

ICSM: Un procedimiento de clasificación de las condiciones de seguridad de las márgenes de las carreteras



Prólogo

REDACTADO POR:

José M^a Pardillo Mayora
Dr. Ingeniero de Caminos
Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid

Rafael Jurado Piña
Dr. Ingeniero de Caminos
Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid

Carlos A. Domínguez Lira
Ingeniero Civil
Doctorando en la
Universidad Politécnica de Madrid

PRÓLOGO POR:

Roberto Llamas Rubio
Presidente del Comité Técnico de
Seguridad Vial de la Asociación
Técnica de Carreteras (ATC)

Los accidentes por salida de la vía constituyen la tipología más frecuente entre los siniestros de tráfico en carreteras interurbanas y, también, generalmente, uno de los que peores consecuencias conllevan. Existen diversos factores que incrementan la gravedad de las consecuencias de los mismos, y entre ellos figura la configuración de las márgenes, aspecto éste cuya consideración cada vez ha ido adquiriendo mayor relevancia a la hora de diseñar y proyectar las carreteras o sus equipamientos.

La actual normativa para la construcción de nuevas carreteras ya considera este aspecto como un elemento fundamental a la hora del diseño de la sección transversal, como medio para prevenir este tipo de accidentes. No obstante, las limitaciones físicas y presupuestarias hacen que no siempre se puedan disponer las secciones

más deseables. Así mismo, existen muchas carreteras de la red nacional con unas condiciones de las márgenes que requieren un adecuado tratamiento de las mismas y que deben ser acondicionadas progresivamente en función de las disponibilidades económicas, mediante actuaciones preventivas de seguridad vial. No hay que olvidar que uno de los objetivos de este tipo de medidas sobre la infraestructuras es la de proporcionar al conductor medios para la recuperación del control del vehículo cuando éste lo ha perdido al salirse de la calzada.

La instalación de barreras de seguridad y la eliminación de los obstáculos próximos a la calzada son de las medidas adoptadas más habituales y eficaces, junto con el suavizado de los taludes de las márgenes. Sin embargo, este último tipo de actuación, según los casos, conlleva un elevado coste, especialmente en zonas con una orografía complicada. Por tanto, es necesario maximizar la inversión en estas actividades, por lo que debemos disponer de unos criterios

técnicos rigurosos que nos permitan caracterizar las márgenes y las posibles consecuencias de los accidentes.

Dentro de este contexto se enmarca el presente artículo, presentado por los autores al Comité de Seguridad Vial de la ATC, y que es resultado de un proyecto de investigación realizado por el Departamento de Ingeniería Civil y Transportes de la Universidad Politécnica de Madrid, financiado por el CEDEX del Ministerio de Fomento dentro del programa de I+D+i de desarrollo del PEIT.

En él se resumen los antecedentes internacionales de investigaciones en este campo, planteamientos llevados a cabo a la hora de analizar el efecto de las condiciones de la carretera y de sus márgenes en la frecuencia y la gravedad de los accidentes por salida de la calzada, para pasar seguidamente a detallarnos el procedimiento que han establecido para la clasificación de las condiciones de seguridad de las márgenes de las carreteras.

Dicho procedimiento permite, mediante una serie de indicadores de las características de la vía y su entorno, definidos y ponderados convenientemente, obtener un único índice global (denominado ICSM) con el que caracterizar las condiciones relativas a la seguridad de la circulación de las márgenes de las carreteras, habiéndose establecido cinco categorías para ello. Se ha calibrado el método, evaluando el nivel de confianza estadístico de la clasificación realizada en base a una muestra de datos facilitados por la DGC del M^º de Fomento y de la Junta de Extremadura. Finalmente se exponen algunas recomendaciones prácticas obtenidas de esta investigación realizada.

Además de la contribución que esta investigación realiza al campo de la mejora de la seguridad vial, propicia nuevos caminos de exploración en el desarrollo de modelos de predicción de la accidentalidad por salida de la calzada más precisos. Así que animo a los investigadores a recoger este testigo y seguir avanzando en esta nueva ruta.

Por último, y como Presidente del citado Comité, quisiera dejar constancia de mi agradecimiento a los autores del presente artículo, por haberlo sometido al análisis del Comité que presido y darles la enho-



Figura 1. Accidente por salida de calzada.

rabuena por el trabajo realizado, que estoy seguro que ayudará a fomentar la caracterización de las márgenes de la vía dentro del sistema de gestión de la seguridad de las infraestructuras y, en consecuencia, tenerla en cuenta a la hora de establecer las prioridades de ejecución de actuaciones preventivas.

Resumen

En el marco del proyecto de investigación DISCAM desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil - Transportes de la Universidad Politécnica de Madrid, se ha establecido un procedimiento de clasificación de las condiciones de seguridad de las márgenes de las carreteras. La investigación se ha apoyado en una serie de indicadores de las principales condiciones de la infraestructura y de su entorno físico que influyen en las consecuencias de los accidentes por salida de la calzada: pendiente transversal de la margen, distancia al borde de la calzada de los obstáculos rígidos, existencia y adecuación de las barreras de seguridad y condiciones del trazado. Con el fin de identificar las combinaciones de los valores de estos indicadores, que presentan valores homogéneos de los índices de frecuencia y gravedad de los accidentes con víctimas por salida de la calzada, se analizó una muestra de 1 956 km de carreteras convencionales. Como resultado se estableció una escala categórica de cinco niveles a la que se ha denominado Índice de Condiciones de Seguridad

de las Márgenes (ICSM). El ICSM permite sistematizar la toma de datos relacionados con la seguridad de las márgenes de las carreteras y puede introducirse como variable explicativa en los modelos de regresión multivariante de estimación de la frecuencia de accidentes. También puede utilizarse como referencia en la planificación de las medidas de mejora de la seguridad vial.

PALABRAS CLAVE: Seguridad vial, márgenes, salidas de la calzada.

Introducción

Los accidentes por salida de la calzada se producen cuando un vehículo sale sin control de la carretera, invade las márgenes y vuelca o colisiona con un obstáculo rígido o con el terreno. Según los datos de la Dirección General de Tráfico, los accidentes por salida de la calzada originaron el 40,9% del total de accidentes mortales en las carreteras interurbanas españolas en 2008. Esta elevada proporción se ha mantenido casi constante a lo largo de los años, por lo que las medidas destinadas a limitar la frecuencia y la gravedad de este tipo de accidentes son un elemento clave de los programas de mejora de la seguridad de las infraestructuras viarias.

Las primeras investigaciones rigurosas sobre la influencia en la seguridad de la circulación de las condiciones de las márgenes de las carreteras se remontan a 1960. Stonex (1960) identificó en sus estudios algunos de los factores que incrementan la gravedad de los accidentes por salida de la

calzada: la presencia de obstáculos rígidos cercanos al borde de la vía, la existencia de cunetas profundas, la inclinación transversal de las márgenes o la configuración inadecuada de los terminales de las barreras de seguridad. En esta época se publicaron en Estados Unidos las primeras normas de ensayo y de instalación de barreras de seguridad y la primera edición de las Recomendaciones de Proyecto y Explotación de Carreteras centradas en la Seguridad Vial (*Highway Design and Operational Practices Related to Highway Safety*, AASHTO 1966). En ellas se introdujo por primera vez el concepto de la zona libre de obstáculos o zona de seguridad, que se definió como una franja de 9 metros de anchura situada a cada lado de la calzada que debía mantenerse libre de obstáculos no franqueables y presentar una pendiente transversal poco pronunciada para propiciar la recuperación del control de los vehículos que se saliesen de la calzada. Esta definición estaba basada en una serie de estudios realizados por la AASHTO en los que se había llegado a la conclusión de que una zona con estas condiciones permitiría recuperar el control al menos al 80% de los vehículos que sufriesen salidas de la vía.

En los años 70 se perfeccionaron los procedimientos de ensayo e instalación de los sistemas de contención y se desarrollaron nuevos dispositivos de contención de vehículos, incluyendo nuevos modelos de terminales de las barreras de seguridad. Así mismo se avanzó en los métodos de programación y evaluación de las medidas de mejora de la seguridad que fueron recogidos en las nuevas ediciones de los Manuales antes mencionados. En la edición de 1977 de la Guía de diseño de barreras de seguridad (*Guide for Selecting, Locating and Designing Traffic Barriers*, AASHTO) se modificó la definición de la zona libre de obstáculos, cuya anchura dejó de ser fija y pasó a depender de una serie de variables características de la carretera y del tráfico.

En España, el CEDEX realizó por encargo de la Dirección General de Carreteras un amplio estudio de las condiciones de uso de los distintos sistemas de contención de vehículos que dio lugar a las Recomendaciones sobre Sistemas de Contención de Vehículos, publicadas en 1995.

Antecedentes

Para analizar el efecto de las condiciones de la carretera y de sus márgenes en la frecuencia y la gravedad de los accidentes por salida de la calzada se han seguido dos planteamientos distintos. El primero se basa en el análisis estadístico de los registros de accidentes con técnicas de regresión multivariante. La frecuencia de los accidentes en un tramo de carretera dado se trata como una variable aleatoria discreta con una función de distribución de probabilidad de Poisson. El volumen del tráfico y las características de la carretera (trazado, anchura de la calzada, configuración de las márgenes, etc.) se introducen en los modelos como variables explicativas de la variación de la accidentalidad. Una propiedad importante de la distribución de Poisson es que su desviación típica es igual a su media. La generalización de los modelos Poisson, para admitir la sobredispersión de la distribución de frecuencias de los accidentes que suelen presentarse en el conjunto de los tramos de una red, da como resultado el modelo binomial negativo. En Estados Unidos, Council y Stewart (1996)

y Lee y Mannering (2002) entre otros han utilizado modelos de Poisson y binomial negativos para calibrar modelos de predicción de accidentes por salida de la calzada.

El segundo planteamiento (Mak, 1995) consiste en el ajuste de un sistema de probabilidades condicionadas de la secuencia de sucesos que pueden producirse como consecuencia de la salida de un vehículo sin control de la vía hasta dar lugar a un accidente. En esta línea, la AASHTO desarrolló en Estados Unidos un programa de ordenador denominado *Road Side Analysis Program* (RSAP) basado en un modelo secuencial de este tipo que permite evaluar la rentabilidad de instalar barreras de seguridad en función de las condiciones particulares de cada tramo (Mak *et al.*, 1998).

En todo caso, el elevado coste de obtención y actualización de información detallada de la configuración de las márgenes representa un obstáculo para el desarrollo de modelos detallados de análisis de la relación entre las características de las márgenes y la frecuencia y la gravedad de los accidentes por salida de la calzada (Lee y Mannering, 2002). Por ello, el establecimiento de un procedimiento sistemático

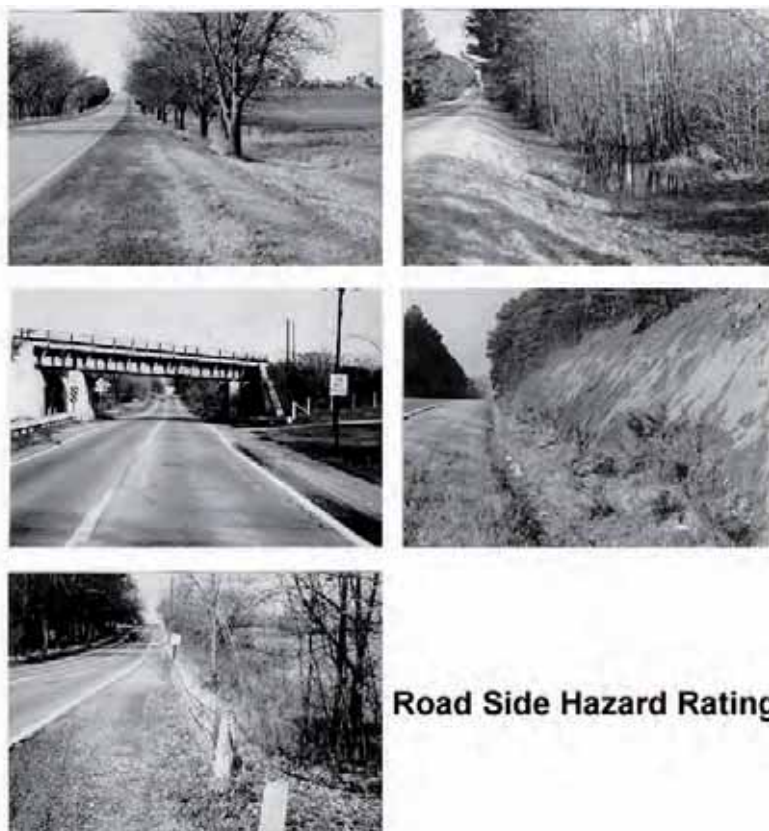


Figura 2. Ejemplo de caracterización gráfica de los niveles del RHR (Fuente: Zegeer *et al.* 1988).

de caracterización de las condiciones de seguridad de las márgenes que facilite la recogida de datos en carretera y su análisis resulta fundamental para propiciar el perfeccionamiento de estos modelos.

Hasta ahora, el principal desarrollo en esta dirección se llevó a cabo en los Estados Unidos por Zegeer *et al.* (1988a, 1988b) en el marco de un amplio estudio financiado por la Administración Federal de Carreteras (FHWA) cuyo objetivo principal era cuantificar los efectos sobre la seguridad de los ensanches de la plataforma y de la pavimentación de arceles. En el curso de su desarrollo se definió una escala de peligrosidad de las márgenes denominada *Roadside Hazard Rating* (RHR). La escala fue establecida a partir del análisis de los resultados de las investigaciones previas sobre los efectos de la configuración de las márgenes en la seguridad vial y de las conclusiones de un grupo de trabajo en el que participaron trece expertos en seguridad vial. Se emplearon cientos de fotografías con diferentes características de las márgenes. Los participantes debían valorar la situación de las márgenes para cada fotografía en base a tres aspectos diferentes: la influencia de las márgenes en la frecuencia de los accidentes, la influencia en su gravedad y, por último, establecer una escala en la que se combinaran la frecuencia y la gravedad. La escala finalmente establecida clasifica el riesgo asociado a la configuración de las márgenes de la carretera mediante un valor escalar con un rango de uno (correspondiente a una baja probabilidad de colisión o vuelco) a siete (probabilidad elevada de que un accidente origine víctimas mortales o lesiones graves). Cada uno de los niveles está caracterizado gráficamente mediante una serie de imágenes de casos típicos (figura 2, pág.32). El RHR ha sido una herramienta útil para superar las dificultades en la evaluación de las condiciones de las márgenes y se utiliza con frecuencia para este propósito en los estudios de seguridad vial en Estados Unidos. Sin embargo, su aplicación práctica se basa, hasta cierto punto, en un juicio subjetivo y por tanto está sujeta a variaciones cuando varían los observadores que toman los datos. Además, la definición de los niveles del RHR carece de una validación explícita que esté basada en una evidencia empírica.

Calibración del ICSM

El proyecto de investigación DISCAM: Herramientas para un Diseño Seguro de la Carretera y sus Márgenes ha sido desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil - Transportes de la Universidad Politécnica de Madrid con una subvención del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas del Ministerio de Fomento para la realización de proyectos de I+D+i ligados al desarrollo del PEIT.

La investigación llevada a cabo en la Fase 4 del proyecto dio como resultado un procedimiento de categorización de las condiciones de seguridad de las márgenes de las carreteras a partir del análisis de la configuración física y la accidentalidad por salida de la calzada registrada en una muestra de 1 956 km de márgenes de carreteras convencionales españolas de dos carriles (Pardillo *et al.*, 2009). La calibración del ICSM se realizó en cuatro fases:

1. Clasificación sistemática de la configuración de las márgenes mediante indicadores.
2. Obtención de datos en una muestra representativa de las condiciones de las carreteras convencionales españolas.
3. Agrupación de las combinaciones de los cuatro indicadores en categorías homogéneas en cuanto a la frecuencia y la gravedad de los accidentes con víc-

timas por salida de la calzada.

4. Contraste de la significación estadística de las diferencias entre las categorías del ICSM.

Indicadores de las características de las márgenes

El primer paso del estudio consistió en la definición de un conjunto de indicadores para facilitar la caracterización sistemática de las condiciones de las márgenes y que teniendo en cuenta los resultados de investigaciones anteriores influyen en las consecuencias de las salidas de la calzada. Las características consideradas para definir estos indicadores fueron:

- La inclinación transversal de las márgenes.
- La distancia a los obstáculos rígidos existentes en las proximidades de la calzada.
- La posible existencia de barrera de seguridad.
- El trazado de la carretera.

Indicador de inclinación

La pendiente transversal de las márgenes es uno de los factores que influye decisivamente en la frecuencia y la gravedad de los accidentes por salida de la calzada



Figura 3. Indicador de inclinación de márgenes = 4: Inclinación vertical de 1:3 con desnivel de altura superior a 1 m.

de acuerdo con los resultados de investigaciones anteriores. Si la margen de una carretera presenta una inclinación superior a 1V:3H, las posibilidades de recuperación del control del vehículo tras una salida de la calzada son muy reducidas. Al mismo tiempo la probabilidad de que el vehículo vuelque aumenta considerablemente. Así, la Guía de diseño de márgenes de la AASHTO (2002) clasifica las pendientes transversales de 1V:3H como sin posibilidad de recuperación del control, mientras que 1V:4H o más tendidas se clasifican como con posibilidad de recuperación del control, aunque se recomienda que la inclinación no supere una pendiente 1V:6H.

La combinación de la altura de terraplén y su inclinación transversal también influyen en la gravedad de los accidentes. Las Recomendaciones españolas sugieren que los taludes de terraplén con una inclinación superior a 1V:3H y una altura mayor de 3 m sean protegidos con barrera de seguridad.

En la investigación se clasificaron las inclinaciones de las márgenes de las carreteras en cinco categorías cuyos límites se fijaron teniendo en cuenta los valores recomendados en investigaciones internacionales. Las categorías son las siguientes:

- Indicador de inclinación = 1.
 - Inclinación de la margen de 1V:6H o menor. Condiciones ideales para recuperar el control del vehículo.
- Indicador de inclinación = 2.
 - Inclinación de la margen comprendida entre 1V:4H y 1V:6H. Elevada probabilidad de recuperación del control del vehículo.
- Indicador de inclinación = 3.
 - Inclinación de la margen del orden de 1V:3H, con un desnivel no superior a 1 metro. Moderada probabilidad de recuperación del control del vehículo.
- Indicador de inclinación = 4.
 - Inclinación de la margen del orden de 1V:3H, con un desnivel superior a 1 metro. Elevada probabilidad de vuelco del vehículo.
- Indicador de inclinación = 5.
 - Inclinación de la margen del orden de 1V:2H o superior. Nula posibilidad de recuperar el control del vehículo.



Figura 4. Indicador de obstáculos = 1: Obstáculos localizados a más de 10 m del borde de la calzada.

Indicador de distancia a obstáculos

La presencia de obstáculos rígidos y su distancia al borde de la calzada influyen de forma decisiva en las consecuencias de las salidas de la calzada.

Los obstáculos que se presentan en las márgenes de una carretera pueden clasificarse en función su carácter continuo o localizado:

- **Obstáculos continuos.** Son todos aquellos elementos que se encuentran dispuestos a lo largo de las márgenes de la carretera en una longitud prolongada. Entre los obstáculos continuos más comunes se encuentran los siguientes:
 - Cunetas. Las cunetas pueden provocar el vuelco de los vehículos cuando éstos se salen de la calzada y las franquean. Una cuneta reducida, triangular o trapezoidal se suele considerar peligrosa cuando tiene más de 15 cm de profundidad.
 - Desniveles en desmontes y terraplenes.
 - Desniveles verticales. Los puentes, viaductos y obras de paso son elementos de riesgo debido a la potencial gravedad de la caída desde ellos. Estos elementos deben ser protegidos mediante la implantación de pretilas en sus bordes.
 - Pantallas, muros continuos y estructuras similares.
 - Bordillos. Estos elementos pueden provocar la desestabilización de los vehículos e incluso el vuelco de

éstos cuando su altura supera los 10 cm y no presentan un perfil que permita el remonte de la rueda del vehículo.

- **Obstáculos puntuales.** Bajo esta denominación se engloban todos aquellos elementos que se encuentran dispuestos de forma localizada en las márgenes y medianas de las carreteras. La peligrosidad de un objeto rígido está directamente relacionada con su diámetro y su rigidez mecánica. Entre los obstáculos puntuales más comunes se encuentran los siguientes:
 - Árboles.
 - Soportes de luminarias.
 - Postes de servicios.
 - Postes de señales.
 - Edificaciones.
 - Pilas de puentes.
 - Elementos del sistema de drenaje superficial: arquetas, impostas y alcantarillas.
 - Terminales de barreras no adecuados.

La Guía de diseño de márgenes de la AASHTO (2002) recomienda que se dispongan zonas libres de obstáculos con unas anchuras mínimas que dependen de la intensidad de tráfico y la velocidad de circulación, con un rango que abarca desde 2 m para carreteras de baja intensidad hasta 14 m en carreteras de intensidades superiores a 6 000 veh/día y velocidades de 110 km/h.

Los resultados del proyecto de investigación RISER (2005) basados en datos de Francia, EE.UU. y los Países Bajos indican



Figura 5. Indicador de obstáculos = 4: Obstáculos localizados a menos de 3 m del borde de la calzada.

que el riesgo de colisión con un obstáculo disminuye de forma muy acusada a partir de los primeros metros, de forma que la mayoría de los impactos con obstáculos se producen en los primeros 10 m. La mayoría de las zonas de seguridad en Europa se establecen con anchuras de 6 a 10 m para carreteras convencionales con velocidades de proyecto de alrededor de 100 km/h. Las zonas de seguridad son menores para velocidades más bajas, de forma que para carreteras de 80 km/h, el ancho de zona de seguridad se reduce a un rango de 4,5 a 7 m.

En la Red del Estado en España, la instalación de barrera de seguridad está recomendada para proteger los obstáculos rígidos situados a una distancia del borde de la calzada inferior a un determinado valor, que varía desde 4,5 m en carreteras de dos carriles en terreno llano hasta 16 m en el exterior de curvas de carreteras de doble calzada y elevada velocidad de proyecto.

Teniendo en cuenta estas referencias, las categorías consideradas para el indicador de distancia a obstáculos fueron las siguientes:

- Indicador de obstáculos = 1.
 - Obstáculos localizados a más de 10 m desde el borde de la calzada.
- Indicador de obstáculos = 2.

- Obstáculos localizados a una distancia comprendida entre 5 y 10 m desde el borde de la calzada.
- Indicador de obstáculos = 3.
 - Obstáculos localizados a una distancia comprendida entre 3 y 5 m desde el borde de la calzada.
- Indicador de obstáculos = 4.
 - Obstáculos localizados a menos de 3 m desde el borde de la calzada.

Indicador de presencia de barrera de seguridad

Las barreras de seguridad se instalan a lo largo del borde de la calzada para evitar que los vehículos que se salgan sin control de ella colisionen con obstáculos rígidos, vuelquen debido a las pronunciadas pendientes laterales o caigan desde una determinada altura. Las barreras a su vez representan un cierto riesgo, ya que la colisión con ellas puede causar daños al vehículo y sus ocupantes, aunque si el funcionamiento de la barrera es adecuado estos daños son menores que los que se producirían en caso de no estar protegidos los obstáculos. En todo caso, la disposición de barreras es un elemento a tener en cuenta en la caracterización de la seguridad de las márgenes.

En la actualidad, en las carreteras en

servicio existen barreras dispuestas con arreglo a distintos criterios que fueron evolucionando a lo largo de los años hasta la publicación en el año 1995 de las Recomendaciones sobre sistemas de contención de vehículos. En la investigación se decidió diferenciar las barreras que no cumplen lo establecido en estas Recomendaciones en cuanto a la longitud o disposición de los terminales de las que sí lo cumplen, de forma que en el posterior análisis se pudiera contrastar si existe diferencia en los resultados de unas y otras. En consecuencia las categorías consideradas para el indicador de presencia de barrera de seguridad fueron las siguientes:

- Indicador de barrera = 1
 - No existe barrera de seguridad.
- Indicador de barrera = 2
 - Existe barrera de seguridad con una disposición ajustada a los criterios establecidos en las Recomendaciones sobre sistemas de contención de vehículos.
- Indicador de barrera = 3
 - Sólo existe barrera de seguridad cuya disposición (longitud o disposición de los terminales) no se ajusta a los criterios de las Recomendaciones.

Indicador de trazado

El trazado de la carretera influye tanto en las frecuencias de las salidas de la calzada como en los ángulos de impacto con los eventuales obstáculos (Ray, 1999). Diversas investigaciones (Lee y Mannering, 2002; Pardillo y Llamas, 2003) han encontrado que la frecuencia y la gravedad de los accidentes en curvas son mayores que en rectas. También se ha encontrado que la curvatura, la inclinación de la rasante, la resistencia al deslizamiento y la consistencia del trazado influyen en el grado de peligrosidad de una curva. Dado que el propósito del estudio era desarrollar un método de evaluación fácilmente aplicable, el indicador de trazado se limitó a distinguir las curvas y rectas. El efecto de los parámetros que reflejan con mayor detalle las características del trazado se puede incorporar al análisis por medio de modelos de regresión multivariante.

En consecuencia, se establecieron dos categorías para el indicador de trazado (ALI):

- Indicador de trazado = 1: Recta
- Indicador de trazado = 2: Curva

Obtención de datos

Con el fin de obtener la información necesaria para la calibración del ICSM se llevó a cabo una campaña de toma de datos de la configuración de las márgenes en una

Tabla 1. Agrupación de las combinaciones de valores de los indicadores de configuración de las márgenes con índices medios de accidentalidad por salida de la calzada homogéneos.

Grupo	Indicadores				N	Índices de accidentalidad por salida de la calzada	
	Trazado	Pendiente transversal	Distancia a obstáculos	Barrera de seguridad		IFs	IGs
1	1 / 2	1	1	1	153	0,00	0,00
	1 / 2	1	2	1	118	0,21	0,00
2	1	1/2	3	1	463	2,67	0,00
	1	2	1	1	245	2,01	0,32
	1	2	2	1	179	2,30	0,29
	2	1/2	3	1	277	3,37	1,08
	2	2	1/2	1	116	2,12	0,68
	1 / 2	1/2/3/4/5	1/2/3/4	2	776	3,97	0,54
3	1	2	4	1/3	767	4,75	2,08
	1/2	3	1	1/3	706	5,35	2,06
	1	3	2/3	1/3	985	3,84	2,20
	2	3	2/3	1/3	807	7,54	2,01
4	1/2	4/5	1	1/3	90	13,59	6,60
	1/2	4	2/3	1/3	317	15,75	7,87
	1	5	3	1/3	245	12,57	8,35
	2	2	4	1/3	787	11,26	5,18
5	2	5	3	1/3	324	19,86	9,30

muestra de carreteras convencionales españolas, con una longitud total de 1 956 km (1 432 km de la Red del Estado y 514 km de la Red de la Junta de Extremadura). Las carreteras estudiadas presentaban durante el período de estudio un rango de IMD comprendido entre 960 y 13 270 veh/día.

La toma de datos se refirió a tramos de una longitud fija de 100 m. Para cada tramo se determinaron los valores de los indica-

dores de configuración de las márgenes a partir de los inventarios en vídeo facilitados por las Administraciones correspondientes complementados con tomas de datos en campo. Estos datos fueron posteriormente agregados para que las muestras a analizar consistieran en tramos de 200 m.

Para cada tramo de 200 m se obtuvieron de las bases de datos de seguridad vial de las administraciones correspondientes los registros de accidentes por salida de la calzada a lo largo de un período de 6 años (2000-2005) y los valores medios de la IMD en este período.

Análisis de conglomerados y definición de categorías

Los diferentes valores de los indicadores de configuración de las márgenes dan lugar a un total de 120 combinaciones posibles, cada una de las cuales representa una posible configuración de la margen de la carretera. Para establecer categorías homogéneas de estas configuraciones respecto a la accidentalidad por salida de la calzada se realizó un análisis estadístico de los valores medios de dos índices que relacionan la frecuencia de los accidentes por salida de la calzada y la gravedad de sus



Figura 6. Indicador de barrera = 3: Existencia de barrera cuya disposición no se ajusta a los criterios de las Recomendaciones sobre sistemas de contención de vehículos.

consecuencias con el nivel de exposición al riesgo de los vehículos que recorren las carreteras, medido éste último a través de las distancias recorridas en cada tramo objeto de análisis. Los índices son los siguientes:

- Índice de frecuencia de accidentes por salida de la calzada (IFs)

Este índice se define como el número de accidentes con víctimas por salida de la calzada por cada cien millones de km recorridos. El valor de este índice para un determinado tramo de carretera puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$IFs = \frac{ACV}{IMD_m \cdot L \cdot 365 \cdot N} \times 10^8$$

siendo

ACV: Número de accidentes con víctimas por salida de la calzada registrados durante el período de análisis

IMD_m: Intensidad media diaria a lo largo del período el análisis (veh/día)

L: longitud del tramo objeto de análisis (km)

N: Número de años del período de análisis

- Índice de heridos graves y muertos por salida de la calzada (IGs)

Este índice se define como el número de víctimas mortales y heridos graves en accidentes por salida de la calzada por cada cien millones de km recorridos. El valor de este índice para un determinado tramo de carretera puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$IGs = \frac{VG}{IMD_m \cdot L \cdot 365 \cdot N} \times 10^8$$

siendo

VG: Número de muertos y heridos graves en accidentes por salida de la calzada durante el período de análisis

Mediante un análisis de conglomerados (clusters) basado en la distancia euclídea resultante de las dos tasas de accidentes se identificaron cinco grupos de combinaciones de los indicadores de configuración de las márgenes con valores medios homogéneos de los índices de frecuencia y de víctimas graves y muertos de los accidentes por salida de la calzada en la muestra analizada (Pardillo, Domínguez y Jurado, 2010). La *tabla 1* (pág. 36) refleja las com-

RECTAS		DISTANCIA A OBSTÁCULOS			
		<3 m	3-5 m	5-10 m	>10 m
INCLINACIÓN DE LOS TALUDES	>1V:2H				
	1V:3H		d>1m	d>1m	d<1m
	1V:4H – 1V:6H		d<1m	d<1m	d<1m
	<1V:6H				

ICSM = 1

ICSM = 2

ICSM = 3

ICSM = 4

ICSM = 5

NOTA: Los tramos protegidos con barrera instalada de acuerdo con las Recomendaciones sobre sistemas de contención se clasifican como ICSM=2, independientemente del valor del resto de los indicadores. En aquellos tramos en los que la disposición de la barrera no cumple las condiciones establecidas en las Recomendaciones el valor del ICSM se obtiene a partir de los valores del resto de los indicadores de configuración de las márgenes.

Figura 7. Gráfico para la clasificación de tramos en rectas sin existencia de barrera.

binaciones de los indicadores incluidas en cada grupo, el tamaño de la muestra N (número de tramos de 200 m) y los índices medios de accidentalidad por salida de la calzada de cada combinación.

A partir de los resultados reflejados en la *tabla 1* se llegó a la conclusión de que los tramos con un valor del indicador de barrera de contención igual a 3, es decir, aquellos en los que la barrera no cumple las condiciones fijadas en las Recomendaciones sobre sistemas de contención en cuanto a longitud o disposición de los terminales, resultaban clasificados en la misma categoría que los que no estaban protegidos con barrera de seguridad, dependiendo por tanto su clasificación de los valores del resto de los indicadores de configuración

de las márgenes. Este resultado confirma la importancia de instalar y mantener las barreras de acuerdo con lo establecido en las Recomendaciones.

A partir de estos resultados se establecieron 5 categorías o niveles del índice de condiciones de seguridad de las márgenes (ICSM) propuesto como resultado de la investigación. Las *figuras 7 y 8* (pág. 38) reflejan gráficamente la definición del ICSM para los tramos en recta y en curva respectivamente.

Contraste estadístico de la clasificación

Para evaluar el nivel de confianza estadístico de la clasificación establecida se

CURVAS		DISTANCIA A OBSTÁCULOS			
		<3 m	3-5 m	5-10 m	>10 m
INCLINACIÓN DE LOS TALUDES	>1V:2H				
	1V:3H	d>1m	d>1m	d>1m	d>1m
		d<1m	d<1m	d<1m	d<1m
	1V:4H – 1V:6H				
	<1V:6H				

	ICSM = 1
	ICSM = 2
	ICSM = 3
	ICSM = 4
	ICSM = 5

NOTA: Los tramos protegidos con barrera instalada de acuerdo con las Recomendaciones sobre sistemas de contención se clasifican como ICSM=2, independientemente del valor del resto de los indicadores. En aquellos tramos en los que la disposición de la barrera no cumple las condiciones establecidas en las Recomendaciones el valor del ICSM se obtiene a partir de los valores del resto de los indicadores de configuración de las márgenes.

Figura 8. Gráfico para la clasificación de tramos en curvas sin existencia de barrera.

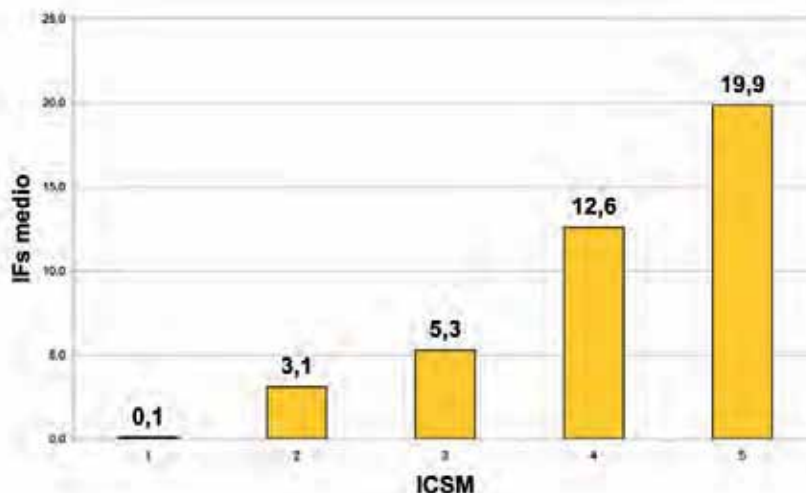


Figura 9. Índice de frecuencia de accidentes con víctimas por salida de la calzada en función del ICSM.

realizaron contrastes del grado de significación de la diferencia de medias de los índices de accidentalidad por salida de la calzada entre las categorías identificadas en la muestra utilizada en la calibración.

Las figuras 9 y 10 reflejan los valores medios de los índices de frecuencia de accidentes de accidentalidad por salida de la calzada en función del valor del ICSM en la muestra utilizada para la calibración.

Dado que los índices de accidentes no presentan una distribución normal, se aplicó una prueba de significación no paramétrica, el test U de Mann-Whitney, que no parte de la hipótesis de normalidad de la distribución y sólo requiere que las dos muestras comparadas sean independientes y que las observaciones sean medidas ordinales o continuas, condiciones ambas que se cumplen en el problema estudiado. Las tablas 2 y 3 (pág. 39) reflejan el nivel de confianza con el que se acepta la hipótesis de no igualdad de medias de los índices de frecuencia y de víctimas graves y muertos de accidentes por salida de la calzada entre categorías del ICSM.

Los resultados reflejados en las tablas 2 y 3 indican que existen diferencias contrastadas con niveles de significación superiores al 99% entre las medias de los índices de frecuencia de accidentes con víctimas por salida de la calzada de todas las categorías del ICSM. Además, las diferencias de medias del índice de heridos graves y muertos son también superiores al 99% entre todas las categorías, excepto entre la 1 y 2, cuya diferencia es significativa al nivel del 85%. En consecuencia, la clasificación establecida de las categorías del ICSM en función de los índices de accidentalidad por salida de la calzada se puede considerar altamente significativa.

Estudio de la influencia del valor de ICSM en la gravedad de los accidentes por salida de la calzada

Como complemento del ajuste del ICSM, se analizó la información correspondiente a 2 546 accidentes con víctimas por salida de la calzada registrados en las carreteras convencionales de la Red del Estado durante el período 2000-2002. La información disponible incluía los datos

correspondientes a la tipología y las consecuencias de los accidentes, y a la configuración de las márgenes (pendiente transversal, naturaleza y situación de obstáculos, presencia y tipo de barrera de seguridad y características del trazado en planta) en el tramo en el que se produce el accidente. Con esta información resultó posible determinar el Índice de condiciones de seguridad de las márgenes (ICSM) correspondiente al tramo en que se produjo cada accidente.

Dado que no se disponía de información que permitiese calcular los valores del ICSM en los tramos en los que no se registraron accidentes a lo largo del período considerado, no fue posible basar el análisis en los índices de frecuencia y gravedad de los accidentes por salida de la calzada. En cambio, con la información disponible sí fue posible estudiar los siguientes ratios de gravedad de los accidentes:

- Ratio de víctimas mortales por cada 100 accidentes con víctimas: VM/ 100 ACV.
- Ratio de heridos graves por cada 100 accidentes con víctimas: HG/ 100 ACV.
- Ratio de heridos leves por cada 100 accidentes con víctimas: HL/ 100 ACV.

La *tabla 4* refleja los valores de estos ratios en función del valor del índice de condiciones de seguridad de las márgenes.

Los ratios de víctimas mortales y de heridos graves por cada 100 accidentes con víctimas reflejados en la *tabla 4* son crecientes con el valor del ICSM. Esto confir-

Tabla 2. Nivel de significación de la diferencia de medias de los índices de frecuencia de accidentes con víctimas por salida de la calzada entre categorías del ICSM.

ICSM	1	2	3	4	5
1		99,8900%	100%	100%	100%
2	99,8900%		99,7900%	100%	100%
3	100%	99,7900%		100%	100%
4	100%	100%	99,7900%		99,9700%
5	100%	100%	100%	99,9700%	

Tabla 3. Nivel de significación de la diferencia de medias de los índices de heridos graves y muertos por salida de la calzada entre categorías del ICSM.

ICSM	1	2	3	4	5
1		85,4800%	98,1800%	99,9600%	100%
2	85,4800%		99,9700%	100%	100%
3	98,1800%	99,9700%		100%	100%
4	99,9600%	100%	100%		99,8800%
5	100%	100%	100%	99,8800%	

Tabla 4. Ratios de gravedad de los accidentes con víctimas en función del índice de condiciones de seguridad de las márgenes.

ICSM	N	VM	HG	HL	VM/100 ACV	HG/100 ACV	HL/100 ACV
1	288	13	92	310	4,5	31,9	107,6
2	405	22	139	389	5,4	34,3	96,0
3	298	17	111	329	5,7	37,2	110,4
4	789	54	299	822	6,8	37,9	104,2
5	766	99	308	718	12,9	40,2	93,7

ma la coherencia del índice al reflejar mayor gravedad media de los accidentes por salida de la calzada en los tramos con peores condiciones de seguridad de las márgenes.

Por otra parte, los accidentes por salida de la calzada en tramos dotados de

barreras de seguridad dispuestas según lo especificado en las Recomendaciones de Sistemas de Contención (ICSM = 2) tienen menor gravedad media que los que tienen un ICSM superior, por lo que es recomendable proteger con barreras los tramos que presenten estos valores del ICSM, dando prioridad a los de las categorías más elevadas.

Conclusiones

La investigación llevada a cabo ha permitido caracterizar las condiciones relativas a la seguridad de la circulación de las márgenes de las carreteras a través de un indicador, el ICSM, para el que se han definido cinco categorías. Esta clasificación permite además expresar las características de las márgenes mediante una única variable independiente. De este modo, esta variable podrá ser incluida de manera sencilla en los modelos de predicción de la frecuencia de los accidentes, y más concretamente, per-

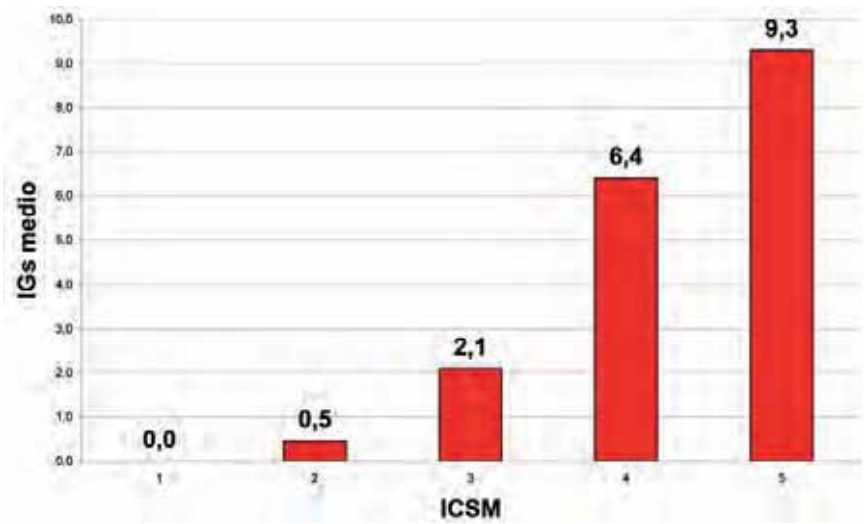


Figura 10. Índice de heridos graves y muertos por salida de la calzada en función del ICSM.

mitirá desarrollar, junto a otras variables, modelos de predicción de la accidentalidad por salida de la calzada.

El ICSM se puede utilizar también para normalizar la recogida de información relacionada con la seguridad de las márgenes de las carreteras, haciendo referencia a los cuatro indicadores de configuración de las márgenes utilizados en la definición del índice.

De los resultados de la investigación fueron extraídas también las siguientes conclusiones:

- En todos los casos en que sea viable técnica y económicamente, deben disponerse pendientes transversales de las márgenes de 1:6 o menores, que son las que permiten conseguir un valor del ICSM de 1.
- Teniendo en cuenta los valores de distancia a obstáculos que caracterizan los tramos incluidos en la categorías con ICSM superior a 3, parece indicado que en las carreteras convencionales se establezca una anchura de la zona de seguridad de entre 3 y 5 m según la inclinación de las márgenes.
- Los obstáculos con los que se han producido colisiones mortales en la muestra analizada son, por orden decreciente de frecuencia: los elementos de drenaje, los árboles y postes, los soportes de estructuras y los taludes de desmonte. Esto indica que es recomendable atender prioritariamente a su tratamiento cuando se encuentren situados dentro de la zona de seguridad.
- En lo relativo a las colisiones con obstáculo con víctimas, además de los relacionados en el apartado anterior, aparecen también con una frecuencia elevada las cunetas y, con menor frecuencia, las farolas. En consecuencia, para mejorar la seguridad de las márgenes es recomendable considerar también el tratamiento más adecuado para estos elementos.
- Teniendo en cuenta los valores de la inclinación de las pendientes transversales y de los desniveles que caracterizan los tramos incluidos en las categorías con ICSM superior a 3, en las que se han observado los valores más altos de los ratios medios de gravedad de los accidentes por salida de la calzada,

se puede considerar la inclinación de 1:3 como valor crítico de la pendiente transversal, a partir del cual deben protegerse los taludes de terraplén con una barrera de seguridad.

- En los programas de mejora de la seguridad vial, la instalación barrera de seguridad se debe considerar para proteger aquellos sectores que presentan valores del ICSM superiores a 2, dando prioridad a los valores más altos del índice.

Agradecimientos

La investigación reflejada en este artículo fue subvencionada por el Centro de Estudios Públicos y Experimentación de Obras (CEDEX) del Ministerio de Fomento. Los autores agradecen también la colaboración de la Dirección General de Carreteras, de la Unidad de Carreteras de Teruel y de la Demarcación de Carreteras del Estado en Extremadura del Ministerio de Fomento y de la Dirección General de Carreteras de la Junta de Extremadura en la obtención de datos.

Referencias

- AASHTO (2002): "Roadside design guide". American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.
- Council, F. y Stewart, J. (1996): "Severity indexes for roadside objects". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1528, 87-96.
- Dirección General de Carreteras (1995): "Recomendaciones sobre sistemas de contención de vehículos". OC 321/95. Ministerio de Fomento, Madrid.
- Dirección General de Carreteras (2009): "Criterios de aplicación de barreras de seguridad metálicas". OC 28/2009. Ministerio de Fomento, Madrid.
- Dirección General de Tráfico (2010): *Anuario estadístico de accidentes 2008*. DGT, Madrid
- Lee, J., y Mannering, F. (2002): "Impact of roadside features on the frequency and severity of run-off-roadway accidents: an empirical analysis". *Accident Analysis & Prevention*, 34(2), 149-161.

Mak, K. (1995): "Safety effects of roadway design decisions-roadside". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1512, 16-21.

Mak, K., Sicking, L. y Zimmerman, K. (1998): "Roadside Safety Analysis Program: A Cost-Effectiveness Analysis Procedure". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1647, 67-74.

Pardillo, J.M. y Llamas, R. (2003): "Relevant Variables for Crash Rate Prediction in Spain's Two-lane Rural Roads". *TRB 82nd Annual Meeting Compendium of Papers Transportation Research Board*, Washington D.C.

Pardillo, J.M. et al (2009): "DISCAM: Herramientas para un diseño seguro de la carretera y sus márgenes. Informe final". Universidad Politécnica de Madrid.

Pardillo, J.M., Domínguez, C.A. y Jurado, R. (2010): "Empirical Calibration of a Roadside Hazardousness Index for Spanish Two-Lane Rural Roads". *Accident Analysis and Prevention* 42-6 (2010), pp. 2018-2013

Ray, M.H. (1999): "Impact conditions in side-impact collisions with fixed roadside objects". *Accident Analysis and Prevention* 31, 21-30.

Riser Consortium (2005): "Guidelines for Roadside Infrastructure on New and Existing Roads". Roadside Infrastructure for Safer European Roads, Deliverable 6. 5th Research Framework Programme "Growth", European Commission, Brussels.

Stonex, K. A. (1960): "Roadside design for safety". *Highway research board proceedings*. Vol. 39. Transportation Research Board. Washington, D.C.

Turner, S., Dixon, A. Y Wood, G. (2004): "Assessing the crash risk implications of roadside hazards". *Technical Conference Papers 2004, IPENZ Transportation Group*. New Zealand.

Zegeer, C. V. et al. (1988): "Safety effects of cross-section design for two-lane roads". *Transportation Research Record* 1195. Transportation Research Board. Washington, D.C.

Zegeer, C. V. et al. (1988): "Accident effects of sideslope and other roadside features on two-lane roads". *Transportation Research Record* No. 1195. Geometric design and operational effects. ❖