

Metodología para estimar la eficacia de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación vial. Aplicación al caso de la Comunidad de Madrid

Ignacio Pérez Pérez¹; Rafael Izquierdo de Bartolomé²

1 Universidade de La Coruña, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

2 Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

INTRODUCCIÓN.

En los estudios de accidentalidad que se realizan en España para identificar *emplazamientos peligrosos* o para evaluar la efectividad de una actuación llevada a cabo en uno o varios emplazamiento, se suele tomar como punto de partida el *número de accidentes registrados* o el *índice de peligrosidad* durante un cierto período de tiempo. Sin embargo, diversas investigaciones han puesto de manifiesto que éste es un planteamiento poco satisfactorio. El *índice de peligrosidad* producido en un emplazamiento durante un período de tiempo anterior a la ejecución de una determinada actuación, no es un buen estimador del *índice de peligrosidad a largo plazo*. Esto se debe a que el número de accidentes acaecidos en un determinado emplazamiento se comporta como una variable aleatoria que fluctúa en torno al *número esperado de accidentes* y, como consecuencia de ello, está sujeta al fenómeno estadísticamente conocido como *regresión a la media*.

Por otra parte, en España existe la necesidad de que los estudios de accidentes de tráfico se hagan mediante un planteamiento estocástico que sustituya a la concepción determinista que subyace a la mayoría de los trabajos sobre el tema realizados hasta el momento. Es por ello, que el principal objetivo de este artículo se puede enunciar como *el diseño de un procedimiento de evaluación de la efectividad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación, basado en el análisis estadístico bayesiano*. Para su

contrastación empírica, este procedimiento se aplica, en concreto, al estudio de la incidencia de las actuaciones de acondicionamiento y refuerzo de firmes de carretera sobre la accidentalidad.

Aunque las actuaciones de *acondicionamiento* y *refuerzo de firme* de carretera no se consideren hasta el momento como actuaciones específicas de mejora de la seguridad en la circulación, éstas pueden, sin embargo, ser calificadas como actuaciones preventivas y, por lo tanto, utilizarse como base para el desarrollo de un procedimiento de evaluación de la efectividad que, por extensión, siempre es susceptible de aplicación en las actuaciones específicas de mejora de la seguridad en la circulación propiamente dichas.

METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA EFECTIVIDAD

1. ANÁLISIS A NIVEL INDIVIDUAL.

Para evaluar la efectividad de una actuación de mejora de la seguridad en la circulación ejecutada en un único emplazamiento se hará uso del diseño implícito en las investigaciones *antes y después*, pero en esta ocasión estimando y comparando el *índice de peligrosidad a largo plazo* durante dos períodos de tiempo de la misma duración, uno anterior y otro posterior a la ejecución de la actuación objeto de estudio. Si el *índice de peligrosidad a largo plazo* en el período posterior a la ejecución de la actuación disminuye, se dice que la actuación ha sido efectiva como medida que mejora la seguridad. Por lo tanto, según este tipo de estudio la efectividad de una actuación ejecutada en un emplazamiento, se puede expresar en porcentaje de la manera siguiente:

$$E(\%) = \frac{\eta_{Ai} - \eta_{Di}}{\eta_{Ai}} \cdot 100 \quad (1)$$

donde:

E = Efectividad de la actuación.

η_{Di} = Índice de peligrosidad a largo plazo en el emplazamiento *i* después de la actuación. Si éste es puntual se expresa en accidentes/10⁶ veh. y si es una sección en accidentes/10⁶ veh.- km.

η_{Ai} = Índice de peligrosidad a largo plazo en el emplazamiento i antes de la actuación. Si éste es puntual se expresa en accidentes/ 10^6 veh. y si es una sección en accidentes/ 10^6 veh.- km.

El *índice de peligrosidad a largo plazo* (η) se define como el *índice de peligrosidad* promedio que se espera que se produzca *al término de varios años* en un emplazamiento, siempre y cuando no se modifiquen las características físicas del mismo como consecuencia de cualquier tipo de actuación. Éste se considera una variable aleatoria, siendo su valor desconocido, lo que se conoce es el *índice de peligrosidad* calculado en función del *número de accidentes registrados* y de la *exposición al riesgo*. Análogamente, el *índice de peligrosidad a largo plazo para un conjunto de emplazamientos* también es una variable aleatoria y, en este caso, solamente se conocen los *índices de peligrosidad de cada uno de los emplazamientos*. Por ello, como se puede observar en la ecuación 1, para evaluar ahora la efectividad de una actuación hay que previamente estimar el *índice de peligrosidad a largo plazo*, tanto en el período anterior como en el posterior a la actuación de mejora de la seguridad. Es por esto que, a continuación, se explicará cómo realizar esta tarea utilizando el *método empírico bayesiano*.

1.1. *Estimación del índice de peligrosidad a largo plazo.*

Antes de pasar a describir el procedimiento conviene hacer énfasis en que la estimación del *índice de peligrosidad a largo plazo* habrá que hacerla antes y después de cada actuación; es decir, esta estimación no se considera constante sino que, por el contrario, puede variar una vez que se ha ejecutado la actuación en un determinado emplazamiento. Asimismo, conviene puntualizar las siguientes hipótesis (Higle y Witkowski, 1988; Pardillo, 1995a):

- a) *"...en ausencia de grandes modificaciones en las características intrínsecas de un emplazamiento, la ocurrencia de accidentes en el mismo se produce de acuerdo a una distribución de Poisson."*
- b) *"...el índice de peligrosidad a largo plazo η_i es una variable aleatoria que se produce para un conjunto de emplazamientos de acuerdo con una distribución a priori del Tipo Gamma."*

La primera hipótesis es corroborada por innumerables estudios de seguridad vial y está basada en la evidencia de que los accidentes de tráfico son sucesos raros que se producen aleatoriamente. La segunda de las hipótesis enunciadas se basa en que si, tal y como ha sido comprobado por numerosos investigadores (Abess et al, 1981; Hauer, 1986), el *número esperado de accidentes a largo plazo* en un conjunto de emplazamientos similares sigue una distribución *Gamma*, entonces el *índice de peligrosidad a largo plazo* deberá ajustarse al mismo tipo de distribución.

Partiendo de estas hipótesis es matemáticamente demostrable que la estimación del *índice de peligrosidad a largo plazo* en un emplazamiento *i*, se puede expresar en función de la siguiente ecuación (Higle et al, 1988; Pardillo, 1995; Pérez, 1996):

$$\hat{\eta}_i = \frac{\alpha_i}{\omega_i} = \frac{\alpha + N_i}{\omega + E_i} \quad (2)$$

donde:

- N_i = Número de accidente registrados en el emplazamiento *i*.
- E = Exposición al riesgo registrada en el emplazamiento *i*. Si éste es una sección en accidentes/10⁶ veh.- km.
- α, ω = Parámetros de la distribución *a posteriori* del tipo Gamma.

Por otra parte, puede observarse en la ecuación anterior que, en dicho emplazamiento, el índice de peligrosidad a largo plazo depende de los datos registrados y de la información *a priori*. Los datos registrados corresponden al *número de accidentes registrados* (N) y a la *exposición al riesgo* (E). La información *a priori* se puede interpretar como la observación de α accidentes en ω *vehículos-kilómetro recorridos*, o lo que es lo mismo, los parámetros de la distribución *a priori*. Por lo tanto, si se conocieran los valores de los parámetros *a priori*, a la luz de estos datos registrados, se podría estimar el *índice de peligrosidad a largo plazo*.

En estas condiciones, para lograr este fin, se puede tomar en consideración la circunstancia de que la probabilidad no condicionada de registrar N_i accidentes en dicho emplazamiento se puede estimar mediante una distribución binomial negativa ajustada al conjunto de emplazamientos similares (Raiffa y Schlaifer, 1961; Berger, 1985; Maritz y Lwin, 1989):

En efecto, como es sabido por la estadística, para conocer el valor de los parámetros de la distribución *a priori* Gamma, puede recurrirse al hecho de que éstos son iguales a los de la *distribución binomial negativa*. Para ello, los parámetros de la distribución binomial negativa se pueden estimar aquí por medio del *método de la máxima verosimilitud*. En dicho método, bajo la hipótesis de que los accidentes acaecidos en cada emplazamiento son sucesos independientes, la *función de verosimilitud* $L(\alpha, \omega)$ de registrar una serie determinada de accidentes será el producto de las *verosimilitudes* individuales. Por consiguiente, incorporando estas consideraciones, la expresión de $L(\alpha, \omega)$ es la siguiente (Maritz y Lwin, 1989):

$$L(\alpha, \omega) = \prod_{i=1}^n p(N_i) = \prod_{i=1}^n \frac{\Gamma(N_i + \alpha)}{N_i! \Gamma(\alpha)} \left(\frac{\omega}{\omega + E_i} \right)^\alpha \left(\frac{E_i}{\omega + E_i} \right)^{N_i} \quad (3)$$

A continuación, calculando el logaritmo neperiano de esta ecuación, derivando respecto a α y ω e igualando a cero los resultados se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones que permite estimar los valores *máximo verosímiles* de los parámetros α y ω (Maritz y Lwin, 1989):

$$\begin{aligned} n \ln \omega - \sum_{i=1}^n \ln(\omega + E_i) + \sum_{i=1}^n \Psi(\alpha + N_i) - n \Psi(\alpha) &= 0 \\ \frac{n \cdot \alpha}{\omega} - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\alpha + N_i}{\omega + E_i} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

donde:

$$\Psi(\alpha + N_i) = \frac{\Gamma'(\alpha + N_i)}{\Gamma(\alpha + N_i)}$$

$$\Psi(\alpha) = \frac{\Gamma'(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}$$

n =número de emplazamientos de una misma categoría.

Los valores de α y ω estimados de esta forma se sustituyen en la ecuación 2 para obtener el *índice de peligrosidad a largo plazo* (η_i) en el emplazamiento. Esta estimación sirve tanto para el período anterior como para el posterior a la ejecución de la actuación. Por

consiguiente, siguiendo los pasos explicados a lo largo de este apartado se podrán estimar η_{Ai} y η_{Di} en el emplazamiento antes y después de la actuación. Reemplazando finalmente estos valores en la ecuación 1 se obtendrá el valor de la efectividad, a nivel individual, de la actuación de mejora de la seguridad en la circulación.

1.2. Significación de la efectividad de una actuación individual

Una vez evaluada la efectividad de la actuación, hay que confirmar la *significación* del cambio estimado en la media de la distribución *a posteriori* del *índice de peligrosidad a largo plazo*. Para ello, se debe *comprobar* que la *probabilidad* de que el *índice de peligrosidad a largo plazo* en el período *posterior* sea *menor* que el *índice de peligrosidad a largo plazo* en el período *anterior* supere un determinado *nivel* de significación. Por lo tanto, la efectividad de una actuación se puede considerar significativa, desde un punto de vista estadístico, siempre que se cumpla lo siguiente:

$$P(\eta_{Ai} > \eta_{Di}) > \theta \quad (5)$$

donde:

θ = Nivel de significación en el cual, para un determinado nivel de confianza, la actuación de seguridad se considera efectiva en la reducción del índice de peligrosidad a largo plazo.

La parte izquierda de la inecuación anterior también se puede expresar de la siguiente manera (Higle y Witkowski, 1988; Pardillo, 1995a):

$$P(\hat{\eta}_{Ai} < \hat{\eta}_{Di}) = \frac{(\omega_A + E_{Ai})^{\alpha_A + N_{Ai}}}{\Gamma(\alpha_A + N_{Ai})} \int_0^{\hat{\eta}_{Di}} \eta^{\alpha_A + N_{Ai} - 1} \cdot e^{-(\omega_A + E_{Ai})\eta} \cdot d\eta \quad (6)$$

Si el resultado de la ecuación anterior es menor que el *nivel de confianza* adoptado, para un determinado nivel de confianza, se dirá que la actuación de seguridad ha sido efectiva en la reducción del *índice de peligrosidad a largo plazo* y, por lo tanto, esta reducción se considera atribuible a la misma y no es un resultado del azar.

ANÁLISIS EN EL CONJUNTO DE LAS ACTUACIONES.

Hasta ahora se ha expuesto un método de evaluación de una actuación que se realiza para mejorar la seguridad de la circulación en un solo emplazamiento; es decir, se consideran una a

una y por separado las actuaciones de un mismo tipo. Sin embargo, es conocido por la ingeniería de tráfico que para que una actuación de mejora de la seguridad produzca una reducción significativa del índice de peligrosidad a largo plazo, se requiere que la diferencia el índice de peligrosidad a largo plazo antes y después de la actuación sea considerable. Por eso, la mayoría de las veces, al aplicar un contraste de significación a la evaluación de una actuación, aunque como consecuencia de ella se produzca una reducción del índice de peligrosidad a largo plazo, el valor de esta reducción no permite asegurar que el resultado es estadísticamente significativo y, por tanto, no cabe atribuir la mejora de las condiciones de seguridad en la circulación a la ejecución de dicha actuación.

En esta ocasión se requerirá la estimación de cada uno de los índices de peligrosidad a largo plazo antes y después de la ejecución en la totalidad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación de un mismo tipo, con el fin de obtener la media de los mismos.

Por lo tanto, la fórmula a emplear sería, en este caso, la siguiente:

$$E(\%) = \frac{\hat{\lambda}_A - \hat{\lambda}_D}{\hat{\lambda}_A} \cdot 100 \quad (7)$$

donde:

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}_A &= \text{Media de los índices de peligrosidad a largo plazo en el período anterior a la} \\ &\quad \text{ejecución de las actuaciones.} \\ \hat{\lambda}_D &= \text{Media de los índices de peligrosidad a largo plazo en el período posterior a la} \\ &\quad \text{ejecución de las actuaciones.} \end{aligned}$$

Como se sabe, en esta ocasión hay que confirmar que el estimado en la media *del índice de peligrosidad* en los distintos emplazamientos antes y después del conjunto de actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación es *significativa* desde el punto de vista estadístico y, por lo tanto, no es debida al azar. Para ello, se puede realizar un contraste de hipótesis mediante el estadístico *t de Student* para muestras pareadas. En este contraste se toma como *hipótesis nula* la no existencia de una *diferencia significativa* entre las medias de los *índices de peligrosidad* antes y después de las actuaciones en el conjunto de emplazamientos.

También se debe asumir que las distribuciones de los *índices de peligrosidad* antes y después son aproximadamente *normales* con medias μ_A , μ_D y varianzas σ_A^2 , σ_D^2 respectivamente.

Para utilizar esta prueba estadística, las medias de las distribuciones de los *índices de peligrosidad* (μ_A y μ_D) se estiman a partir de las medias de las muestras ($\hat{\eta}_A$ y $\hat{\eta}_D$).

Análogamente, las varianzas de la distribución de los *índices de peligrosidad* en el conjunto de emplazamientos (σ_A^2 y σ_D^2) antes y después de las actuaciones se estiman a partir de las varianzas de la muestras (S_A^2 y S_D^2). En tal caso, la expresión del estadístico de la *t de Student* es la siguiente (Snedecor y Cochran, 1989; Bowman y Brinkman, 1988):

$$t = \frac{\hat{\eta}_A - \hat{\eta}_D}{S_B / \sqrt{n}} \quad (8)$$

donde:

$$\begin{aligned} S_B^2 &= \text{Varianza de la diferencia de las medias de los índices de peligrosidad a largo plazo} \\ &\text{estimada a partir de la muestra.} \\ n &= \text{Número de emplazamientos de la misma categoría.} \end{aligned}$$

La varianza de la *diferencia de las medias de los índices de peligrosidad* se estima en función de las varianzas y covarianza de las dos muestras utilizando la siguiente expresión (Snedecor y Cochran, 1989):

$$S_B^2 = S_A^2 + S_D^2 - 2 \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\hat{\eta}_{Ai} - \hat{\eta}_A)(\hat{\eta}_{Di} - \hat{\eta}_D) \right] \quad (9)$$

Una vez estimado el estadístico *t* mediante la ecuación 8, hay que localizar paralelamente el *valor crítico* t_c en las tablas de la *t de Student* para $n - 1$ *grados de libertad* y un *nivel de confianza* elegido. Cuando el valor de *t* sea mayor que el de t_c se rechazará la *hipótesis nula* y se dirá que la diferencia entre las dos medias es *significativa* y, por lo tanto, la actuación ha sido efectiva en la reducción del *índice de peligrosidad*.

Además de confirmar estadísticamente que se produce una reducción significativa de la media de los índice de peligrosidad a largo plazo en los emplazamientos donde fueron ejecutadas las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación, también puede ser de utilidad efectuar una estimación del número de accidentes con víctimas que han sido evitados, precisamente,

como consecuencia de haber sido llevadas a cabo dichas actuaciones. En concreto, se puede estimar el número de accidentes evitados por kilómetro de actuación durante un año de duración. Para ello, se empleará la siguiente expresión:

$$AE = \frac{\sum (\hat{\eta}_{Ai} \cdot E_{Ai} - \hat{\eta}_{Di} \cdot E_{Di})}{l} \quad (8)$$

donde:

- AE = Número de accidentes evitados
- E_{Ai} = Exposición al riesgo en el emplazamiento i durante el último año antes del inicio de la ejecución de la actuación
- E_{Di} = Exposición al riesgo en el emplazamiento i durante el último año después del término de la ejecución de la actuación
- l = Longitud total de actuaciones de un mismo tipo ejecutadas en emplazamientos pertenecientes a una misma categoría

Los resultados obtenidos mediante la expresión precedente pueden ser utilizados, entre otras cosas, para realizar análisis de rentabilidad; es decir, para indagar, utilizando técnicas de evaluación económica de proyectos, cuáles son las actuaciones que producen una mayor reducción del número de accidentes a un menor coste.

DATOS NECESARIOS PARA LA EVALUACIÓN

En función de la metodología expuesta anteriormente, y después de proceder a realizar una búsqueda por los archivos disponibles en instituciones públicas concernidas por el problema, se llegó a la conclusión de que, para llevar a cabo la evaluación de las actuaciones, era preciso recolectar los siguientes tipos de datos:

- Datos de las propias actuaciones y de la infraestructura viaria
- Datos de los accidentes de tráfico
- Datos de intensidades medias diarias

Finalmente, los datos de las actuaciones y de las intensidades de tráfico fueron facilitados por la Dirección General de Carreteras de la Comunidad Autónoma de Madrid (CAM). Los datos de accidentes se obtuvieron, por un lado, a partir de los ficheros informáticos centrales de la Dirección General de Tráfico y, por otro, en la Dirección General de Carreteras de la CAM.

1. DATOS DE ACTUACIONES.

A causa de las limitaciones inherentes a la información disponible, para el análisis que se efectuará a continuación, solamente se tomaron los datos de las actuaciones de **acondicionamiento de carreteras y refuerzos de firmes** en carreteras convencionales y rurales con intensidades medias diarias superiores a 1000 v/d, ejecutadas en la red de la Comunidad Autónoma de Madrid, en el período de tiempo transcurrido entre los años 1985 y 1993.

Los datos extraídos de cada uno de los proyectos fueron, entre otros, los siguientes:

- Origen del proyecto
- Final del proyecto
- Tramos de carretera que abarcaba el proyecto
- Intersecciones dentro del proyecto
- Punto kilométrico en el origen
- Punto kilométrico en el final
- Posible desagregación de actuaciones dentro del proyecto

Por otra parte, el *Servicio de Publicaciones y Documentación* de la CAM puso también a disposición de esta tesis una colección completa de planos de las carreteras de la Comunidad de Madrid a escala 1:25.000, que fue utilizada para delimitar con precisión la ubicación de cada proyecto o actuación en los diferentes tramos de las carreteras de la Comunidad.

Antes de proceder a realizar la exposición del resto de datos empleados para realizar la evaluación de tales actuaciones, conviene definir las para una mayor claridad de la entidad de las mismas. En este sentido, los *acondicionamientos de carreteras* son aquellas actuaciones que, planteadas sobre una infraestructura existente, la mejoran notablemente, pues implican acciones que modifican ligeramente el trazado: acondicionamientos de curvas y rasantes, o ampliaciones de calzadas. Estas acciones se acompañan de una mejora sensible tanto del firme como de la señalización y el balizamiento. Por otro lado, los *refuerzos de firme* son aquellas actuaciones que implican exclusivamente la mejora del firme, las cuales van acompañadas también de una mejora en la señalización horizontal y el balizamiento de la calzada.

2. DATOS DE LAS INTENSIDADES DE TRÁFICO

En el *Servicio de Planificación* de la Dirección General de Carreteras de la CAM se obtuvieron los datos relativos a las intensidades medias diarias por tramos de carretera y estaciones de aforo, así como las tramificaciones de la red viaria incluidas en los planes generales 1986-1993 y 1994-2001. Estas tramificaciones, entre otros, permitieron la obtención de los siguientes datos:

- Intensidad media diaria
- Longitud del tramo
- Punto kilométrico en el origen y final del tramo
- Intensidad media diaria
- Ancho de calzada y plataforma
- Número de calzadas

3. DATOS DE LOS ACCIDENTES DE CIRCULACIÓN

En esta ocasión, se solicitaron en las oficinas centrales de la Dirección General de Tráfico, los datos de accidentes acaecidos en las Carreteras de la CAM durante el período de tiempo comprendido entre los años 1983 a 1995. Estos fueron proporcionados en soporte informático que incluía tres archivos conteniendo la siguiente información:

- Datos generales y de la infraestructura
- Datos del vehículo
- Datos de las personas involucradas en el accidente

Para los fines analíticos de este artículo, los datos de mayor interés resultaban ser los del primero de los tres archivos citados, en concreto los siguientes:

- Año del accidente
- Día del accidente
- Red a la que pertenece la carretera
- Nomenclatura de la carretera
- Punto kilométrico
- Punto hectométrico
- Zona
- Tipo de vía

- Fuera de intersección

La depuración de esta información resultó ser extremadamente laboriosa debido a los numerosos errores detectados y, también, a que tuvo que ser realizada manualmente debido a la falta de homogeneidad e inexactitud de los datos disponibles sobre los accidentes. A título de ejemplo, basta mencionar que a raíz del Plan de carreteras 1986-1993 se produjo una modificación de la nomenclatura de las Carreteras de la CAM y, como consecuencia de esta modificación, había carreteras que aparecían en la base de datos de la DGT con diferentes nomenclaturas, distintos orígenes kilométricos, etc. Además, como es sabido, los agentes de tráfico suelen cometer diversos errores al registrar los accidentes, produciéndose con ello un agravamiento de las dificultades derivadas de la modificación de la nomenclatura y origen de las carreteras o de la falta de precisión y carencia de hitos kilométricos y hectométricos.

Así, para la asignación de los accidentes de tráfico a los diferentes tramos donde se habían producido las actuaciones se utilizaron los planos de carreteras 1:25.000, delimitando en ellos los diferentes tramos, intersecciones, travesías, etc. En la realización de esta asignación se tuvieron en cuenta los puntos kilométricos y hectométricos, conjuntamente con el resto de la información tomada de la base de datos de la DGT, comprobando posteriormente si ésta concordaba con el P. K. del plano 1:25.000. En el caso de que un accidente no estuviera debidamente localizado, éste era rechazado y no se tenía en cuenta. Dicha asignación de los accidentes se realizó, allí donde fue posible, en todos y cada uno de los tramos de carretera de la CAM durante los años 1989, 1990 y 1991. De la misma forma, se imputaron los accidentes tanto durante el primer y segundo año anterior a la fecha de inicio de cada actuación como durante el primer y segundo año posterior a la fecha de terminación.

4. BASE DE DATOS

A raíz de lo dicho en el epígrafe anterior, se decidió llevar a cabo el acopio de toda la información mediante el diseño de un banco de datos *ad hoc* que permitiera el uso de dicha información de una manera rápida, sencilla y eficaz.

Para ello se decidió confeccionar una base de datos de la tramificación de las carreteras de la CAM en campo abierto, basada en la información disponible a partir de los Planes de Carreteras 1986-1993 y 1993-2001. En ella quedó excluida el área metropolitana de Madrid.

Este fichero automatizado incluía los siguientes campos:

- Nomenclatura del tramo de carretera
- Origen del tramo
- Destino del tramo
- Red a la que pertenece el tramo
- Número de calzadas
- Última nomenclatura conocida
- Nomenclatura anterior al Plan 1986-1993
- Longitud del tramo
- Ancho de calzada
- Ancho del arcén
- Ancho de plataforma
- Tipo de terreno
- IMD desde el año 1983 al año 1994
- Accidentes en el año 1989
- Accidentes en el año 1990
- Accidentes en el año 1991
- Tipo de actuación realizada en el tramo
- Código de la actuación
- Fecha de inicio de la actuación
- Fecha de terminación de la actuación
- Número de accidentes durante el primer y segundo año anterior a la fecha de inicio de la actuación
- Número de accidentes durante el primer y segundo año posterior a la fecha de terminación de la actuación

En el caso del número de accidentes durante el primer y segundo año anterior y posterior a las fechas de inicio y finalización de las actuaciones solamente se tuvieron en cuenta los accidentes producidos en tramos de carretera en campo abierto; es decir, se excluyeron los tramos de carreteras que coincidían con travesías urbanas. Tampoco se tuvieron en cuenta los

accidentes producidos en las intersecciones, con el fin de que las obras de *acondicionamiento de intersecciones* no afectarán al análisis que se iba a realizar posteriormente.

ANÁLISIS

En este apartado, en primer lugar, se realizará una clasificación de las carreteras de la Comunidad de Madrid en categorías homogéneas según la peligrosidad de las mismas a partir de la información disponible en el banco de datos. Esta tipología de carreteras se elaborará a través de un análisis de la varianza. Dicho análisis se lleva a cabo con objeto de reducir la variabilidad de la red desde el punto de vista de la peligrosidad, de manera que cuando se realice la evaluación de la efectividad de las actuaciones los grupos de referencia sean lo más homogéneos posibles. En segundo lugar, se llevará a cabo la aplicación de la metodología expuesta en los apartados anteriores. Asimismo, se realizará una comparación entre los valores numéricos de los *índices de peligrosidad* y los *índices de peligrosidad a largo plazo* estimados mediante el método empírico bayesiano. Por último se hará una discusión final sobre los resultados de la evaluación promedio en el conjunto de las actuaciones.

1. CLASIFICACIÓN DE LAS CARRETERAS DE LA COMUNIDAD DE MADRID SEGÚN LA PELIGROSIDAD

En la CAM las mayores intensidades de tráfico suelen estar distribuidas en las *redes principal, secundaria* y, a su vez, en las carreteras con distintas calzadas para cada sentido de circulación. Por otra parte, las menores intensidades de tráfico se registran en la *red local*. A la vista de dicha situación, se decidió hacer una clasificación previa para el análisis de la varianza en función del *número de calzadas* y de las *intensidades de tráfico*.

Por un lado, se tuvo en cuenta al conjunto de carreteras con dos calzadas y todas las intensidades de tráfico. Por otro lado, se consideró el grupo de carreteras con una sola calzada, pero éstas se subdividieron en tres *subcategorías* en función de su intensidad de tráfico. En la tabla 1 pueden verse las tres *subcategorías* de esta *clasificación previa*, donde están excluidas de la misma las carreteras de doble calzada.

| N° de Calzadas | IMD |
|----------------|-------------|
| UNA | < 1000 |
| | 1000 - 5000 |
| | > 5000 |

Tabla 1. Clasificación previa de las carreteras de la CAM.

Como se explicó en el apartado anterior, en la base de datos, las carreteras de la CAM estaban divididas por tramos con sus intensidades de tráfico y, además, se disponía del número de accidentes registrados en cada uno de dichos tramos desde el año 1989 al año 1991. Ello permitió calcular los *índices de peligrosidad* promedio correspondientes a los años 1989 a 1991 en cada uno de esos tramos. A continuación, después de haber efectuado el cálculo de los índices de peligrosidad y teniendo en cuenta la tabla 1, se realizó el *análisis de la varianza* para el período de tiempo correspondiente a los años 1989 a 1991. El resultado de dicho análisis fue que las tres categorías de la tabla 1 *no eran significativamente diferentes con un 99% de nivel de confianza* (tablas 2 y 3).

| GRUPOS | MEDIA | TRAMOS | VARIACIÓN |
|-------------|--------|--------|-----------|
| < 1000 | 0,6680 | 213 | 4,3127 |
| 1000 - 5000 | 0,4290 | 168 | 1,5729 |
| > 5000 | 0,3604 | 85 | 2,2333 |
| TOTAL | 0,5258 | 466 | 8,2090 |

Tabla 2. Medias de los índices de peligrosidad en la clasificación previa

| FRENTE DE VARIACIÓN | DESVIACIONES CUADRÁTICAS | GRADOS DE LIBERTAD | MEDIAS CUADRÁTICAS | F | F CRÍTICO |
|---------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|--------|-----------|
| INTERGRUPO | 8,2090 | 2 | 4,1045 | 4,1095 | 4,7865 |
| INTRAGRUPPO | 462,4396 | 463 | 0,9988 | | |
| TOTAL | 470,6486 | 465 | | | |

Tabla 3. Análisis de la varianza de la clasificación previa

Posteriormente, se aplicó el *test de Scheffé* para comprobar en qué grupos no radicaba la diferencia y se encontró que ésta no era *significativa* entre la categoría con intensidades de tráfico menores de 1000 v/d y la categoría de 1000 y 5000 v/d. Asimismo, tampoco se halló una diferencia *significativa* entre las categorías con intensidades de tráfico menores de 1000 v/d y superiores a 5000 v/d. Sin embargo, como puede observarse en la tabla 4, entre la categoría 1000-5000 v/d y la categoría > 5000 v/d se encontró que la diferencia entre ambas es todavía menos *significativa*, ya que el valor de *F* se aleja bastante del *valor crítico*.

| TEST DE SCHEFFÉ | F | F CRÍTICO |
|----------------------|--------|-----------|
| < 1000 / 1000 - 5000 | 2,6869 | 2,9957 |
| < 1000 / > 5000 | 2,8781 | 2,9957 |
| 1000 - 5000 / > 5000 | 0,1328 | 2,9957 |

Tabla 4. Test de Scheffé

En vista de estos resultados, se decidió agrupar las carreteras de una calzada con intensidades de tráfico ente 1000 y 5000 v/d y las carreteras con intensidades de tráfico superiores a 5000 v/d en una sola categoría, con lo cual resultó la tabla 5. A partir de esta última clasificación de las carreteras se procedió a realizar un segundo *análisis de la varianza* (tablas 6 y 7), observando que el efecto de las intensidades de tráfico era *significativo* en los tres años citados a un *nivel de significación* de un 1 %. A continuación, se aplicó de nuevo el *test de Scheffé* para contrastar la diferencia de medias entre los dos grupos, resultando ya la diferencia entre ellos *estadísticamente significativa*.

| Nº de Calzadas | IMD |
|----------------|--------|
| UNA | < 1000 |
| | > 1000 |

Tabla .5.- Clasificación definitiva de las carreteras de la CAM

A raíz de los resultados obtenidos en el último *análisis de la varianza*, se decidió adoptar como clasificación de las carreteras de una calzada de la Comunidad de Madrid la expuesta en

la tabla 5. Esta división de las carreteras de una calzada de la Comunidad de Madrid, en dos categorías *significativamente diferentes* desde el punto de vista de la accidentalidad, será utilizada en el siguiente capítulo para la agrupación de las actuaciones de *acondicionamiento* y *refuerzos de firme* con el fin de evaluar la efectividad de las mismas.

| GRUPOS | MEDIA | TRAMOS | VARIACIÓN |
|--------|--------|--------|-----------|
| < 1000 | 0,6680 | 213 | 4,3127 |
| > 1000 | 0,4060 | 253 | 3,6309 |
| TOTAL | 0,5258 | 466 | 7,9436 |

Tabla 6. Medias de los índices de peligrosidad en la clasificación definitiva

| FRENTE DE VARIACIÓN | DESVIACIONES CUADRÁTICAS | GRADOS DELIBERTAD | MEDIAS CUADRÁTICAS | F | F CRÍTICO |
|---------------------|--------------------------|-------------------|--------------------|--------|-----------|
| INTERGRUPO | 7,9436 | 1 | 7,9436 | 7,9658 | 6,8510 |
| INTRAGRUPO | 462,7050 | 464 | 0,9972 | | |
| TOTAL | 470,6486 | 465 | | | |

Tabla 7. Análisis de la varianza de la clasificación definitiva.

2. EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD A NIVEL INDIVIDUAL

2.1. Estimación de Los parámetros de la distribución a priori

Como es sabido, según se expresa en la ecuación 1, para evaluar la efectividad de las actuaciones a nivel individual se deben estimar los *índices de peligrosidad a largo plazo* antes y después de cada actuación. Para lograr esto, en primer lugar se estimaron los parámetros de las distribuciones *a priori* a partir de la muestra del *número de accidentes registrados* (N_i) y la *exposición al riesgo* (E_i) correspondientes a los primeros años antes y después de todas y cada una de las actuaciones ejecutadas en los tramos de carreteras pertenecientes a la misma categoría. En este trabajo, esta estimación de los parámetros se realizó empleando primero el método de los *momentos* a través del *método de la máxima verosimilitud*. En esta ocasión, con el fin de facilitar el cálculo numérico se hizo uso del

programa Mathcad plus 5.0, el cual permitió la resolución iterativa del sistema de ecuaciones 4. Los valores de estos parámetros se presentan en la tabla 8.

| Parámetros “a priori” | REFUERZOS | | ACONDICIONAMIENTOS | |
|--------------------------|-----------|---------|--------------------|---------|
| | ANTES | DESPUÉS | ANTES | DESPUÉS |
| α | 2,7771 | 2,1019 | 2,4980 | 1,7338 |
| ω | 7,5075 | 4,3468 | 3,9148 | 6,5793 |

Tabla 8. Valores de los parámetros de la distribución a priori

Aquí conviene aclarar que, desde el punto de vista estadístico, hubiera sido preferible realizar la estimación de una distribución a priori diferente para cada uno de los tramos antes y después de cada actuación. Así, dado que el número de actuaciones es igual a 75, se tendrían, en este caso, el mismo número de distribuciones a priori en vez de solamente una. La estimación de los parámetros de dichas distribuciones habría que hacerla teniendo en cuenta la experiencia de accidentes de la totalidad de emplazamientos de la misma categoría durante un año; es decir, tal y como se refleja en la tabla 6, en esta oportunidad el número de tramos sería igual a 253. Sin embargo, hay que considerar que para los fines propuestos en esta investigación, dadas las limitaciones en la información disponible, se hizo imposible la puesta en práctica de estas consideraciones debido al desmesurado trabajo que ello representaba. De todas formas, en futuras investigaciones, cuando ya se disponga de un banco de datos de accidentes con un número de años suficientes para realizar estos tipos de análisis, deberá tenerse en cuenta la totalidad de los emplazamientos de la misma categoría perteneciente a una red de carreteras. Una simplificación válida podría ser estimar solamente una distribución a priori por cada año en que se haya ejecutado una actuación. Así, en esta investigación se tendrían únicamente 10 distribuciones a priori en lugar de 75; es decir, una por cada año desde el año 1983 hasta el año 1992.

También hubiera sido más oportuno haber dividido los tramos donde fueron ejecutadas las actuaciones en emplazamientos de 1 km de longitud. No obstante, esto no fue posible llevarlo

a cabo ya que, al ser las carreteras de la CAM rurales y con bajas intensidades de tráfico, por una parte, en muchos casos carecen de postes kilométricos y hectométricos y, por otra parte, cuando sí existen, a veces éstos adolecen de falta de precisión y exactitud. Todo ello impidió muchas veces en esta investigación, localizar y delimitar el lugar exacto de la ocurrencia de los accidentes. Con lo cual, en esta ocasión, resultaba más apropiado utilizar emplazamientos formados por tramos de carreteras de diferentes longitudes (como se ha explicado anteriormente, dichos emplazamientos estaban delimitados generalmente por dos intersecciones o por dos travesías), donde era más fácil delimitar la zona de ocurrencia de accidentes. Asimismo, habría que tener en cuenta que el número de accidentes que se registran en estas carreteras es generalmente escaso y, por tanto, la desagregación de los emplazamientos en tramos de 1 km hubiera producido que, en una gran cantidad de los mismos, no se tuvieran registros de accidentes. Lo cual dificulta notablemente la evaluación. De todas formas, para análisis posteriores, sobre todos aquéllos que, en un futuro, se lleven a cabo en la RIGE, donde sí existe un mejor balizamiento y, además, las frecuencias de accidentes son considerablemente más elevadas, sería conveniente dividir los tramos de carreteras en longitudes de 1 km.

Una vez que se habían estimado los parámetros de las dos distribuciones *a priori* para antes y después de la ejecución de las actuaciones, a continuación teniendo en cuenta la fórmula 2, se estimaron los *índices de peligrosidad a largo plazo* en los períodos anterior y posterior a las actuaciones. Seguidamente, la efectividad de cada actuación se estimó mediante la ecuación 1. Después de haber evaluado la efectividad de las actuaciones en cada uno de los tramos de carretera, se comprobó, por último, si dicho valor de la efectividad era estadísticamente *significativo*; para ello se hizo uso de la fórmula 6. Por otra parte, se asumió que una actuación producía una reducción significativa del *índice de peligrosidad* cuando $P(\hat{\eta}_{Ai} < \hat{\eta}_{Di})$ era superior a 0,90; es decir, se tomó un *nivel de confianza* de un 90%.

2.2 Resultados de la significación estadística de la efectividad de las actuaciones de acondicionamiento

De las 75 actuaciones de *acondicionamiento* analizadas, 68 de ellas produjeron una reducción del *índice de peligrosidad a largo plazo*, observándose en las 7 restantes un incremento de ese indicador. A primera vista, se podría pensar que la mayoría de las actuaciones de *acondicionamiento* produjeron una mejora de la seguridad en la circulación. No obstante, cabe la duda de que tales resultados positivos entren dentro de la previsión de las variaciones debidas al azar, por lo que resulta necesario todavía descartar esta hipótesis contrastando los valores registrados mediante el recurso a la fórmula 6.

En la tabla 9 se presenta un resumen de los resultados obtenidos, tal y como se puede ver, de las 68 actuaciones que produjeron una disminución de la peligrosidad. Se confirma que en 44 tramos de carretera ese decremento es *significativo* al *nivel de confianza* del 90%. Por otra parte, de las 7 actuaciones restantes donde se registró un aumento del *índice de peligrosidad a largo plazo* en los tramos correspondientes, solamente se confirma como *significativo* dicho incremento en uno solo de esos tramos.

| Hipótesis | Actuaciones | Significativo al 90%. | No significativo al 90%. |
|------------------------|-------------|-----------------------|--------------------------|
| Disminución del índice | 68 | 44 | 24 |
| Incremento del índice | 7 | 1 | 6 |

Tabla 9. Resumen de los niveles de significación en acondicionamientos.

2.2 Resultados de la significación estadística de la efectividad de las actuaciones de refuerzo.

Por lo que se refiere a las actuaciones de *refuerzo de firmes*, del total de actuaciones de *refuerzo*, 43 de las mismas ocasionaron un aumento del *índice de peligrosidad a largo plazo* y 32 una disminución. El resumen de las dos tablas queda reflejado en la tabla 10. En ella puede observarse que de las 43 actuaciones que ocasionaron un incremento del *índice de*

peligrosidad a largo plazo, éste era *significativo* en sólo 13 de las mismas y de las 32 actuaciones que motivaron una disminución, ésta era *significativo* solamente en 12 de ellas. Aquí, no hay una mayoría clara de actuaciones que ocasionen un aumento o reducción *significativa* del *índice de peligrosidad a largo plazo*. Por lo tanto, es necesario sumar los efectos de cada una de las actuaciones para poder llegar a una conclusión sobre la efectividad en el conjunto de las actuaciones de *refuerzo de firmas*.

| Hipótesis | Actuaciones | Significativo al 90%. | No significativo al 90%. |
|------------------------|-------------|-----------------------|--------------------------|
| Disminución del índice | 32 | 12 | 20 |
| Incremento del índice | 43 | 13 | 30 |

Tabla 10. Resumen de los niveles de significación en *refuerzos*.

3. EVALUACIÓN EN EL CONJUNTO DE ACTUACIONES

En el apartado anterior se evaluó la efectividad de las actuaciones a nivel individual, es decir, se vio separadamente cual era la efectividad de cada actuación. Esto se lograba utilizando la metodología *bayesiana* para estimar el *índice de peligrosidad a largo plazo* en cada tramo de carretera tanto antes como después de cada actuación y evaluar, seguidamente, el cambio registrado en función de dichos *índices*. Se ha visto que, en el caso de los *acondicionamientos*, había una mayoría de actuaciones en las que, como consecuencia de las mismas, se producía una reducción *significativa* del *índice de peligrosidad a largo plazo* en el tramo correspondiente. Sin embargo, en los *refuerzos de firme* no se detectaba una mayoría de actuaciones que ocasionara un incremento o reducción *significativa* del índice citado. En consecuencia, para llegar a una conclusión estadísticamente significativa sobre la efectividad de estas actuaciones se hace necesario evaluarlas a nivel del conjunto de las actuaciones. Además, debe tenerse en cuenta que la efectividad de cada actuación o *factor de reducción de accidentes* es una variable aleatoria y, como su nombre indica, esta variable puede adoptar diferentes valores para cada una de las actuaciones.

Como se ha venido haciendo hasta ahora se van a exponer, en primer lugar, los resultados obtenidos para el caso de las actuaciones de *acondicionamiento* y, en segundo lugar, se expondrán los resultados de las actuaciones de *refuerzo de firmes* .

3.1. Resultado de la evaluación de la efectividad del conjunto de actuaciones de acondicionamiento

Para evaluar la efectividad del conjunto de actuaciones de *acondicionamiento* se utilizó la fórmula 7, dando como resultado, para el conjunto de las mismas, una efectividad igual a un 55,92% (tabla 11). Así, en la totalidad de actuaciones de *acondicionamiento* se tiene que la media del *índice de peligrosidad a largo plazo* , antes y después de dichas actuaciones de *acondicionamiento* es igual a 0,6759 y 0,2979 respectivamente. La estimación de la varianza de la muestra antes y después de las actuaciones da 0,1205 y 0,0287 respectivamente. El *coeficiente de correlación de Pearson* arroja un resultado de 0,3692, de lo que se deriva que las muestras son independientes. La covarianza por su parte es igual a 0,0217. El estadístico *t de Student* alcanza un valor de 8,456, siendo el *valor crítico* obtenido en la correspondiente tabla igual a 1,67. A la vista de estos resultados se puede concluir que la diferencia de las medias es *significativa* y que, por lo tanto, se puede considerar al conjunto de las actuaciones como efectivo en la reducción del *índice de peligrosidad a largo plazo* .

Por otro lado, al aplicar la fórmula 10 se tiene que el número de accidentes evitados al llegar a cabo la ejecución de estas actuaciones de *acondicionamiento* fue igual a 0,3275 accidentes por km-año (tabla 11)

3.2. Resultado de la evaluación de la efectividad del conjunto de actuaciones de refuerzo.

En tales actuaciones de *refuerzo de firmes* la media de los índices de peligrosidad a largo plazo, antes y después de las actuaciones, es 0,4063 y 0,4347 respectivamente. Así, se produjo un incremento del *índice de peligrosidad a largo plazo* en el conjunto de actuaciones; es decir, la efectividad evaluada es de un -6,99%. Repitiendo los pasos dados anteriormente, se obtiene una *t de Student* de -0,8737, siendo el *valor crítico* correspondiente igual a -1,67. Por

lo tanto, en este caso, se acepta la *hipótesis nula* de la igualdad de los *índices de peligrosidad a largo plazo* y, en consecuencia, a pesar del incremento del índice de peligrosidad a largo plazo medio, se puede concluir que las actuaciones de *refuerzo de firmes*, consideradas en su conjunto, no ocasionaron un incremento *significativo* del *índice de peligrosidad a largo plazo* en los tramos de carretera.

Por otra parte, al utilizar nuevamente la fórmula 10 se estimó el número de accidentes con víctimas evitados al ejecutar las actuaciones de refuerzos en -0,0485 accidentes por km-año (tabla 11).

| Actuación | Efectividad | Accidentes evitados por km-año | Significativo al 95%. |
|--------------------|-------------|--------------------------------|-----------------------|
| ACONDICIONAMIENTOS | 55,92% | 0,3275 | SI |
| REFUERZOS | -6,99% | -0,0485 | NO |

Tabla 11. Efectividad promedio de las actuaciones de acondicionamiento y refuerzo de firmes

CONSIDERACIONES FINALES SOBRE LOS RESULTADOS

A modo introducción, cabe recordar que las actuaciones de acondicionamiento y refuerzo de firmes no son, en sí mismas, actuaciones específicas de mejora de la seguridad en la circulación. Su ejecución, en la mayoría de los casos, se debe a otros objetivos diferentes a los de seguridad, tales como los de accesibilidad, ordenación del territorio, etc. En este artículo hubiera sido mucho más ilustrativo haber podido evaluar la efectividad de *actuaciones específicas de mejora de la seguridad en la circulación*. Pero, la elección de tales actuaciones de acondicionamiento y refuerzo viene forzada por la carencia de datos sobre *actuaciones específicas de mejora de la seguridad en la circulación* en el actual sistema de información de la CAM. Esta limitación que afecta al corpus de datos no invalida, ni mucho menos, las conclusiones y alcance operativo de un análisis comparativo de herramientas estadísticas que constituye el objeto fundamental de esta investigación.

Dicho esto, sólo resta hacer unas consideraciones finales acerca de los resultados de la efectividad promedio obtenida por ambos métodos y comprobar si estos resultados están en concordancia con los de otros estudios realizados anteriormente por otros investigadores.

En la tabla 11 queda reflejada la efectividad promedio de las actuaciones de acondicionamiento y refuerzo de firmes tomadas en su conjunto. Estos resultados expresan una efectividad promedio ya que, como se ha indicado, la efectividad de cada actuación a nivel individual es una variable aleatoria y, por lo tanto, los valores de la efectividad en los diferentes tramos de carretera son diferentes.

La efectividad promedio de las actuaciones de *acondicionamiento* es del orden de un 56%, cifra que resulta *significativa* a un *nivel de confianza* del 95%. Esto confirma la hipótesis tantas veces enunciada, pero rara vez verificada empíricamente, de que la mejora de las condiciones (geométricas, de señalización, etc.) de la carretera favorece significativamente y en términos generales la mejora de la seguridad en la circulación.

Volviendo a la efectividad de las actuaciones de *acondicionamiento* ejecutadas en la Comunidad de Madrid, hay que aclarar que este tipo de actuaciones engloba en realidad la combinación de varias actuaciones de naturaleza muy dispar: *ensanche de calzada, mejora de curvas, mejora de la señalización vertical y horizontal, refuerzo del firme, mejora de las barreras de seguridad*, etc. En esta investigación, no se pretendió analizar por separado dichas actuaciones, sino que se intentó evaluar la utilidad de una metodología que, por extensión, pudiera ser aplicada, si la información disponible lo permite, también en el caso de que tales actuaciones se hubieran ejecutado separadamente.

Con respecto a la efectividad promedio estimada en el conjunto de actuaciones, el resultado concuerda con lo que cabría esperar, ya que aquí se confirma en líneas generales el resultado al que llegaron otras investigaciones precedentes (Transportation Research Board, 1987; Sinha, 1985; Federal Highway Administration, 1982a y 1982b). Si bien algunos estudios se basan en herramientas de análisis diferentes (Zeeger et al, 1987), todos ellos confirman que

los distintos elementos del diseño de la carretera son factores que pueden ser controlados por los ingenieros de caminos. Por lo tanto, un buen diseño geométrico proporciona a los conductores unas condiciones de circulación e información que les permite detectar y evaluar conflictos, así como tomar las decisiones más oportunas para evitar peligros potenciales, con la consiguiente mejora de la seguridad en la circulación.

En lo que concierne a la evaluación de la efectividad promedio de los *refuerzos de firmes*, ésta resulta poco satisfactoria, dando en promedio como resultado un incremento de la peligrosidad en el conjunto de los tramos donde se realizan dichas actuaciones. Sin embargo, hay que puntualizar que este incremento de la peligrosidad no es *significativo* (al 95% del nivel de confianza) desde el punto de vista estadístico y, por lo tanto, puede ser atribuible al azar u otras causas diferentes al hecho de la ejecución de las actuaciones.

Como se sabe, existe una gran controversia sobre la efectividad de los *refuerzos de firme*, ya que mientras algunos autores opinan que mejoran la seguridad en la circulación, otros afirman lo contrario. La influencia del *refuerzo de firmes* sobre las condiciones de la seguridad en la circulación es el resultado de dos efectos contrapuestos: por un lado se mejora la calidad de la conducción al eliminar la rugosidad del firme, lo cual provoca que el conductor incremente la velocidad aumentando con ello el riesgo de accidentes; por otro, aumenta la resistencia del pavimento al deslizamiento, lo cual hace disminuir la distancia de parada a la vez que mejora la maniobrabilidad del vehículo cuando el pavimento está húmedo con lo cual cabría esperar una disminución del riesgo de accidentes (Transportation Research Board, 1987).

En el caso de los *refuerzos de firme* en las carreteras de la CAM, hay que considerar que estas actuaciones han sido realizadas en carreteras rurales, y no han ido acompañadas de ningún tipo de mejora geométrica. Por lo tanto, es posible que cuando las condiciones geométricas previas sean buenas, la actuación de *refuerzo* favorezca la seguridad en la circulación, debido a las razones expuestas anteriormente. Sin embargo, cuando las condiciones geométricas de partida son deficientes, posiblemente se disminuya la seguridad, ya que el conductor percibe

un riesgo menor que el real y tiende a incrementar la velocidad de conducción aconsejable produciéndose con ello un mayor número de accidentes.

Por último, en los refuerzos de firmes, para llegar a conclusiones más sólidas sobre estas hipótesis que se acaban de enunciar, se necesitaría una muestra de actuaciones mucho mayor de la que se ha utilizado para esta investigación, ya que como se ha visto con anterioridad, la evaluación de la efectividad no resulta *significativa* con la muestra empleada a los niveles de confianza con los que se ha venido operando.

CONCLUSIONES

- Es necesario crear un banco de datos que recopile e integre las informaciones relativas a las características geométricas, del tráfico y actuaciones ejecutadas en las carreteras de la Comunidad con los datos procedentes de los accidentes acaecidos en las mismas. La recogida sistemática y la automatización de estas informaciones permitiría realizar análisis rigurosos de seguridad vial. Ello facilitaría, la localización de *puntos negros*, la identificación de los *factores motivantes* de los accidentes y el proceso de evaluación de las actuaciones de mejora de la circulación. A partir de este banco de datos se podrían también desarrollar *modelos predictivos* que relacionaran los diferentes parámetros o variables explicativas de las características de las carreteras con el *número de accidentes* o el *índice de peligrosidad*.
- En este artículo se demuestra la viabilidad de la aplicación del *método empírico bayesiano* a la evaluación de la efectividad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación. En este caso, la evaluación de la efectividad se basa en la comparación del *índice de peligrosidad a largo plazo* antes y después de las actuaciones. La estimación de este *índice de peligrosidad a largo plazo* resulta matemáticamente siempre más compleja que la estimación del *índice de peligrosidad* utilizado en el método clásico.

Sin embargo, dicha complejidad presenta como contrapartida la ventaja de neutralizar los efectos negativos inherentes al fenómeno de *regresión a la media*.

- Este artículo constata también que la gran mayoría de las *actuaciones de acondicionamiento* realizadas en la Comunidad de Madrid en el período 1985 a 1993 resultaron realmente *efectivas*, desde el punto de vista estadístico, como medidas que contribuyeron a la reducción de la peligrosidad de los tramos de carretera donde fueron ejecutadas.
- La aplicación de estos métodos a la evaluación de la efectividad en la reducción de la peligrosidad en las *actuaciones de refuerzo de firme* realizadas en la Comunidad de Madrid en el período 1985 a 1993 dio como resultado que, en la mayoría de los casos, la efectividad o no efectividad de dichas actuaciones, consideradas éstas individualmente, no era significativa. Por lo tanto, desde un punto de vista estadístico, se puede concluir que estas *actuaciones de refuerzo de firme* apenas tuvieron incidencia en la mejora o empeoramiento de la seguridad en la circulación. Aunque, consideradas en su conjunto, se observa una tendencia que, sin ser significativa, parece indicar que tales actuaciones suelen incrementar la peligrosidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBESS, C., JARRETT, D., y WRIGHT, C. C. (1981). *Accidents at blackspots: estimating the effectiveness of remedial treatment, with special reference to the 'regression-to-mean' effect*. Traffic Engineering and Control, Vol. 22, nº 10.
- BERGER, J. O. (1985). *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis*. 2ª edición, Springer-Verlag, New York.
- COMUNIDAD DE MADRID (1994). *Plan de Carreteras 1994-2001*. Consejería de Transportes, Dirección General de Carreteras.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. (1982a). *Synthesis of Safety Research Related to Traffic Control and Roadway Elements - Volume 1*. Report nº FHWA-TS-82-232.

- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1982b). *Synthesis of Safety Research Related to Traffic Control and Roadway Elements - Volume 2*. Report nº FHWA-TS-82-233.
- HAUER, E. (1986). *On the Estimation of the Expected Number of Accidents*. Accident Analysis and Prevention, Vol. 18, nº 1.
- HIGLE, J. L., y WITKOWSKI, J. M. (1988). *Bayesian Identification of Hazardous Locations*. Transportation Research Record, nº 1185.
- MARITZ, J. S., y LWIN, T. (1989). *Empirical Bayes Methods*. Segunda Edición, Chapman y Hall.
- PARDILLO MAYORA, J. M. (1995a). *Desarrollo de una Metodología de Planificación y Evaluación de Actuaciones de Mejora de la Seguridad en la Circulación con aplicación de las Técnicas de Análisis Estadístico Bayesiano*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- PÉREZ PÉREZ, Ignacio (1996). *Evaluación de la efectividad de las actuaciones en carreteras sobre la accidentalidad. Aplicación al caso de la Comunidad de Madrid*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, E.T.E. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- RAIFFA, H., y SCHLAIFER, R. (1961). *Applied Statistical Decision Theory*. Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University, Boston.
- SNEDECOR, G. W., y COCHRAN, W. G. (1989). *Statistical Methods*. 8ª Edición, Iowa State University Press/Ames.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. (1987). *STATE OF THE ART REPORT 6. Relationship Between Safety and Key Highway Features. A Synthesis of Prior Research*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C.
- ZEGEER, C. V., HUMMER, J., REINFURT, D., HERF, L., y HUNTER, W. (1987). *Safety Effects of Cross-section Design for Two-Lane Roads. Volume I. Final Report*. Federal Highway Administration, Report nº FHWA-RD-87/008.