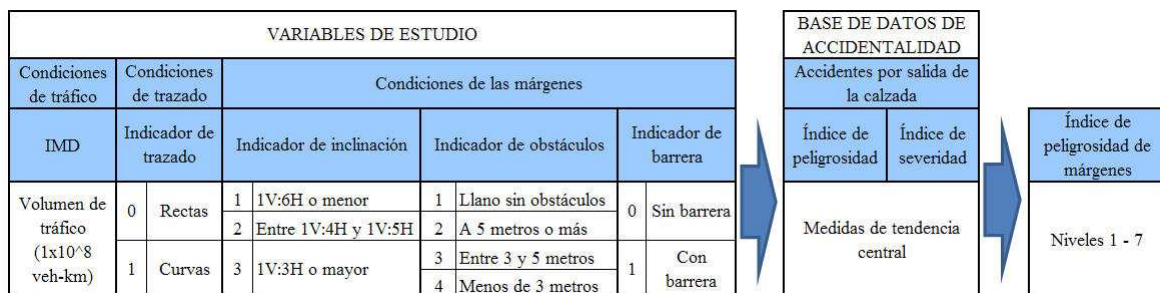


Tabla 1 – Indicadores propuestos para el análisis de la peligrosidad de las márgenes de carretera

5. CASO DE ESTUDIO

Para realizar el estudio de las condiciones de peligrosidad de las márgenes se han seleccionado tres carreteras nacionales localizadas en la provincia de Teruel. La longitud total analizada comprende 748 kilómetros de carreteras de tipo convencional de dos carriles y con anchos promedio de carriles de 3,4 metros. Para considerar las condiciones del tráfico se han utilizado los valores promedio de las IMD durante el período de análisis que comprende seis años (2000-2005). Conviene resaltar que para el estudio se han excluido los tramos por travesías y zonas urbanas. Para la determinación de los indicadores planteados se hizo uso de fotografías

digitales que representan las condiciones actuales de las márgenes de carretera para intervalos de 100 metros (Figura 1). La base de datos final para estudio queda definida con información que incluye variables que representan la configuración física de las márgenes (indicadores), el volumen de tráfico y datos sobre la accidentalidad para tramos de 500 metros de longitud.



Fig. 1 - Configuración tipo de márgenes. Indicador de trazado = 0 (tramo en recta). Indicador de inclinación = 2 (entre 1:4 y 1:5). Indicador de obstáculos = 3 (entre 3 y 5 m.). Indicador de barrera = 0 (tramo sin barrera)

6. ANÁLISIS DE DATOS

Las relaciones entre las variables seleccionadas para el estudio incluyeron un total de 48 combinaciones posibles para los 1463 tramos analizados. Con los valores medios de los índices de peligrosidad y de severidad se agrupa el conjunto de datos en siete niveles de peligrosidad atendiendo a las características de las márgenes y de la carretera propuestas en los indicadores. Dado que dicha agrupación refleja valores crecientes para la frecuencia y severidad de los accidentes por salida de la calzada, los valores inferiores expresan condiciones con pocas probabilidades de provocar salidas de la calzada y accidentes con víctimas graves. Por el contrario, los mayores valores numéricos del índice de peligrosidad propuesto reflejaran aquellas configuraciones que pueden provocar una elevada frecuencia de salidas de la calzada y de accidentes con víctimas graves. Como se ha mencionado, para evaluar el nivel de confianza de la clasificación establecida se han aplicado contrastes de diferencia de medias de los índices de accidentalidad por salida de la calzada y para cada uno de los distintos niveles del índice de peligrosidad propuesto (Tabla 2).

Resumiendo los resultados mostrados en la Tabla 2, podemos inferir que existen diferencias contrastadas con niveles de significación superiores al 80 % en tres de los siete niveles propuestos (1, 2, 7), más sin embargo en otros dos niveles (4, 5) resultará conveniente distinguir su configuración con aquellos tramos que no disponen de barrera de seguridad para obtener diferencias contrastantes.

| Indicadores | | | | Tamaño de muestra | Índice de peligrosidad media | Índice de severidad media | Índice de peligrosidad de márgenes | Índice de peligrosidad media | Índice de severidad media | |
|-------------|-----------|------------|---------|-------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------------|--|---------------------------|------|
| trazado | pendiente | obstáculos | barrera | | | | | | | |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 40 | 4.60 | 0.86 | 1 | Tramos en llano con obstáculos a más de 5 m | 3.10 | 0.92 |
| 0 | 1 | 2 | 0 | 45 | 1.90 | 1.02 | | | | |
| 1 | 1 | 2 | 0 | 2 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| 1 | 1 | 3 | 0 | 10 | 1.26 | 0.00 | 2 | Tramos en llano con obstáculos entre 3 y 5 m. o con pendiente entre 1:3 y 1:4 y obstáculos a más de 5 m. | 4.18 | 0.85 |
| 0 | 1 | 3 | 0 | 77 | 4.09 | 1.59 | | | | |
| 0 | 2 | 1 | 0 | 40 | 4.39 | 0.57 | | | | |
| 1 | 2 | 1 | 0 | 4 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| 0 | 2 | 2 | 0 | 86 | 4.99 | 0.55 | | | | |
| 1 | 2 | 2 | 0 | 11 | 1.83 | 0.00 | | | | |
| 0 | 2 | 3 | 0 | 193 | 4.29 | 1.84 | 3 | Rectas con pendiente entre 1:3 y 1:4 y obstáculos entre 3 y 5 m. o con pendiente mayor que 1:3 y obstáculos a más de 5 m. | 4.19 | 1.62 |
| 0 | 3 | 1 | 0 | 6 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| 0 | 3 | 2 | 0 | 36 | 4.33 | 0.69 | | | | |
| 0 | 1 | 3 | 1 | 3 | 0.00 | 0.00 | 4 | Rectas con barrera | 4.67 | 2.07 |
| 0 | 2 | 3 | 1 | 47 | 6.25 | 4.81 | | | | |
| 0 | 2 | 4 | 1 | 4 | 10.46 | 0.00 | | | | |
| 0 | 3 | 2 | 1 | 1 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| 0 | 3 | 3 | 1 | 67 | 2.57 | 0.45 | | | | |
| 0 | 3 | 4 | 1 | 12 | 9.85 | 1.75 | | | | |
| 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 0.00 | 0.00 | 5 | Curvas con barrera | 6.10 | 1.81 |
| 1 | 2 | 3 | 1 | 32 | 8.45 | 2.92 | | | | |
| 1 | 2 | 4 | 1 | 6 | 9.89 | 1.82 | | | | |
| 1 | 3 | 3 | 1 | 102 | 4.82 | 1.92 | | | | |
| 1 | 3 | 4 | 1 | 30 | 7.57 | 0.34 | | | | |
| 0 | 1 | 4 | 0 | 9 | 9.42 | 0.00 | 6 | Rectas con pendiente entre 1:3 y 1:4 y obstáculos a menos de 3 m.; curvas con pendiente entre 1:3 y 1:4 y obstáculos entre 3 y 5 m. y curvas con pendiente mayor que 1:3 y distancia a obstáculos mayor que 5 m. | 6.15 | 1.81 |
| 1 | 2 | 3 | 0 | 109 | 6.21 | 2.30 | | | | |
| 0 | 2 | 4 | 0 | 50 | 5.34 | 1.27 | | | | |
| 1 | 3 | 2 | 0 | 6 | 6.97 | 0.00 | | | | |
| 1 | 1 | 4 | 0 | 7 | 9.46 | 0.00 | 7 | Tramos con pendiente superior a 1:3 y obstáculo menos de 5 m o curvas con distancia a obstáculo menor de 3 m. | 9.15 | 3.49 |
| 1 | 2 | 4 | 0 | 40 | 11.28 | 4.86 | | | | |
| 0 | 3 | 3 | 0 | 149 | 8.04 | 2.87 | | | | |
| 1 | 3 | 3 | 0 | 118 | 8.02 | 3.34 | | | | |
| 0 | 3 | 4 | 0 | 45 | 9.92 | 5.18 | | | | |
| 1 | 3 | 4 | 0 | 74 | 11.55 | 3.57 | | | | |

Tabla 2 – Agrupación de resultados estadísticos para la determinación de diversos niveles numéricos del índice de peligrosidad de las márgenes.

7. CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra una metodología práctica para evaluar las condiciones presentes en las márgenes de carretera y su relación con los accidentes por salida de la calzada. De las variables estudiadas resulta evidente que el grado de inclinación así como la distancia de los obstáculos localizados en las márgenes de carretera son dos aspectos a tener en cuenta en ese tipo particular de accidente. Con respecto al trazado, las diferencias no resultan significativas en el grado de peligrosidad de las márgenes entre aquellos tramos en recta o en curva, aunque en estos últimos la severidad aumenta significativamente cuando se combinan con grandes inclinaciones de márgenes y con obstáculos localizados cerca de la calzada. Con la presencia de las barreras de seguridad se obtienen igualmente resultados no concluyentes. Por ello, en próximas etapas de la investigación se considerará la inclusión de variables complementarias al estudio tales como los radios de curvatura, grados de inclinación de la rasante y la influencia de la consistencia del trazado.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Fomento y al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) por la subvención concedida al proyecto DISCAM en el marco de las ayudas para la realización de proyectos de I+D+i ligados al desarrollo del PEIT.

A la Unidad de Carreteras del Ministerio de Fomento en Teruel y a su Ingeniero Jefe D. Carlos Casas por su ayuda en la obtención de datos para el desarrollo de la investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México por el apoyo económico concedido para la realización de los estudios de posgrado en el extranjero.

REFERENCIAS

AASHTO. (2002). *Roadside Design Guide*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.

AMENGUAL PERICÁS, A. (2007). Identificación y evaluación de los peligros por salida de la calzada en márgenes de carretera. Tratamiento general del problema. Medidas de actuación. *III Congreso Nacional de Seguridad Vial*. Asociación Española de la Carretera, Logroño, España.

KING, K. M. y DEAN, L. S. Roadside Safety Analysis Program (RSAP)- Engineer's Manual. National Cooperative Highway Research Program. Report 492. TRB. Washington, D.C., 2003

MINISTERIO DEL INTERIOR. (2007). *Las Principales Cifras de la Siniestralidad Vial. España 2006*. Dirección General de Tráfico. Madrid, España.

ROSS, H. E. Evolution of Roadside Safety. Transportation Research Circular number 435. TRB. National Research Council, 1995.

ZEGEER, C. V., et al. Safety Effects of Cross-Section Design for Two-Lane Roads. Report FHWA/RD/87/008. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation, 1986.

ZEGEER, C. V., et al. Accident Effects of Sideslope and Other Roadside Features on Two-Lane Roads. Transportation Research Record 1195, TRB. National Research Council, 1988.