

Impacto de seguridad vial de actuaciones en carreteras rurales convencionales

Ignacio Pérez Pérez

Profesor Titular de Universidad

Universidade da Coruña. E. T. S. I. Caminos, Campus de Elviña, 15071 A Coruña

Abstract

This article presents an evaluation of the safety impacts of four engineering treatments implemented in the Autonomous Community of Madrid (Spain): *highway upgrading*; updating and improvement of *traffic signing*; repainting of *pavement markings* and *pavement resurfacings*. This evaluation was carried out using the *Empirical Bayes Method* with a comparison group. The functioning of a methodology to test the significance of the safety impact is described. The results show that highway upgrading has a positive and significant safety impact, while the updating and improvement of traffic signing, the repainting of road markings and pavement resurfacings do not exhibit a significant impact on safety.

Keywords: Evaluation, Engineering treatments, Safety impact, Empirical Bayes Method, Significance Test.

Resumen

Este artículo presenta una evaluación del impacto de seguridad vial de cuatro actuaciones de ingeniería ejecutadas en la Comunidad Autónoma de Madrid: acondicionamiento de carreteras; mejora de la señalización vertical; repintado de marcas viales y refuerzo de firmes. Esta evaluación se realizó utilizando el Método Empírico Bayesiano mediante un grupo de comparación. Se describe la metodología utilizada para contrastar el nivel de significación del impacto de seguridad vial. Los resultados muestran que el acondicionamiento de carreteras tiene un impacto positivo y significativo, mientras que la mejora de la señalización vertical, el repintado de marcas viales y el refuerzo de firmes no producen un impacto significativo sobre la seguridad vial.

Palabras clave: Evaluación, Actuaciones, Impacto de seguridad vial, Método Empírico Bayesiano, Contraste de significación.

Impacto de seguridad vial de actuaciones en carreteras rurales convencionales

Ignacio Pérez Pérez

Profesor Titular de Universidad

Universidade da Coruña. E. T. S. I. Caminos, Campus de Elviña, 15071 A Coruña

1. Introducción

La evaluación de las actuaciones de seguridad vial se considera una parte importante de la gestión de la seguridad vial. El propósito principal de esta evaluación es estimar el impacto de seguridad que producen las actuaciones (Pérez 1996). En España en las carreteras convencionales en campo abierto se realizan frecuentemente cuatro actuaciones: acondicionamientos de carreteras; mejora de la señalización vertical; repintado de marcas viales y refuerzo de firmes. En general los proyectos de acondicionamiento de carreteras son equivalentes a aquéllos denominados en **USA** como **RRR** (*Resurfacing, Restoration and Rehabilitation*) (Transportation Research Board, 1987). Según Cleveland (1987), los impactos de seguridad vial de los proyectos **RRR** varían entre un 21% y un 90%. También los resultados publicados sobre el impacto de seguridad vial de la mejora de la señalización vertical son variables. Por ejemplo, según Llamas (1998), la *Federal Highway Administration* (**FHWA**) establece que la mejora de la señalización vertical tiene un impacto de un 16%; mientras el *Transportation Road Laboratory* (**TRL**) ofrece una cifra de un 30%. Con respecto a las marcas viales, Al-Masaeid *et al* (1994) han publicado diversos estudios realizados para la **FHWA** donde los valores fluctúan entre un -13% y un 35%. En lo que concierne a los refuerzos de carreteras, se pueden distinguir dos casos muy diferentes. Así, se ha probado que el refuerzo rutinario de firmes en carreteras rurales reduce los accidentes producidos con tiempo húmedo o lluvioso -el número de accidentes en superficie de rodadura húmeda disminuye entre un 15% y un 70%. En contraste, el refuerzo rutinario de firmes en carreteras rurales incrementa el número total de los accidentes alrededor de un 10% (Cleveland, 1987).

El objetivo de este artículo es evaluar los impactos de seguridad vial de estas cuatro actuaciones en carreteras convencionales de la red de carreteras de la Comunidad Autónoma de Madrid (**CAM**), por medio de estudios “antes y después”, empleando un grupo de comparación. El *Método Empírico Bayesiano* (**MEB**) se utiliza

conjuntamente con un procedimiento estadístico que permite la verificación de la significación de los impactos de seguridad vial.

2. Metodología

2.1 Estimación del número esperado de accidentes

El número esperado de accidentes con víctimas ψ_{ijt} se utilizará como el indicador del nivel de seguridad de los emplazamientos de carretera. Éste se define como la media de las frecuencias de accidentes que se espera que se produzcan en el emplazamiento t durante un período de años, con la condición de que sus características físicas no se modifiquen durante dicho período. Diversos investigadores han propuesto utilizar el **MEB** para predecir el número esperado de accidentes en un emplazamiento perteneciente a una red de carreteras (Leotsarakos, 1988; Al-Masaeid, 1990; Hauer, 1997). Se ha demostrado que ψ_{ijt} se puede estimar mediante (Abbess et al, 1981):

$$\psi_{ijt} = (\alpha_{ijt} + N_{ijt}) / (\omega_{ijt} + y) \quad (1)$$

donde α_{ijt} y ω_{ijt} = Parámetros “*a priori*” de una distribución del tipo Gamma. En cada emplazamiento t , el número esperado de accidentes depende de la información “*a priori*” y de los datos registrados. La información “*a priori*” se puede interpretar como la observación de α_{ijt} accidentes en ω_{ijt} años en el emplazamiento t . Los datos registrados representan N_{ijt} accidentes en y años en el emplazamiento t . Además, la probabilidad de registrar un número de accidentes N en un conjunto de emplazamientos similares se puede modelar mediante una *distribución binomial negativa*. Por consiguiente, los parámetros α_{ijt} y ω_{ijt} se pueden estimar ajustando una *distribución binomial negativa* a una muestra de los accidentes acaecidos en un grupo de emplazamientos de las mismas características (Maritz and Lwin, 1989).

2.2 Evaluación

El promedio del número esperado de accidentes en un grupo de emplazamientos ($\bar{\psi}_{ij}$) se obtiene por medio de la expresión:

$$\bar{\psi}_{ij} = \sum_{t=1}^{n_{ij}} \psi_{ijt} / n_{ij} \quad (2)$$

De esta manera, el impacto de seguridad $S(\%)$ se evalúa como una función de cuatro promedios (Council et al, 1980):

$$S(\%) = [1 - (\bar{\psi}_{12} / \bar{\psi}_{11}) / (\bar{\psi}_{22} / \bar{\psi}_{21})] \cdot 100 \quad (3)$$

donde $\bar{\psi}_{ij}$ = Promedio de ψ_{ijt} : en el grupo tratado ($i=1$), en el grupo de comparación ($i=2$); en el período “antes” ($j=1$), en el período “después” ($j=2$). n_{ij} = Número de emplazamientos.

2.3 Significación estadística

Para determinar si el impacto $S(\%)$ es significativo se propone un “*Modelo factorial de dos factores*” (Sahai and Ageel, 2000):

$$\psi_{ijt} = \mu + v_i + \beta_j + v\beta_{ij} + \xi_{ijt} \quad (4)$$

donde μ = constante; v_i = efecto sobre el número esperado de accidentes debido al nivel i del factor **A**; β_j = efecto sobre el número esperado de accidentes debido al j del factor **B**; $(v\beta)_{ij}$ = efecto sobre el número esperado de accidentes debido a los niveles i y j de los factores **A** y **B** respectivamente y ξ_{ijt} = error de los datos.

Por consiguiente, en esta clase de modelos se asume que cada factor tiene dos niveles. El factor **A** tiene los niveles $i=1$ = grupo de tratamiento e $i=2$ = grupo de comparación. El factor **B** tiene dos niveles $j=1$ = periodo “antes” y $j=2$ = periodo “después”. Es decir, ψ_{ijt} se puede modelar teniendo en cuenta los efectos del factor **A**, factor **B** y de la interacción entre ambos factores $(v\beta)_{ij}$. El impacto de seguridad $S(\%)$ se considera nulo cuando $v\beta_{ij}$ no es significativo. En consecuencia, es muy importante clarificar si $v\beta_{ij}$ es significativo o no lo es. En este sentido, se proponen los dos pasos siguientes:

1. Con el fin de confirmar si $v\beta_{ij}$ es significativo, contrastar su efecto sobre el modelo factorial de dos factores.
2. Sí se prueba que $v\beta_{ij}$ es significativo, utilizar otro esquema con niveles independientes. Este esquema se realizará con el fin de confirmar si las actuaciones tienen un impacto $S(\%)$ positivo (o negativo)

2.3.1 Confirmar si el efecto interacción es significativo

En la figura 1a se muestra el caso cuando $v\beta_{ij}$ no es significativo. Los períodos “antes” y “después” se representan en el eje de abscisas y $\bar{\psi}_{ij}$ en el eje de ordenadas. Hay dos líneas rectas- la línea de trazos es

el grupo de tratamiento y la línea continua es el grupo de comparación. Las dos líneas rectas paralelas tienen la misma variación temporal. Esto significa que $SI(\%)$ es igual a cero. Por otro lado, en la figura 1b hay evidencia de que el efecto interacción podría ser significativo. Las dos líneas rectas no son paralelas y, por consiguiente, no tienen la misma variación temporal, un hecho que resulta en un $SI(\%)$ que podría ser positivo o negativo. Aún así, todavía no se ha probado que $v\beta_{ij}$ sea significativo. Con este propósito se utilizará el contraste de hipótesis siguiente (Vilar, 2001; (Sahai and Ageel, 2000)):

$$\begin{cases} H_0^{AB} = (v\beta)_{11} - (v\beta)_{12} - (v\beta)_{21} + (v\beta)_{22} = 0 \\ H_1^{AB} = (v\beta)_{11} - (v\beta)_{12} - (v\beta)_{21} + (v\beta)_{22} \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

donde H_0^{AB} = Hipótesis nula, es decir, $v\beta_{ij}$ es cero. H_1^{AB} = Hipótesis alternativa, es decir, $v\beta_{ij}$ es diferente de cero. $v\beta_{ij}$ = Efecto interacción: en el grupo de tratamiento ($i=1$), en el grupo de comparación ($i=2$); en el período “antes” ($j=1$), en el período “después” ($j=2$). Además, para llevar a cabo este contraste se utilizan muestras iguales: $n_{ij} = r$ = Numero de emplazamientos para cada uno de los niveles cruzados de los factores. Para hacer el contraste de hipótesis anterior se utilizará la técnica de *análisis de la varianza*. En particular, la hipótesis nula H_0^{AB} debe ser rechazada cuando (Vilar, 2001):

$$\hat{F} = (ABss/Rss) > F_{1,4(r-1),\alpha} \quad (6)$$

donde α se toma igual a 0.05 para una distribución **F** de **Fisher** con un *grado de libertad* en el numerador y $4(r-1)$ *grado de libertad* en el denominador. Rss es la *suma de los cuadrados de los residuos* del modelo de dos factores. Se puede calcular mediante:

$$Rss = (1/4r - 4) \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{t=1}^r (\psi_{ijt} - \bar{\psi}_{ij.})^2 \quad (7)$$

y, $ABss$ es la *suma de los cuadrados de la interacción*:

$$ABss = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 r (\bar{\psi}_{ij.} - \bar{\psi}_{i..} - \bar{\psi}_{.j.} + \bar{\psi}_{...})^2 \quad (8)$$

donde $\bar{\psi}_{i..}$ = Promedios de los números esperados de accidentes para el nivel i del factor **A**. Hay dos promedios: nivel $i=1$ (en el grupo de tratamiento, períodos “antes” y “después”); y nivel $i=2$ (en el grupo de comparación, períodos “antes” y “después”). $\bar{\psi}_{.j.}$ = Promedios de los números esperados de accidentes para el

nivel j del factor **B**. Hay dos promedios: nivel $j=1$ (en el periodo “antes”, grupo de tratamiento y grupo de comparación); y nivel $j=2$ (en el periodo “después”, grupo de tratamiento y grupo de comparación). $\bar{\psi} \dots =$ Promedio conjunto de los números esperados de accidentes para todos los niveles (en este caso cuatro niveles).

2.3.2 Confirmar sí existe un impacto de seguridad positivo o negativo

Como es lógico, cuando $\nu\beta_{ij}$ es significativo $S(\%)$ nunca será igual a cero, teniendo que adoptar o bien un valor positivo o bien un valor negativo. Para confirmar este valor (positivo o negativo) es preferible utilizar el diagrama presentado en la figura 1c, en la que se observan cuatro niveles independientes que ofrecen todas las combinaciones de factores. En este sentido, se propone usar el denominado “*modelo de un único factor*” (Sahai and Ageel, 2000):

$$\Psi_{ijt} = \mu + \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \xi_{it} \quad (9)$$

donde $\mu =$ constante; $\tau_1 =$ efecto sobre el número esperado de accidentes debido al nivel $i=1$ (en el grupo de tratamiento y periodo “antes”); $\tau_2 =$ efecto sobre el número esperado de accidentes debido al nivel $i=2$ (en el grupo de tratamiento y periodo “después”); $\tau_3 =$ efecto sobre el número esperado de accidentes debido al nivel $i=3$ (en el grupo de comparación y periodo “antes”); $\tau_4 =$ efecto sobre el número esperado de accidentes debido al nivel $i=4$ (en el grupo de comparación y periodo “después”) y $\xi_{it} =$ error de los datos.

En este tipo de modelo, para confirmar sí realmente $S(\%)$ es un significativo valor positivo (o negativo) se utiliza el siguiente contraste de hipótesis (Vilar, 2001):

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0 : \sum_{i=1}^4 b_i \tau_i = 0 \\ H_1 : \sum_{i=1}^4 b_i \tau_i \neq 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

donde $H_0 =$ Hipótesis nula, es decir, tiene un valor positivo (o negativo) significativo y $H_1 =$ Hipótesis alternativa, es decir, no tiene un valor positivo (o negativo) significativo con $b_i =$ Coeficientes que cumplen $\sum_i^4 b_i = 0$ y $\tau_i =$ Efecto sobre el número esperado de accidentes debido al nivel i . En esta ocasión,

H_0 se rechaza cuando cumple la siguiente regla de decisión: (Vilar, 2001):

$$\hat{t} = \left(\sum_{i=1}^4 b_i \bar{\psi}_i \right) / \sqrt{mRss \sum_{i=1}^4 \frac{b_i^2}{r}} > t_{(4r-4), \alpha / 2} \quad (11)$$

donde α es igual a 0.05 para una distribución t de **Student** con $(4r-4)$ *grados de libertad*. La media de la suma residual de los cuadrados ($mRss$) se calcula mediante:

$$mRss = \sum_{i=1}^4 \sum_{t=1}^r (\psi_{it} - \bar{\psi}_i)^2 / (4r - 4) \quad (12)$$

donde ψ_{it} = Número esperado de accidentes en el nivel i , en el emplazamiento t . $\bar{\psi}_i$ = Promedios de los ψ_{it} en cada nivel i . En la Figura 1c, el punto 2 se toma como una referencia para determinar donde está situado $\bar{\psi}_i$. De esta manera se contrastan las hipótesis siguientes (Vilar, 2001):

$$H_0^1 : -1\tau_1 + 1\tau_2 + 0\tau_3 + 0\tau_4 = 0 \quad (13)$$

$$H_0^2 : 0\tau_1 + 1\tau_2 - 1\tau_3 + 0\tau_4 = 0 \quad (14)$$

$$H_0^3 : 0\tau_1 + 1\tau_2 + 0\tau_3 - 1\tau_4 = 0 \quad (15)$$

H_0^1 sitúa al punto 1 (período “antes” en el grupo de tratamiento) en relación con el punto 2 (período “después” en el grupo de tratamiento). Si el resultado del contraste es negativo y significativo, el punto 1 está por encima del punto 2. H_0^2 sitúa al punto 3 (período “antes” en el grupo de comparación) en relación con el punto 2. Si el resultado del contraste es negativo y significativo, el punto 3 está por encima del punto 2. H_0^3 sitúa al punto 4 (período “después” en el grupo de comparación) en relación con el punto 2. Si el resultado del contraste es negativo y significativo, el punto 4 está situado por encima del punto 2. Finalmente, hay que tener en cuenta que cada uno de los contrastes anteriores se considera estadísticamente significativo cuando los estimadores de la t de **Student** cumplen la regla de decisión (ecuación 10). Dependiendo de la posición relativa de los puntos descritos previamente, es posible confirmar sí $S(\%)$ es positivo (o negativo).

3. Categorización

3.1 Base de datos

Para categorizar las carreteras se deben obtener datos de la infraestructura viaria, de los accidentes de tráfico y de las intensidades de tráfico (**IMD**). Los datos de las actuaciones, intensidades de tráfico e infraestructura viaria fueron proporcionados por la Comunidad Autónoma de Madrid (**CAM**). Los datos de accidentes se

obtuvieron en los archivos informáticos centrales de la Dirección General de Tráfico (**DGT**). Se creó una base de datos de las secciones de carreteras rurales de la **CAM**. Se utilizó la información disponible en el Plan de Carreteras 1986-1993 (Comunidad Autónoma de Madrid, 1994). La red de carreteras de la **CAM** se dividió en secciones que compartieran características físicas, geométricas, y de tráfico. Estas secciones eran de un kilómetro de longitud.

3.2 Análisis de la varianza

Se hizo una clasificación de las carreteras para llevar a cabo un *análisis de la varianza* con el fin de reducir la variabilidad desde el punto de vista del número de accidentes. El número de kilómetros de carreteras rurales era igual a 2457. Solamente había 120 kilómetros de carreteras con calzadas separadas. Las restantes eran carreteras rurales convencionales de dos carriles: 1098 secciones con una **IMD** < 1000 y 1239 secciones con una **IMD** ≥ 1000. Se obtuvo una diferencia significativa del número de accidentes, con un 95 % del nivel de confianza.

Los datos disponibles en las carreteras rurales convencionales con una **IMD** < 1000 fueron desechados. Se extrajo de la base de datos, en la categoría de las carreteras rurales convencionales con una **IMD** ≥ 1000, la siguiente información: 75 acondicionamientos de carreteras, 6 mejoras de la señalización vertical, 26 repintados de marcas viales y 75 refuerzos de firmes.

4. Proceso de evaluación

4.1 Selección de los emplazamientos

Las actuaciones fueron ejecutadas en un período de tiempo que transcurría desde el año 1986 hasta el año 1993. Lógicamente, en la red de carreteras de la **CAM**, en tan largo período de tiempo, existió una *tendencia temporal* de la accidentalidad. Con el propósito de solventar este problema las secciones de carretera que recibieron las actuaciones entre los años 1986 y 1989 fueron utilizadas como el grupo de tratamiento; y, las secciones que recibieron las actuaciones entre los años 1990 y 1993 como el grupo de comparación (figura 2). En este sentido, los emplazamientos seleccionados para la evaluación fueron los siguientes (tabla 1):

- **Acondicionamiento de carreteras.** Se hizo una selección aleatoria de 50 secciones para el grupo de tratamiento y 50 secciones para el grupo de comparación.

- **Señalización vertical.** Se tomaron directamente 15 secciones para el grupo de tratamiento y 15 secciones para el grupo de comparación.
- **Marcas viales.** Se hizo una selección aleatoria de 50 secciones para el grupo de tratamiento y 50 secciones para el grupo de comparación.
- **Refuerzos de firmes.** Se hizo una selección aleatoria de 50 secciones para el grupo de tratamiento y 50 secciones para el grupo de comparación. Después, también se tomaron 20 secciones donde al menos se había producido un accidente por deslizamiento sobre superficie mojada o húmeda durante el período anterior a la fecha de la ejecución. La mitad de esas secciones se utilizaron como emplazamientos tratados y la otra mitad como emplazamientos de comparación.

4.2 Estimación del número esperado de accidentes

Se utilizó el *método de los momentos* (Al-Maseid, 1990) para ajustar la *distribución binomial negativa* al número de accidentes (N), en el conjunto emplazamientos similares de la red de carreteras de la **CAM**, durante un período de un año.

En cada período “antes” la distribución fue ajustada exactamente en el tercer año previo a la fecha de inicio de la ejecución de la actuación. En cada período “después” la distribución fue ajustada en el año siguiente a la fecha de terminación de la ejecución. Cada sección del grupo de tratamiento tenía la misma fecha de inicio y terminación que otra sección del grupo de comparación (Figura 2). Por consiguiente, en ambos tipos de secciones: $\alpha_{11t} = \alpha_{21t}$; $\omega_{11t} = \omega_{21t}$; $\alpha_{12t} = \alpha_{22t}$; $\omega_{12t} = \omega_{22t}$ (tabla 1), (figura 2).

A continuación, para estimar ψ_{jt} se aplicó la ecuación 1. En cada una de las secciones (grupo de tratamiento o comparación), se extrajo de la base de datos el número de accidentes registrados (N_{ijt}) durante los períodos “antes” y “después”, comprendiendo dos años de duración ($y=2$) (figura 2). Además, se asumió que N_{ijt} era directamente proporcional a la **IMD**. En este sentido, se observó que cuando los volúmenes de tráfico eran relativamente bajos, la hipótesis de proporcionalidad directa constituía una aproximación bastante razonable. Por tanto, si en cada emplazamiento existen unos períodos específicos con sus **IMD** “antes” y “después”, el posible efecto producido por la variación de la **IMD** (antes y después de la actuación) se tendrá en cuenta, separadamente, en cada sección aplicando un factor de corrección. Este factor de corrección C_{ijt} es igual a

Q_{i2t} / Q_{i1t} ; donde Q_{i2t} es el volumen de tráfico en el período “después” y Q_{i1t} en el periodo “antes”. Por consiguiente, el número corregido de accidentes en el periodo “antes” se obtiene multiplicando N_{i1t} por C_{i1t} .

4.3 Evaluación del impacto de seguridad y contraste de significación

Una vez que se ha obtenido ψ_{ijt} en cada una de las secciones, se calcula $\bar{\psi}_{ij}$ aplicando la ecuación 2. Después, se utiliza la ecuación 3 para obtener el impacto $S(\%)$ de las actuaciones. Finalmente, se contrasta la significación estadística de $S(\%)$ (Ecuaciones 6 y 11).

5. Resultados

5.1 Acondicionamiento de carreteras

Tanto en el grupo de tratamiento como en el grupo de comparación, se ajustaron cinco *distribuciones binomiales negativas a priori* al número de accidentes (M), en cada período “antes” y “después” (ver parámetros en la tabla 1). En todos los casos hubo un ajuste muy bueno entre las distribuciones reales y teóricas. Por ejemplo, la figura 3 refleja el caso correspondiente a los parámetros *a priori*: $\alpha_{i1} = 0.9073$ y $\beta_{i1} = 1.7829$. Las sumas de los números esperados de accidentes se muestran en la tabla 1. El número esperado de accidentes promedio está reflejado en la tabla 2. A partir de estos resultados, se compararon los accidentes “antes” y “después” en las secciones tratadas y sin tratar, dando lugar a un $S(\%)$ positivo de un 32.77%.

En la figura 4 aparentemente existe una interacción entre las dos líneas rectas. No obstante, se realizó el contraste **F** de **Fisher** para verificar si ésta es realmente significativa. Los cálculos dieron lugar a un valor de la **ABSS** igual a 0.2748 y una **RSS** igual a 0.0227. El estimador \hat{F} fue igual a 12.0837 ($P_{\text{valor}} = 0.0006$). Este último valor es mayor que el crítico $F_{(1,196),0.05}$. Por esta razón se rechazó la hipótesis nula consistente en que las dos líneas rectas son paralelas. Por consiguiente, el efecto interacción es significativo, aunque todavía no ha sido comprobado si tiene una influencia positiva. Para determinar esto se realizó el contraste de la **t** de **Student**. En este caso, el valor de la **mRSS** era igual a 0.0227. La tabla 2 también presenta el promedio de los valores de los números esperados accidentes ($\bar{\psi}_i$) en el caso de niveles independientes. Además, la figura 4 muestra el esquema verificado por medio de las hipótesis 13, 14 y 15. En este caso, los resultados fueron los siguientes:

- Al verificar las hipótesis de la ecuación 13 el estimador obtenido \hat{t}_1 fue igual a -5.9016 ($P_{\text{valor}}=0.0000$) (tabla 2), un valor negativo mayor en valor absoluto que $t_{(196),\alpha/2}$. Esto significa que el punto 1 está situado por encima del punto 2.
- Al verificar la hipótesis de la ecuación 14 el estimador obtenido \hat{t}_2 fue igual a -3.7821 ($P_{\text{valor}}=0.0002$), un valor negativo mayor en valor absoluto que $t_{(196),\alpha/2}$. Esto significa que el punto 3 está situado por encima del punto 2. El punto 3 está situado por debajo del punto 1.
- Al verificar la hipótesis de la ecuación 15 el estimador \hat{t}_3 era igual a -2.7966 ($P_{\text{valor}}=0.0057$), un valor negativo mayor en valor absoluto que $t_{(196),\alpha/2}$. Esto significa que el punto 4 está situado por encima del punto 2. El punto 4 está situado por debajo del punto 3 y del punto 1.

Además, la magnitud de los valores de los estimadores dan una idea de cuánto están alejados los puntos 1, 3 y 4 del punto 2. Estos resultados confirman la figura 4 donde está claro que el punto 1 es el más alejado del 2, seguido del punto 3. El punto 4 es el más cercano. En consecuencia, se puede confirmar definitivamente que las dos rectas no son paralelas y que $S(\%)$ es significativo y positivo.

5.2 Señalización vertical

Se encontró un buen ajuste de las dos distribuciones *a priori* en cada período “antes” y “después” (tabla 1). Se obtuvo un valor positivo de $S(\%)$ igual al 10.73% (tabla 2). El valor de la $ABSS$ fue igual a 0.0045 y el de la RSS a 0.0197, dando lugar a un estimador \hat{F} igual a 0.2307 ($P_{\text{valor}}=0.6329$). Este último valor es menor en valor absoluto que el crítico $F_{(1,56),0.05}$. Por consiguiente, no fue rechazada la hipótesis nula consistente en que las dos líneas rectas de la figura 5 son paralelas. Las actuaciones de señalización vertical no tuvieron un $S(\%)$ significativo.

5.3 Marcas viales

Se ajustaron cinco distribuciones *a priori* en cada período “antes” y “después” (tabla 1). Se encontró un buen ajuste entre las distribuciones reales y teóricas. Se obtuvo un valor positivo de $S(\%)$ igual al 13.63%. El valor de la $ABSS$ fue igual a 0.0171 y el de la RSS igual a 0.0102, dando lugar a un estimador \hat{F} igual a 1.6489 ($P_{\text{valor}}=0.1958$). Este último valor es menor que el crítico $F_{(1,56),0.05}$. No fue rechazada la hipótesis nula consistente en que las dos líneas rectas de la figura 6 son paralelas. Se puede confirmar que el repintado de marcas viales no produjo un $S(\%)$ significativo.

5.4 Refuerzo de firmes

5.4.1 Secciones con accidentes producidos con climatología lluviosa y seca

En las cinco distribuciones *a priori* en cada período “antes” y “después” (tabla 1) se observó un buen ajuste. Se obtuvo un valor negativo de $S(\%)$ igual al -2.12% (tabla 2).

En la figura 7a se observa que, tanto en el grupo de emplazamientos tratados como en el grupo de emplazamientos que sirven de comparación, los accidentes se incrementaron en los períodos “después”. Esto quiere decir que, aunque no se hubieran ejecutado los refuerzos de firmes, de todas maneras se hubiera incrementado en estas secciones el promedio de los números esperados de accidentes. Pero es necesario determinar si existe una diferencia significativa entre los incrementos de ambos grupos. En este sentido, se realizó el contraste de la F de **Fisher** para confirmar si el efecto interacción de la figura 7a es nulo. Los valores de la $ABSS$ y de la RSS fueron 0.0005 y 0.0156 respectivamente; lo cual originó un estimador \hat{F} igual a 0.0310 ($P_{\text{valor}}=0.8604$). Este último valor es menor que el crítico obtenido para $F_{(1,196),0.05}$. Por consiguiente, se rechazó la hipótesis nula. Esto quiere decir que el impacto $S(\%)$ no es significativo.

5.4.2 Secciones con accidentes con climatología solamente lluviosa

Se ajustaron tres distribuciones *a priori* en cada período “antes” y “después” (tabla 1). Se observó un buen ajuste. En este caso, se obtuvo un valor positivo de $S(\%)$ igual al 36.37% (tabla 2, figura 7b). Los valores de la $ABSS$ y de la RSS fueron 0.0188 y 0.0559 respectivamente. El estimador \hat{F} arrojó un valor igual a 0.3365 ($P_{\text{valor}}=0.5655$). Este último resultado es menor que el crítico con $F_{(1,36),0.05}$. Por tanto, no se rechazó la hipótesis nula. Esto quiere decir que $S(\%)$ no es significativo.

6. Discusión de los resultados

Las actuaciones de *acondicionamiento de carreteras* produjeron un impacto de seguridad vial positivo y significativo del 33%. No obstante, éstas no fueron concebidas dentro de un plan de seguridad vial específicamente orientado hacia la eliminación de accidentes. En este sentido, a pesar de que, en muchas secciones de carreteras, había problemas de seguridad vial, las actuaciones fueron concebidas, preferentemente, hacia la mejora del nivel de servicio y la puesta a punto de los estándares del diseño geométrico. Aún así, es lógico que se produzca en el conjunto de las secciones (donde en muchas había

problemas de seguridad vial) un impacto positivo cuando se mejoran, al mismo tiempo, las características superficiales y geométricas, así como la señalización horizontal y vertical. En este sentido, el impacto de seguridad vial está dentro del rango del 21 al 90% obtenido en **USA** en los proyectos **RRR** (Transportation Research Board, 1987; Cleveland, 1987).

La evaluación del impacto de seguridad de la *señalización vertical* (11%) y de las *marcas viales* (14%) ha sido positiva aunque no significativa. Aquí, ni la mejora de la señalización vertical ni el repintado de marcas viales fueron programadas dentro de un plan exclusivamente elaborado con la intención de eliminar *puntos negros* o *tramos de concentración de accidentes*. No obstante, es razonable que tuvieran un impacto positivo, ya que tiene como objetivo principal el incremento de la seguridad, eficacia y comodidad de la circulación. Por consiguiente, los impactos de ambas actuaciones están en consonancia con otros estudios realizados previamente por la **FHWA** y el **TRL** (Al-Masaeid, 1994; Llamas, 1998).

En general, en este artículo se han corroborado los resultados de otros estudios basados en herramientas de análisis diferentes (Vogt and Baret, 1998; Thighe et al, 2000; Zhang and Ivan, 2005). Todos ellos confirman que los distintos elementos utilizados en el proyecto de carreteras son factores que los ingenieros pueden controlar. Por esta razón, un buen diseño geométrico así como una buena señalización vertical y horizontal proporcionan a los conductores unas condiciones de circulación que les permiten detectar y evaluar conflictos. Por consiguiente, pueden tomar las mejores decisiones y evitar posibles peligros y, en consecuencia, mejora la seguridad de la circulación vial.

Por otro lado, cuando se tuvieron en cuenta los accidentes producidos con climatología seca y lluviosa (húmeda), el impacto de seguridad de los *refuerzos de firmes* produjo un valor negativo y no significativo de un -2%. Por el contrario, cuando sólo se tuvieron en cuenta los accidentes por deslizamiento sobre superficie húmeda, se obtuvo un impacto positivo y no significativo del 36%. Estas cifras están en consonancia con otros estudios realizados previamente (Cleveland, 1987).

El impacto de seguridad vial de las actuaciones de refuerzos de firmes es un tema controvertido. Algunos autores argumentan que estas actuaciones mejoran la seguridad de la circulación vial; otros mantienen una opinión opuesta. De acuerdo con algunos investigadores, los refuerzos de firmes afectan a la seguridad de dos formas diferentes. Una vez que las irregularidades que existían en la capa de rodadura antigua han sido

eliminadas se mejora la comodidad de la conducción. Como consecuencia, los conductores aumentan la velocidad y, también, se incrementa el riesgo de accidentes. A la vez, otro efecto de esta actuación es que se incrementa el coeficiente de rozamiento, por lo que disminuye la distancia de frenado. Así, se mejora la conducción de vehículos sobre superficie húmeda y baja el riesgo de accidentes (Transportation Research Board, 1987; Cleveland, 1987).

En este caso, los refuerzos de firmes fueron realizados, principalmente, con el objetivo de mejorar la capacidad estructural del firme. Estos refuerzos fueron ejecutados en tramos enteros de carreteras y no fueron llevados a cabo en emplazamientos como, por ejemplo, curvas o intersecciones, donde generalmente se realizan actuaciones de corta longitud para mejorar la resistencia al deslizamiento. Es decir, estas actuaciones no fueron programadas en respuesta a la necesidad de eliminar accidentes sobre superficie húmeda. Prueba de ello es que las capas de rodaduras no fueron realizadas con mezclas bituminosas diseñadas para mejorar la resistencia al deslizamiento de los vehículos, sino con mezclas densas. Además, no coincidieron con ninguna mejora geométrica. Por consiguiente, es posible que cuando existe un buen diseño geométrico, los refuerzos de firmes son beneficiosos para la seguridad de la circulación vial, por las razones mencionadas arriba. Si, por el contrario, existe un diseño geométrico de partida no satisfactorio, estas actuaciones podrían ir en contra de la seguridad. Los conductores no se dan cuenta del riesgo, rebasando la velocidad recomendada, pudiéndose producir accidentes.

7. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas en las carreteras rurales convencionales de la red de carreteras de la **CAM** se pueden resumir de la forma siguiente:

- Cuando se realizaron *acondicionamiento de carreteras* el impacto de seguridad vial de estas actuaciones fue de un 33%, siendo un valor significativo. Por consiguiente, los acondicionamientos de carreteras tuvieron un impacto de seguridad vial positivo y significativo.
- Cuando se lleva a cabo un programa de actuaciones de acondicionamiento planificado para mejorar los estándares de diseño, se produce una mejora de la seguridad vial. En consecuencia, la combinación del efecto de la rehabilitación estructural del firme con los efectos de otras mejoras (alineación vertical y

horizontal, características laterales, señalización vertical, marcas viales) tuvo un impacto sobre la seguridad vial positivo y significativo.

- El impacto de seguridad vial de la mejora de la señalización vertical fue de un 11%, siendo un valor no significativo. Por consiguiente, la mejora de la señalización vertical tuvo un efecto positivo sobre la seguridad vial, pero no significativo.
- El impacto de seguridad vial del repintado de marcas viales en mal estado de mantenimiento fue de un 14%, Este valor no es significativo. Por consiguiente, el repintado de marcas viales tuvo un efecto positivo sobre la seguridad vial, pero no significativo.
- El impacto de seguridad vial de refuerzos de firmes sobre las secciones de carretera con accidentes producidos con climatología seca y húmeda fue de un -2% y sobre las secciones con accidentes producidos con climatología solamente húmeda de un 36%. Estos valores no son significativos.
- Cuando se lleva a cabo un programa de refuerzos de firmes que no está orientado hacia la prevención de accidentes, sino que se ejecuta con el sólo propósito de rehabilitar estructuralmente el firme, no se produce una mejora de la seguridad de la circulación vial.

Este trabajo muestra la dificultad de evaluar el impacto producido por las actuaciones de seguridad vial ejecutadas a lo largo de un período de tiempo dilatado. Esto hace difícil controlar el efecto producido por la tendencia temporal de accidentes a lo largo de dicho período. Aún así, en este artículo se ha empleado un procedimiento donde, por medio del uso de un grupo de comparación por etapas, ha sido posible evaluar el impacto de seguridad vial de las actuaciones.

También, este artículo ha confirmado la implementación de un procedimiento sencillo, basado en los principios del diseño experimental, para contrastar el nivel de significación del impacto de seguridad vial de las actuaciones.

Por último, debe decirse que existe la necesidad de desarrollar un método de evaluación que permita estimar el impacto de las actuaciones de seguridad vial, ya que en ausencia del mismo la utilización de emplazamientos de comparación ha sido necesaria.

8. Referencias

- ABBESS, C. ET AL., 1981. Accidents at black spots: estimating the effectiveness of remedial treatment, with special reference to the regression-to-mean effect. *Traffic Engineering and Control*. Vol. 22, no. 10, 535-542.
- AL-MASAEID, H. R., 1990. Bayesian Approach to the Estimation of Expected Number of Accidents. A Thesis Submitted to the Faculty of Purdue University in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.
- AL-MASAEID, H. R. and SINHA, K. C., 1994. Analysis of Accident Reductions Potentials of Pavement Markings. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 120, n° 5, 723-737.
- CLEVELAND, D. E., 1987. Effect of Resurfacing on Highway Safety. Relation between Safety and Key Highway Features. State of the Art Report 6, Transportation Research Board, Washington, DC.
- COMUNIDAD DE MADRID, 1994. Plan de Carreteras 1994-2001. Consejería de Transportes, Dirección General de Carreteras. España.
- COUNCIL, F. L. ET AL., 1980. Accident Research Manual. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC.
- HAUER, E., 1997. Observational Before-After Studies in Road Safety. Estimating the effect of highway and traffic engineering measures on road safety. Pergamon.
- LEOTSARAKOS, C., 1988. A comparative Statistical Analysis of Traffic Accidents in Highway construction Zones. Dissertation presented in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of the Ohio State University.
- LLAMAS RUBIO, D. R., 1998. Eficacia y Rentabilidad de las Medidas de Bajo Coste. In: IV Jornadas de Seguridad Vial. Santander, España, pp. 331-346.
- MARITZ, J. S., and LWIN, T., 1989. Empirical Bayes Methods. Second Edition, Chapman y Hall.
- PÉREZ, I., 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.
- SAHAI, H., AGEEL, M. I., 2000. The Analysis of Variance. Fixed, Random and Mixed Models. Birkhäuser. Berlin.
- TIGHE, S., and LI, N., COWE, L., and HAAS, R. (2000). Incorporating Road Safety into Pavement Management. Transportation Research Record 1699. TRB. National Research Council. Washington, D.C.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 1987. Special Report 214. Designing Safer Roads. Practices for Resurfacing Restoration, and Rehabilitation. National Research Council. Washington, D. C.
- VILAR FERNÁNDEZ, J. A., 2001. Diseño y análisis de experimentos. Curso de postgrado en estadística aplicada. Universidade da Coruña.
- VOGHT, A and BARET, J (1998). Accident Models for Two-lane rural Segments and Intersections. Transportation Research Record 1635. National Research Council, Washington, D.C.
- ZHANG, C., and IVAN, J. (2005). Effects of Geometric Characteristics on Head-on Crash Incidence on Two-Lane Roads in Connecticut. Transportation Research Board 84th Annual Meeting, January 2005. CD ROM.

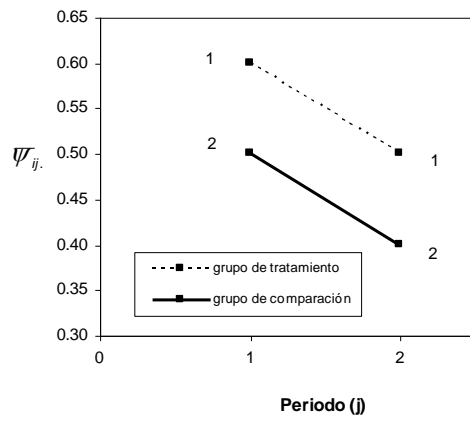
Tabla 1. Parámetros de la distribución a priori y número total de accidentes

Actuaciones	Secciones	A priori parámetros				Numero de accidentes registrado				Numero de accidentes esperado/año			
		Antes $j=1$		Después $j=2$		Grupo de tratamiento		Grupo de comparación		Grupo de tratamiento		Grupo de comparación	
		α_{11t}	ω_{11t}	α_{2t}	ω_{2t}	ΣN_{11t}	ΣN_{12t}	ΣN_{21t}	ΣN_{22t}	$\Sigma \psi_{11t}$	$\Sigma \psi_{12t}$	$\Sigma \psi_{21t}$	$\Sigma \psi_{22t}$
Acondicionamiento de carreteras	10	0.9073	1.7829	0.8832	1.8586	5.3660	1.0000	10.0989	7.0000	3.8169	2.5481	5.0680	4.1030
	8	0.9255	1.6645	0.9001	1.5555	6.8106	3.0000	5.3855	5.0000	3.8790	2.8690	3.4901	3.4315
	11	0.9443	1.8112	0.9747	1.8114	10.7860	2.0000	7.4264	5.0000	5.5555	3.3378	4.6740	4.1249
	13	0.9213	1.7765	0.9100	1.7519	12.9549	2.0000	1.3342	5.0000	6.6018	3.6861	3.5247	4.4857
	8	0.9125	1.6789	0.9898	1.8975	6.6120	1.0000	6.2345	3.0000	3.7816	2.2882	3.6790	2.8014
	$n_j=50$									23.6349	14.7293	20.4359	18.9466
Señalización vertical	10	0.8000	1.7500	0.8500	1.9500	3.3324	4.0000	7.1834	7.0000	3.0220	3.1646	4.0489	3.9241
	5	0.7998	1.7502	0.8400	1.9300	5.0000	1.0000	2.0392	1.0000	2.3996	1.3232	1.6101	1.3232
	$n_j=15$									5.4216	4.4877	5.6590	5.2472
Marcas viales	11	0.9764	1.8500	0.7412	1.8992	2.2500	1.0000	3.2576	2.0000	3.3741	2.3475	3.6358	2.6039
	6	0.8887	1.4312	0.9956	1.7778	1.1532	0.0000	1.0521	2.0000	1.8901	1.5812	1.8607	2.1106
	12	0.7315	1.8256	0.8765	1.8112	1.3871	0.0000	1.0705	1.0000	2.6571	2.7598	2.5744	3.0221
	14	0.9001	1.8642	0.7575	1.9256	2.5252	3.0000	0.0000	2.0000	3.9145	3.4657	3.2611	3.2110
	7	0.9854	1.9995	0.7548	1.7500	1.1467	0.0000	0.0000	1.0000	2.0114	1.4090	1.7247	1.6756
	$n_j=50$									13.8473	11.5631	13.0566	12.6233
Refuerzos en tiempo seco y húmedo	16	0.8989	1.6565	0.7800	1.9565	2.0498	6.0000	2.2868	4.0000	4.4940	4.6708	4.5588	4.1653
	2	0.9005	1.7548	0.8754	1.6666	0.0000	2.0000	1.1675	0.0000	0.4797	1.0230	0.7906	0.4775
	3	0.7780	1.9020	0.6798	1.8000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.5982	0.5367	0.5982	0.7998
	21	0.8880	1.6007	0.9898	1.8987	4.0053	4.0000	3.7161	5.0000	6.2914	6.3575	6.2110	6.6139
	8	0.9998	1.9905	0.9425	1.8723	2.2312	2.0000	1.2054	3.0000	2.5635	2.4637	2.3064	2.7219
	$n_j=50$									14.4266	15.0515	14.4650	14.7785
Refuerzos en tiempo húmedo	3	0.0392	0.3514	0.0350	0.5418	1.0249	1.0000	1.1434	1.0000	0.4859	0.4347	0.5363	0.4347
	4	0.0356	0.3100	0.0362	0.5112	2.6702	2.0000	2.4774	2.0000	1.2176	0.8541	1.1341	0.8541
	3	0.0412	0.3615	0.0389	0.5004	2.2312	0.0000	1.2054	1.0000	0.9972	0.0467	0.5628	0.4466
	$n_j=10$									2.7006	1.3355	2.2332	1.7354

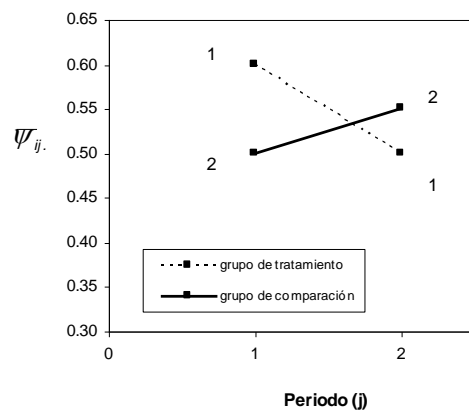
Tabla 2. Impacto de seguridad vial de las actuaciones

Indicador		Acondicionamiento de carreteras	Señalización vertical	Marcas viales	Refuerzos de firmes	
					Tiempo seco y húmedo	Accidentes en tiempo húmedo
$\bar{\psi}_{11}$	$\bar{\psi}_1$	0.4726	0.3614	0.2769	0.2885	0.2701
$\bar{\psi}_{12}$	$\bar{\psi}_2$	0.2946	0.2992	0.2313	0.3010	0.1335
$\bar{\psi}_{21}$	$\bar{\psi}_3$	0.4087	0.3773	0.2611	0.2893	0.2233
$\bar{\psi}_{22}$	$\bar{\psi}_4$	0.3789	0.3498	0.2525	0.2956	0.1735
$SI(\%)$		32.77	10.73	13.63	-2.12	36.37
n_{ij}		50	15	50	50	10
\hat{F} (Pvalor)		12.0837 (0.0006)	0.2307 (0.6329)	1.6489 (0.1958)	0.0310 (0.8604)	0.3365 (0.5655)
\hat{t}_1 (Pvalor)		-5.9016 (0.0000)	----	----	----	----
\hat{t}_2 (Pvalor)		-3.7821 (0.0002)	----	----	----	----
\hat{t}_3 (Pvalor)		-2.7966 (0.0057)	----	----	----	----
Significativo		SI	NO	NO	NO	NO

a. Interacción no significativa



b. Interacción significativa



c. Esquema con cuatro niveles independientes

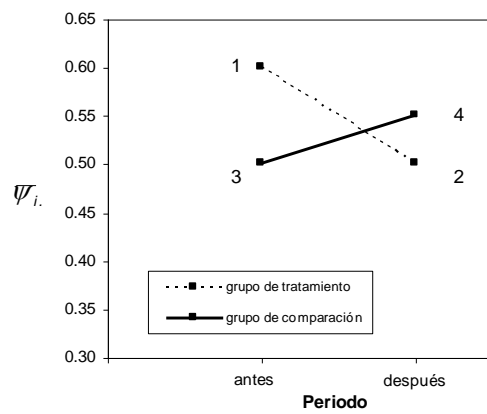


Figura 1. Ejemplos

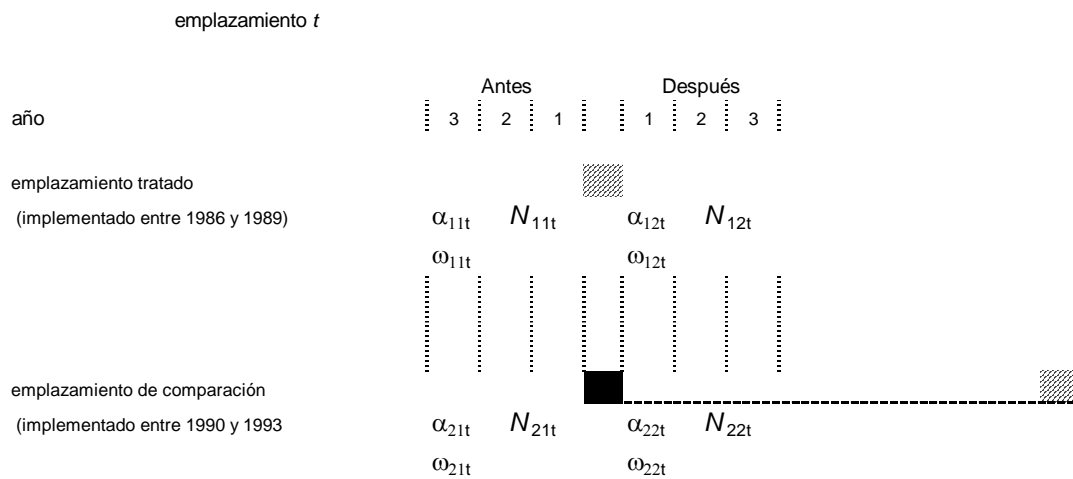


Figura 2. Periodos para la estimación de los parámetros a priori en los períodos “antes” y “después” en cada emplazamiento

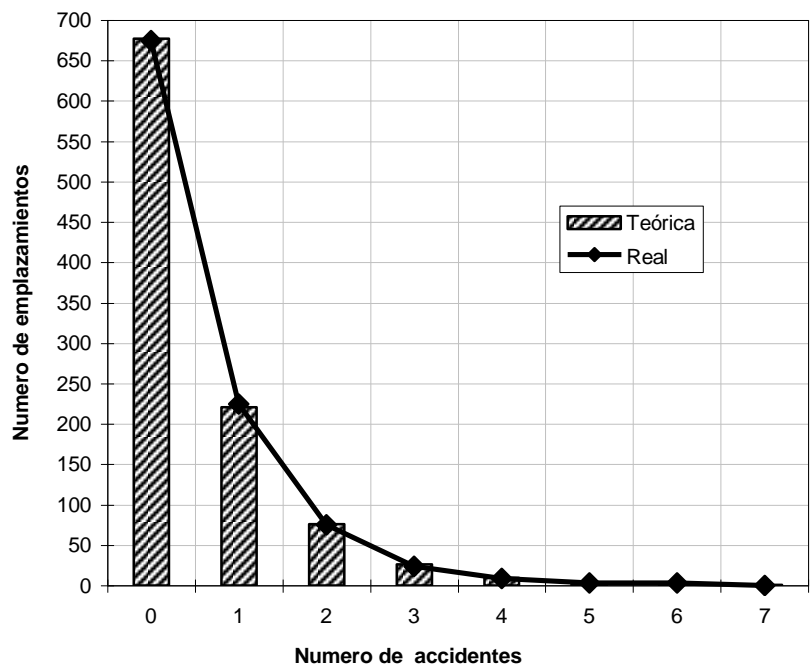


Figura 3. Frecuencia de accidentes real y teórica para el acondicionamiento de carreteras

$$\alpha_{i1} = 0.9073 \text{ and } \beta_{i1} = 1.7829$$

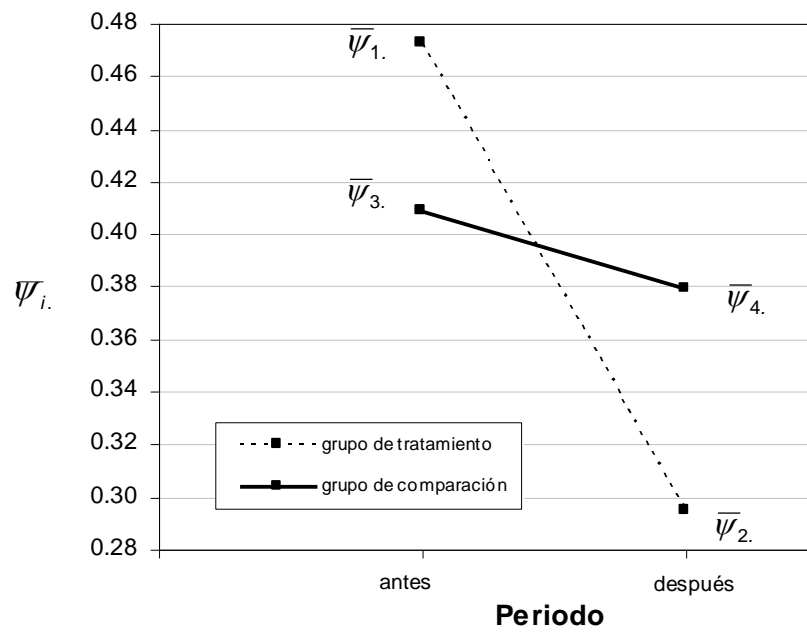


Figura 4. Acondicionamiento de carreteras

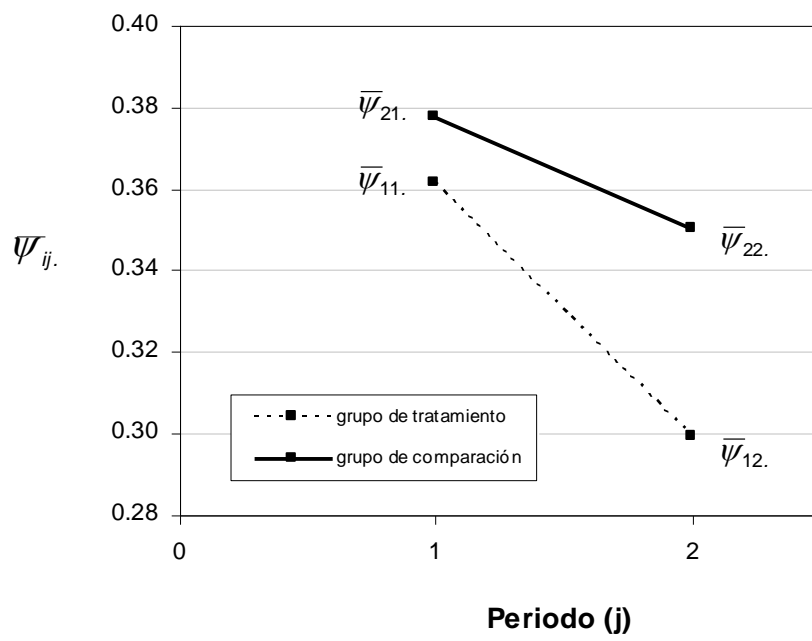


Figura 5. Señalización vertical

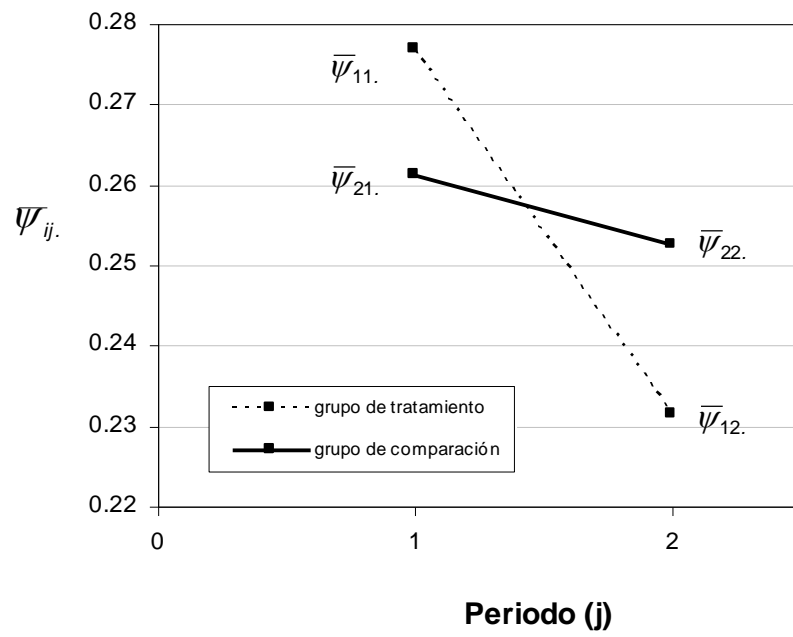
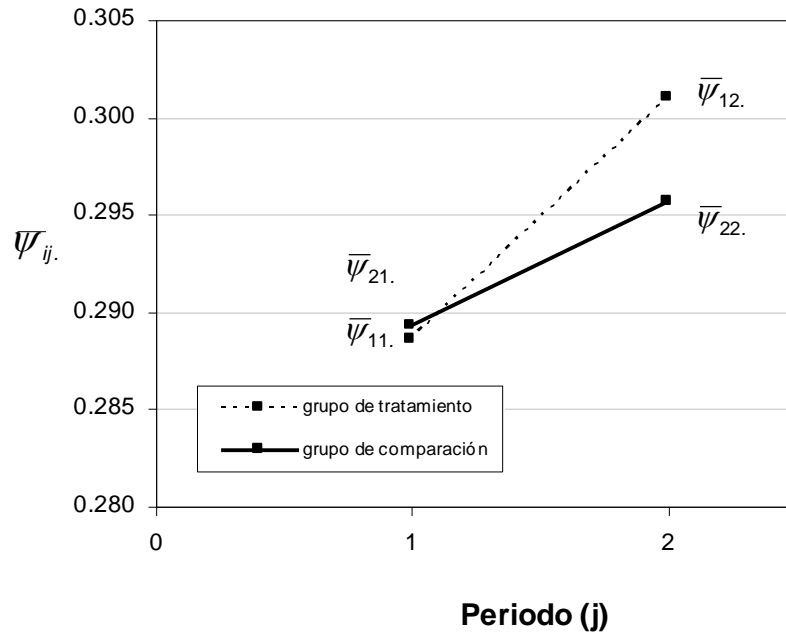


Figure 6. Marcas viales

a. Tiempo seco y húmedo



b. Tiempo húmedo

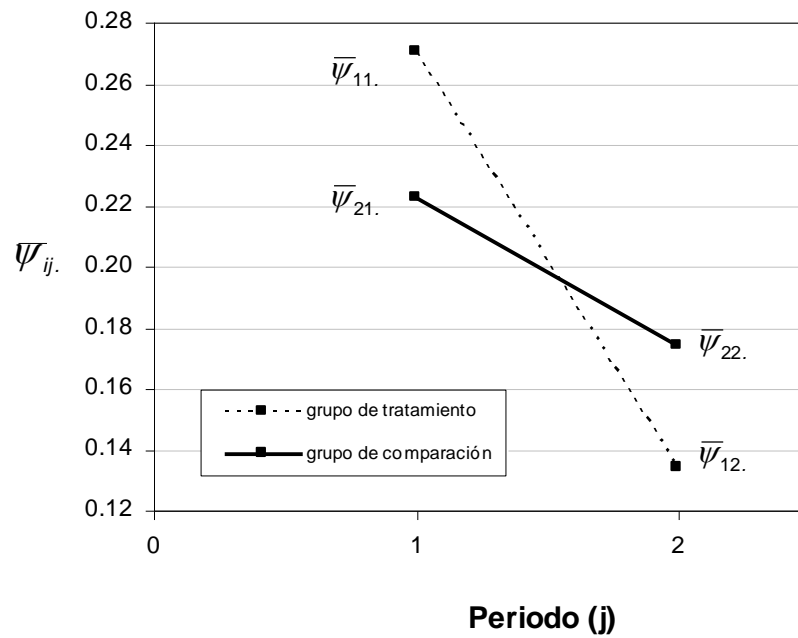


Figura 7. Refuerzo de firmes