

## **Análisis de variables que influyen la accidentalidad ciclista: desarrollo de modelos y diseño de una herramienta de ayuda**

**Ricardo Galán<sup>1</sup>, Marcos Calle<sup>2</sup>, José Manuel García<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Agua y Estructuras, S.A. (Ayesa) Avda. Marie Curie, 2, 41092. Sevilla. rgalan@ayesa.es

<sup>2</sup> Instituto Andaluz de Tecnología, c/ Leonardo da Vinci, 2, 41092. Sevilla. mcalle@iat.es

<sup>3</sup> Universidad de Sevilla, ESI, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092. Sevilla. jmgs@esi.us.es

**Keywords:** Modelos, accidentalidad, bicicleta

### **1. Introducción**

En los últimos años el uso de la bicicleta ha experimentado un aumento en el número total de usuarios y hoy en día se reconoce su importancia como deporte, práctica familiar y como modo de transporte en la ciudad. Existen distintos tipos de usuarios de bicicleta, que se pueden agrupar en: niños y jóvenes, ciclistas recreativos, ciclistas urbanos, cicloturistas y ciclistas deportivos.

Por otra parte, el ciclista recreativo u ocasional generalmente circula en bicicleta con la intención de practicar un deporte de intensidad moderada o una actividad recreativa, mientras que el ciclista urbano utiliza la bicicleta para desplazarse por la ciudad, para ir a trabajar, desplazarse a lugares de ocio, o simplemente para pasear.

Aunque la bicicleta es muy poco utilizada como medio de transporte en España, su incidencia en el número de víctimas por accidente de tráfico sigue siendo considerable. En zona urbana hay mayor número de accidentes de tráfico en los que se ven implicados ciclistas, aunque la gravedad de éstos es menor que la gravedad de los accidentes que tienen lugar en carretera, ya que la velocidad a la que circulan el resto de vehículos con los que comparten la vía los ciclistas, es más elevada en el caso de las carreteras.

Desde el punto de vista ambiental, la bicicleta no emite ningún contaminante, con lo que su uso generalizado revierte directamente sobre la calidad del aire y la salud de los ciudadanos. Las emisiones de CO<sub>2</sub> son nulas, con lo que se convierte en un poderoso y económico instrumento de lucha contra el cambio climático.

Por último, la bicicleta es el medio de transporte individual que menos espacio urbano consume. El automóvil, por el contrario es el modo de movilidad más devorador de espacio público, espacio del que hemos de vernos privados para su disfrute para la vida diaria en la ciudad. La bicicleta está en el subconsciente de los ciudadanos como un elemento agradable asociado a una ciudad habitable que irremediablemente hemos perdido. Una mayoría de ciudadanos la usarían en sus desplazamientos si hubiese una infraestructura segura y coherente y unos entornos agradables.

El presente artículo trata del estudio de las variables que son causas de accidentalidad en usuarios de bicicletas, con objeto de disminuirla y así aumentar el número de personas que la utilicen como medio de transporte. Para ello, se ha realizado una investigación sobre dichas variables, se han desarrollado modelos probabilísticos de las mismas para cuantificarlas y modelos de prospección que puedan evaluar la accidentalidad al variar el número de usuarios

de bicicletas. Tras esta investigación, y con objeto de ayudar a las instituciones que gestionan infraestructuras por donde circulan bicicletas, se ha desarrollado una herramienta Web de ayuda a la toma de decisiones de accidentes. Esta herramienta está basada en un sistema de geolocalización, de forma que se pueda localizar rápidamente puntos de accidentalidad e información relevante. La inclusión de información sobre accidentes da lugar a la localización geográfica de puntos de elevada accidentalidad. El sistema de ayuda a la decisión es capaz de proporcionar al decisor un conjunto de medidas que pueden reducir o anular el factor de riesgo que provoca los accidentes.

En los siguientes apartados se expone la identificación del problema, que justifica la investigación realizada y la necesidad de realizar un análisis de los factores que influyen en la accidentalidad ciclista, que es el objeto del apartado 3. Posteriormente, en el apartado 4, se describen los tres modelos realizados. En el apartado 5 se describe el desarrollo informático llevado a cabo para geolocalizar accidentes e implementar los modelos. Por último, las principales conclusiones se muestran en el apartado 6.

## **2. Identificación del problema**

La bicicleta tiene consideración de vehículo de pleno derecho en la legislación de tráfico de todos los países de la Unión Europea, así como en los convenios internacionales en esta materia (Amics de la Bici, 2003).

El uso de la bicicleta se promueve en la mayoría de los países de nuestro entorno europeo por sus efectos positivos sobre el tráfico y la calidad de vida en las ciudades (ruido, contaminación atmosférica, atascos), para fomentar el turismo respetuoso con el medio ambiente y por ser un vehículo de muy bajo riesgo debido a su reducida masa y velocidad. España ocupa el último lugar en cuanto al uso de la bicicleta por persona y año en los países de la Unión Europea, según datos del año 2000 de la propia Unión Europea.

Uno de los principales obstáculos que se encuentra la bicicleta para convertirse de modo habitual de transporte está relacionado con las graves consecuencias de su accidentalidad. El fomento del uso de la bicicleta pasa por el desarrollo de métodos que reduzcan dicha accidentalidad. Para ello es necesario un conocimiento de las variables que causan accidentes y su cuantificación y prospección mediante modelos matemáticos.

Los motivos de la accidentalidad ciclista son variados, contribuyendo a ella una mezcla complicada de factores, como la geometría de las vías, las velocidades de circulación, el comportamiento de los ciclistas y de los automovilistas, etc. La influencia de cada uno de estos factores de forma individual o colectiva tiene una difícil comprensión y tratamiento, siendo este el principal motivo de la no existencia en España de ningún estudio actualizado sobre este tipo de accidentalidad. De igual forma, tampoco existe ningún sistema de monitorización de accidentes de ciclistas ni de apoyo a la decisión para reducir las causas que los generan.

Existen diversos estudios, como el realizado por la Dirección de Programas de Investigación de Accidentes de la DGT (1997), que analizó los accidentes ciclistas ocurridos en la Comunidad de Madrid durante los años 1993 a 1996. Otro estudio, este realizado por el BACC (Bicicleta Club de Cataluña) para la Federación Catalana de Ciclismo, aporta datos interesantes sobre la accidentalidad ciclista y cómo reducirla. Uno de los más actuales es el estudio del Centro Zaragoza que con el apoyo de la DGT analiza las características y las causas más frecuentes de los accidentes en los que se ven implicados los ciclistas. Quizás el más interesante sea el estudio realizado por la Universidad Politécnica de Valencia por encargo de la Comisión por la Seguridad Vial del Ciclista de la Federación de Ciclismo de la Comunidad

Valenciana, a partir de los datos proporcionados por la DGT durante el período 1996–2001 y presentado en septiembre de 2003.

Pese a todo, faltan estudios e investigaciones para conocer mejor la accidentalidad ciclista en España. Uno de los problemas es que no se conoce con certeza el número kilómetros recorren los ciclistas al año, ni el número de horas que éstos pasan encima de la bicicleta, para poder determinar con exactitud el nivel de exposición al accidente. La realización de estudios sobre accidentalidad ciclista puede proporcionar toda una serie de información y conocimiento para poder actuar en los ámbitos necesarios en la reducción de la accidentalidad.

### **3. Influencia de variables sobre accidentes ciclistas**

Para la determinación de las variables que causan los accidentes sufridos por usuarios de bicicletas se parte de dos fuentes de información principales, pues la distinción entre accidentes urbanos e interurbanos es un criterio estratégico. Esto es así porque las consecuencias de los accidentes dentro de los núcleos poblacionales es muy distintas a la que acontece fuera de dichos núcleos urbanos: mientras que en los primeros las consecuencias son, en su mayoría, de escasa consideración, en los segundos las consecuencias suelen ser muy graves, con un alto porcentaje de fallecimientos.

Para el análisis en el ámbito urbano, se ha realizado una encuesta vía Web dirigida a usuarios de bicicleta a partir de la cual se ha obtenido la información necesaria. La encuesta fue publicitada en diferentes asociaciones y grupos relacionados con la bicicleta durante dos meses, obteniéndose un total de 184 registros de accidentes.

Para el caso del análisis de la accidentalidad ciclista en ámbito interurbano se han utilizado datos provenientes de los partes de accidentes que la Dirección General de Tráfico posee en Andalucía del período 2003-2007, suministrándose datos de 580 accidentes ciclistas.

Del análisis de la información recopilada resulta palpable la cantidad de circunstancias diferentes que pueden tener influencia y/o provocar la aparición de un accidente ciclista. También hay que tener en cuenta que la información manejada para el caso interurbano proviene de partes de accidente normalizados y que su registro implica que el accidente ha tenido la suficiente gravedad como para realizar un atestado, mientras que la información proveniente de la encuesta Web presenta una tipología de accidentes más amplia.

En un primer análisis de los dos tipos de siniestralidad analizada, urbana e interurbana, se infiere que hay una serie de variables a considerar comunes a ambos tipos de accidentes: tipo de vía y condiciones de la misma, velocidad de circulación, condiciones psicofísicas del ciclista, visibilidad y duración del trayecto

Además, hay otras que son particulares de cada uno de los modos. Por ejemplo, en el caso urbano influyen también la frecuencia de uso, la climatología y el estado de la bicicleta. En el caso interurbano, influyen el tipo de vía, la densidad de la circulación, la regulación de la prioridad y la visibilidad de la señalización. Por tanto, para elaborar un modelo único capaz de realizar prognosis de posible accidentalidad tanto en entornos urbanos como interurbanos éste debe ser capaz de integrar y manejar estas variables de manera eficiente.

Del estudio realizado, y ante la conveniencia de elaborar una base de datos más rica en información sobre los accidentes menos graves, que no suelen ser registrados por las autoridades de tráfico, parece que sería útil que las administraciones competentes facilitaran alguna manera (mediante una página Web, cuestionarios a rellenar, etc.) a los usuarios de bicicleta de registrar los accidentes que sufren. De esta manera se podrían obtener unas series históricas de accidentalidad ciclista urbana que facilitarían a la autoridad competente la

elección de las medidas adecuadas para disminuir la accidentalidad (localización de puntos negros, sugerencias recurrentes de los usuarios, etc.).

#### 4. Desarrollo de modelos

Frecuentemente, en un accidente ciclista se encuentran implicados un conjunto de varios factores. De tal modo, existe una gran diversidad de combinaciones de factores implicados en cada uno de los accidentes registrados durante un cierto periodo de tiempo dentro de una determinada área geográfica. Por ello, se hace necesario el establecimiento de una sistemática de análisis del problema. Esto se consigue con el desarrollo de tres modelos: un modelo probabilístico de causalidad de accidentes, un modelo conceptual de ayuda a la decisión y un modelo de prospección para el posible aumento del número de ciclistas.

Los tres modelos desarrollados se encuentran integrados, de modo que los resultados obtenidos en cada modelo son utilizados como datos de entrada en cada modelo posterior, estudiando de modo secuencial la totalidad de los aspectos incluidos en el ámbito de la toma de decisiones para reducir la siniestralidad ciclista.

##### 4.1. Modelo probabilístico de causalidad de accidentes

En el modelo probabilístico de causalidad de accidentes se ha establecido un procedimiento basado en el análisis de cluster jerárquico para agrupar los distintos accidentes en agrupaciones de accidentes homogéneos, cada uno de ellos caracterizado por un conjunto de factores. De la misma manera, se ha establecido una metodología de determinación de los factores clave en la formación de tales agrupaciones.

Las técnicas de agrupamiento jerárquico se basan en la matriz de incidencias. Ésta es una matriz accidentes-factores cuyos coeficientes  $a_{ij}$  son 1 si el factor  $i$  es causa del accidente  $j$  y 0 en caso contrario. Estas técnicas usan coeficientes de similitud o diferencia entre los elementos para obtener grupos. El coeficiente de similitud más importante para la formación de familias de elementos es el coeficiente de Jaccard (McAuley, 1972), que mide la similitud entre pares de accidentes ( $p, q$ ), y se define en términos del número de factores que es causa de cada accidente. Este coeficiente ( $S_{pq}$ ) se puede expresar como:

$$S_{pq} = \frac{a}{a + b + c} \quad 0 \leq S_{pq} \leq 1 \quad (1)$$

En la expresión (1),  $a$  indica el número de factores que causan los accidentes  $p$  y  $q$ ,  $b$  es el número de factores que causa sólo el accidente  $p$ , y  $c$  es el número de factores que causa sólo el accidente  $j$ . Por tanto, si  $S_{pq}=1$  los accidentes son causados por los mismos factores, y si  $S_{pq}=0$  quiere decir que los accidentes los provocan factores distintos. Accidentes con una similitud elevada se agrupan juntos.

Las clasificaciones jerárquicas se pueden representar por dendogramas (o estructura en árbol invertido) que ilustran los diferentes agrupamientos que pueden formarse dependiendo de la similitud entre los accidentes dentro de una familia.

En el contexto de la formación de familias las técnicas de agrupamiento aglomerativo son las más usadas (Selim et al., 1998). Estas técnicas presentan un efecto cadena por el cual tienden a crear pocos grupos de muchos elementos quedando otros elementos sin unir (formando grupos compuestos de un solo elemento) (Gupta, 1991). De entre esas técnicas, el *Average Linkage Clustering Algorithm* (ALC) es el que presenta el efecto cadena en menor medida (Vakharia y Wemmerlov, 1995) y se considera como la más apropiada a aplicar.

Este método comienza con la agrupación de los coeficientes de mayor similitud. De esta forma se crea una sub-matriz que considera a los productos agrupados como una familia. Entonces se recalculan las similitudes entre productos (y sus agrupaciones) mediante la siguiente expresión:

$$S_{pq} = \frac{\sum_{m \in p} \sum_{n \in q} S_{mn}}{N_p \cdot N_q} \quad (2)$$

Donde  $p, q$  son accidentes;  $m, n$  son factores que causan los accidentes  $p$  y  $q$ , respectivamente;  $S_{pq}$  el coeficiente de similitud entre los accidentes  $p$  y  $q$ ;  $S_{mn}$  el coeficiente de similitud entre los factores  $m$  y  $n$ ;  $N_p, N_q$  el número de factores en las accidentes  $p$  y  $q$ , respectivamente.

Este procedimiento se repite hasta que todos los accidentes estén agrupados en el mismo grupo, como se muestra en la Figura 1.

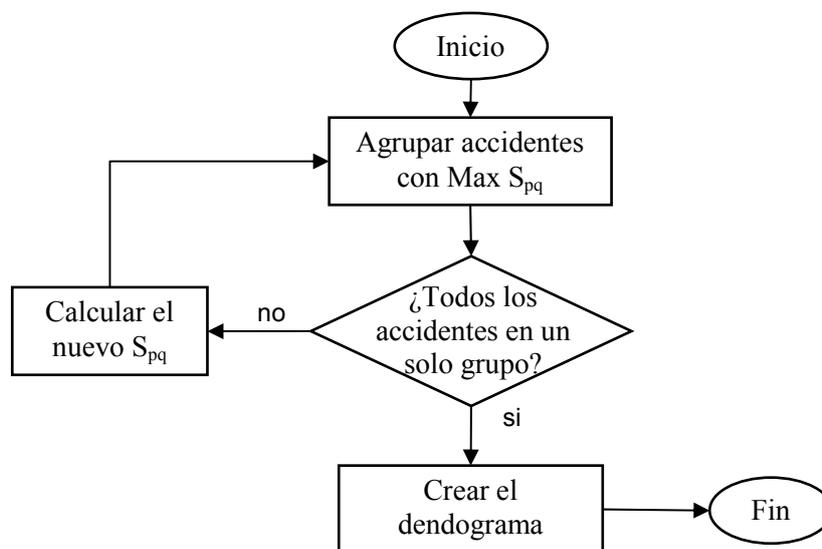


Figura 1. Algoritmo de formación de agrupaciones de accidentes

Como resultado, se obtiene un dendograma o estructura de árbol invertido. La selección de grupos de accidentes puede realizarse desde el dendograma. En éste se diferencian varios niveles, que hacen referencia a los distintos grupos de accidentes que se pueden formar.

#### 4.2. Modelo de ayuda a la toma de decisiones

Este segundo modelo asiste al usuario en la creación y comparación de diversos Planes de Actuación alternativos. Posteriormente, este modelo asiste al usuario en la toma de decisiones sobre el Plan de Actuación a realizar. Estos Planes de Actuación están compuestos por una serie de acciones de mejora relacionadas con los factores característicos obtenidos en el modelo anterior, pudiendo considerar los costes, y el impacto previsto, entre los distintos aspectos a valorar en la selección del plan. Este modelo incluye una base de conocimiento de expertos en la materia sobre las posibles acciones de mejora, relacionando éstas con los distintos factores.

El proceso de análisis y ayuda está compuesto por las siguientes etapas:

- Análisis de la importancia de los distintos factores característicos. Para ello, en primer lugar se evalúa la importancia de los grupos homogéneos de accidentes, analizando posteriormente la importancia de los factores característicos, considerando que no todos

los factores característicos de un grupo determinado poseen la misma importancia, y que un mismo factor pueden ser característico en varios grupos de accidente simultáneamente.

- Análisis de la importancia de las posibles actuaciones de mejora, para lo cual se tienen en cuenta tanto la importancia global de los factores característicos como las relaciones entre Factor-Acciones de Mejora.
- Confección de las distintas alternativas de Plan de Actuación, compuesto por un conjunto de acciones de mejora seleccionadas por el usuario con la información proporcionada por el modelo.
- Selección del Plan de Actuación, mediante un análisis multicriterio de los Planes de Actuación alternativos, considerando criterios de evaluación de diversa naturaleza (económicos y estratégicos, entre otros criterios).

#### **4.3. Modelo de prospección para un aumento del número de usuario de bicicleta**

Este modelo también se basa fundamentalmente en el Análisis de Cluster, realizándose para cada tipo de accidente, con objeto de caracterizar los distintos los accidentados en grupos homogéneos de accidentados.

El objetivo perseguido consiste en la realización de una previsión de la siniestralidad en un escenario en el cual no se han llevado a cabo medidas para reducir la accidentalidad. En tal caso, la variación prevista de la accidentalidad se debe a la evolución de la población de usuarios de bicicletas. Otros datos necesarios para la realización del análisis son los siguientes:

- Estructura de la población actual, estratificada según los distintos tipos de ciclistas que se obtengan en las etapas posteriores.
- Variación prevista de la estructura de la población actual, estratificada según los distintos tipos de ciclistas que se obtengan en las etapas posteriores.

Este tercer modelo contiene dos etapas:

- Análisis de los tipos de usuarios de bicicletas que predominan en cada tipo de accidente, basado en el Análisis de Cluster.
- Análisis de la previsión de accidentes, donde se tienen en cuenta para cada tipo de usuarios de bicicleta en cada tipo de accidente, la población actual y futura estimada, así como el número de accidentes registrados en la actualidad en cada caso.

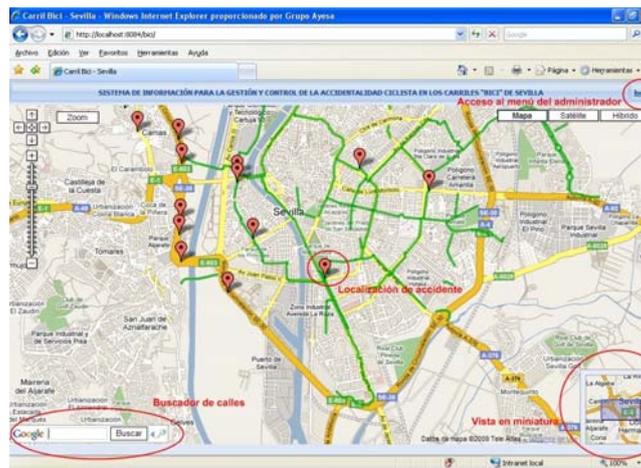
#### **5. Herramienta de ayuda a la reducción de la accidentalidad ciclista**

Como complemento de las investigaciones anteriores, se ha desarrollado una herramienta de ayuda a las Administraciones para la gestión eficiente de la accidentalidad en ciclovías, con especial énfasis en la detección de puntos de accidentalidad y propuesta de medidas correctoras.

En esta herramienta está pensada para gestionar accidentes en ciclovías urbanas. Con ella, los gestores podrán almacenar información de los accidentes ocurridos (localización, tipo de accidente, consecuencias y demás variables que se identificarán en esta fase), de manera que toda la información relativa a accidentes ciclistas esté accesible y almacenada en una única aplicación. Esta funcionalidad, aunque básica en su fundamento, tiene una utilidad enorme por dos razones principales. La primera es que, debido a la escasa magnitud de las consecuencias de la mayoría de accidentes ciclistas en zonas urbanas, la Policía no levanta atestado de dicho accidente, por lo que las Administraciones no tienen constancia de la

ocurrencia de esos accidentes. La segunda es que existen muchas Administraciones que engloban los accidentes ciclistas dentro de la categoría de vehículos de dos ruedas, por lo que al analizar los datos de accidentalidad no se sabe diferenciar los ocasionados por motocicletas de los ocasionados por bicicletas. De la misma forma, los Hospitales no registran a los accidentados ciclistas que les llegan si no pasan al menos una noche ingresados.

La implementación de esta funcionalidad se ha realizado mediante la subida de los datos del accidente a la propia herramienta informática. Además, se incluye en un viario el punto en el que se ha producido el accidente pues la herramienta lleva asociado un sistema de información geográfica que permita georreferenciar los accidentes e incluir información de los mismos para su explotación y posterior toma de acciones que los aminoren. Así, se pueden detectar puntos de elevada accidentalidad de forma fácil y rápida.



**Figura 2.** Geolocalización de puntos de accidentes

La toma de decisiones para ejecutar medidas de reducción de la accidentalidad ciclista no es sencilla cuando se tienen cientos de accidentes, muy diversos y con varios factores causantes de los mismos. La determinación de los factores sobre los cuales actuar no es fácil cuando se maneja un número elevado de accidentes. Para facilitar esta labor, se ha realizado la implementación del modelo de causalidad de accidentes, de manera que la complejidad proporcionada por cientos de accidentes pueda reducirse a varios grupos de accidentes agrupados porque son provocados por un grupo de factores específicos. De esta forma, la determinación de qué factores acatar para disminuir el número de ciertos tipos de accidentes pasa a ser un problema menor.

## 6. Conclusiones

Para el estudio de la accidentalidad ciclista urbana se han analizado un total de 184 accidentes, obteniéndose como factores principales los siguientes: velocidad, climatología, elementos y medidas de seguridad, estado de la bicicleta, condiciones del ciclista, distancia media recorrida, frecuencia de uso, motivo del viaje, lugar y condiciones de la vía y momento del accidente. Por otra parte, para el estudio de la accidentalidad ciclista interurbana, se han analizado 580 accidentes, obteniéndose como factores principales los siguientes: motivo del desplazamiento, duración del trayecto, momento del accidente, rodando sólo o en grupo, tipo y condiciones de la vía, infracción a norma de circulación, distracción, densidad de circulación, velocidad, condiciones psicofísicas, visibilidad de señalizaciones, luminosidad y regulación de la prioridad.

Con objeto de analizar los accidentes registrados y ayudar posteriormente en la toma de decisiones de las acciones de mejora para reducir la siniestralidad ciclista se ha desarrollado

un modelo integral. Este modelo se compone de una base de conocimiento de posibles acciones de mejora dedicadas a reducir la siniestralidad ciclista, además de tres modelos matemáticos interrelacionados. En primer lugar, el modelo probabilístico de causalidad de accidentes ciclistas mide de la importancia de los factores influyentes en los accidentes ciclistas. Los datos de entrada utilizados son los partes de accidentes y los resultados del análisis consisten en agrupaciones de accidentes homogéneas, obteniendo sus factores más importantes y midiendo la influencia de estos factores en el conjunto global de los accidentes. En segundo lugar, el modelo de ayuda a la toma de decisiones asiste al usuario en la priorización y selección de las acciones de mejora que conforman el Plan de Actuación. Este modelo considera que una misma acción de mejora puede estar relacionada con varios factores, lo cual supone que una determinada acción de mejora está relacionada con diversas agrupaciones de accidentes homogéneas. Por último, para ayudar en la selección de las posibles acciones de mejora se consideran y valoran simultáneamente distintos aspectos (costes de implantación de la acción, coste de mantenimiento de la acción, y duración de la implantación, entre otros aspectos). Por último, el modelo de prospección para un aumento del número de usuario de bicicleta realiza una prospección en la accidentalidad ciclista bajo la hipótesis de un aumento del número de usuarios de bicicleta.

Finalmente, la implementación de una herramienta integral de la accidentalidad ciclista urbana permite disponer de un repositorio único de datos de accidentalidad ciclista que pueden geolocalizarse para detectar tramos de elevada accidentalidad. Además, se ha implementado el modelo de causalidad con el objetivo de facilitar el tratamiento de datos de accidentalidad y la posterior toma de decisiones para su reducción.

### **Agradecimientos**

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Centro de Experimentación de Obras Públicas – CEDEX (Ministerio de Fomento), proyecto ACCIBICI PT-2007-055-21CAEM. Los autores agradecen al CEDEX el apoyo recibido.

### **Referencias**

- Amics de la Bici (2003). Bicicleta y seguridad vial. Informe para la Subcomisión sobre seguridad vial y prevención de accidentes de tráfico en el seno del Congreso de los Diputados.
- Dirección General de Tráfico (1997). La difícil convivencia en carretera de ciclistas y automovilistas. Revista nº 123, pp. 1-8.
- Gupta, T. (1991). Clustering algorithms for the design of a cellular manufacturing system – an analysis of their performance. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 461-468.
- McAuley, J. (1972). Machine grouping for efficient production. *The Production Engineer*, Feb., pp. 53-57.
- Selim, H.M.; Askin, R.G.; Vakharia, A.J. (1998). Cell formation in group technology: review, evaluation and directions for future research. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 34, No.1, pp. 3-20.
- Vakharia, A.J.; Wemmerlov, U. (1995). A comparative investigation of hierarchical clustering techniques and dissimilarity measures applied to the cell formation problem. *Journal of Operations Management*, Vol.13, pp. 117-138.