



Hacia un nuevo enfoque de la seguridad vial

José María Izard Galindo,
Ingeniero de Caminos, Canales
y Puertos

Resumen

El objeto de este artículo es plantear la seguridad vial como un sistema, analizar desde este punto de vista los factores que intervienen y aproximarse a la comprensión de su naturaleza.

El artículo comienza analizando los factores que intervienen en la seguridad de la circulación y su consideración como sistema; a continuación, se estudian las relaciones entre los diferentes factores que intervienen en el fenómeno y se analizan las propiedades de linealidad y localidad; más tarde, se estudia el “ruido” del sistema y el proceso de aprendizaje para aproximarse, posteriormente, al fenómeno de la sensibilidad a las condiciones iniciales. Para concluir, se realizan algu-

nas consideraciones que se pueden derivar de este planteamiento y su incidencia en la seguridad vial.

Palabras claves: Seguridad vial; sistemas no lineales; sistemas dinámicos; sistemas expertos; factores que intervienen en la seguridad vial; localidad; ruido; aprendizaje; isomorfismo; sensibilidad a las condiciones iniciales; caos.

La seguridad vial es una pre-ocupación permanente del conjunto de la sociedad, de las Administraciones Públicas y de los ingenieros que proyectan, construyen y conservan los sistemas viarios. En los últimos años se está investigando, desde distintos puntos de vista, el fenómeno de la seguridad vial, para intentar comprender mejor su naturaleza y lograr una reducción de la siniestralidad actuando sobre los factores de riesgo. El enfoque que se quiere dar en este ar-

tículo es considerar la seguridad vial como un sistema, en el que intervienen un conjunto de factores.

Considerando el sistema desde el punto de vista del vehículo que se desplaza, los *factores internos* están compuestos por el vehículo, su carga y sus ocupantes y, dentro de estos últimos en particular, por el conductor. Los *factores internos* son los elementos móviles del sistema. Como se puede observar, el vehículo y su carga representan el elemento móvil inanimado; y el conductor y, eventualmente, sus acompañantes el elemento móvil humano. Los *factores externos* son básicamente la vía y las condiciones del entorno. Entre estos últimos se encuentran entre otros: las condiciones meteorológicas, otros vehículos (que a su vez constituyen factores internos de su propio sistema), el sistema general de la circulación y otras condiciones del entorno (paisaje, visibilidad, etc.).

El conjunto de los factores internos que influyen en la seguridad y están asociados a los vehículos son objeto de una intensa investigación por parte de la industria del automóvil. En esta línea se trata de mejorar el comportamiento de los vehículos frente a los fallos mecánicos internos que afectan a la seguridad (*seguridad activa*), como, por ejemplo, la mejora de los sistemas de frenos (ABS) y los sistemas avanzados de estabilidad; y la prevención de lesiones a los pasajeros en caso de accidente (*seguridad pasiva*), como es el caso de los sistemas de refuerzo de la cabina, *air bag*, etc.

Entre los factores internos asociados al elemento humano, y en lo referente al conductor, cabe destacar:

- la técnica y la habilidad para conducir,
- el nivel de percepción de las limitaciones propias y de las del vehículo para reaccionar ante unas circunstancias desfavorables para la seguridad; y relacionado con este último,
- el nivel de riesgo que quiere asumir el conductor en cada instante.

Los factores en los que interviene el conductor presentan unas características singulares frente al resto de los factores: existen procesos de aprendizaje, e influye el comportamiento humano.

Este último y las condiciones del entorno son los elementos variables por excelencia, aunque de una naturaleza totalmente diferente.

Entre los factores externos, la vía representa el factor fijo e invariable del sistema (a corto plazo y sin considerar la influencia de los demás factores externos sobre ella). En la vía se pueden distinguir las características y las condiciones de uso.

- Dentro de las características de la vía cabe considerar: el trazado (en planta, en alzado, número y anchura de los carriles, arcones, presencia de obstáculos laterales, textura superficial, puntos singulares, etc.); la señalización, etc.
- Entre las condiciones de uso de la vía se pueden distinguir el estado de la conservación, el estado de la

capa de rodadura del firme, la limpieza superficial, etc.

Las condiciones del entorno son factores variables del sistema. Se pueden distinguir:

- las condiciones climáticas;
- la presencia y el comportamiento de otros vehículos que circulen por la vía (elementos internos, a su vez, de su propio sistema);
- las condiciones generales de la circulación: intensidad del tráfico, velocidad del vehículo propio y del resto de los vehículos, densidad, separación entre los vehículos (tanto espacial como temporal), composición del tráfico, etc.;
- la presencia de obstáculos en la vía;
- otras condiciones del entorno (como, por ejemplo, deslumbramientos, elementos de atracción en la zona visual del conductor, etc.).

La seguridad como sistema

Si se considera en un instante dado el conjunto de los factores internos y externos que influyen en la seguridad de un vehículo, en su estado y en su comportamiento, se obtiene el sistema de la seguridad vial del vehículo. A partir de él, se podría intentar construir un modelo matemático que pudiera explicar la seguridad de ese vehículo.

La seguridad de un determinado vehículo a lo largo de un itinerario está definida por los factores que intervienen y su evolución temporal. Es obvio que la dificultad para expresar el fenómeno con rigor matemático es enorme (en la práctica imposible), por lo que el modelo que se escoja será necesariamente limitado y sólo tendrá utilidad para explicar parcialmente la realidad del fenómeno. No obstante, se podría intentar caracterizar el sistema así definido y extraer algunas consecuencias de este enfoque.

- En primer lugar, se trata de un **sistema dinámico**, con componentes estocásticos.
- El sistema **no es determinista**, lo que equivale a decir que en un ins-

tante t_1 no se puede deducir del conocimiento de las variables del sistema en un instante anterior t_0 . En definitiva, no se puede descubrir ninguna ley matemática que relacione con exactitud todos las variables que intervienen, y explique el comportamiento y la evolución del sistema. La falta de determinismo del sistema así definido conduce al planteamiento de la naturaleza de su aleatoriedad; es decir, hay que comprobar si el azar se produce por causas ontológicas (por causa de su propia naturaleza) o epistemológicas (por causa de las limitaciones de los modelos que tratan de explicarlo).

• El sistema es **complejo**, y el número de factores que intervienen en su comportamiento es tan grande que resulta imposible considerarlos todos: con lo cual habrá un margen de error en la determinación de su evolución. Esta complejidad del sistema está asociada al azar epistemológico.

• La influencia de las **fluctuaciones aleatorias**, tanto del entorno como de los factores internos, da lugar al azar ontológico.

• Muchos de **los factores que componen el sistema están relacionados entre sí y se influyen mutuamente**: por ejemplo, unos factores tan diversos como las condiciones meteorológicas, que influyen de forma decisiva en el estado del pavimento y en la atención y capacidad de reacción de los conductores; y el conductor, cuyo estado anímico influye en la atención que presta a la evolución del conjunto de los factores del sistema.

• La influencia de **los distintos factores en el comportamiento del sistema es heterogénea**: depende del factor que se trate y del estado de los demás factores en un instante determinado.

La seguridad como sistema no lineal

La linealidad está asociada al determinismo, y significa que las reglas que determinan el comportamiento futuro de un factor del sistema, y por

lo tanto su evolución, no siguen una transición suave: un ligero cambio en un factor (durante la evolución del sistema) produce un cambio de mayor importancia en el conjunto del sistema. En los sistemas no lineales es necesario considerar un efecto conocido como sensibilidad a las condiciones iniciales.

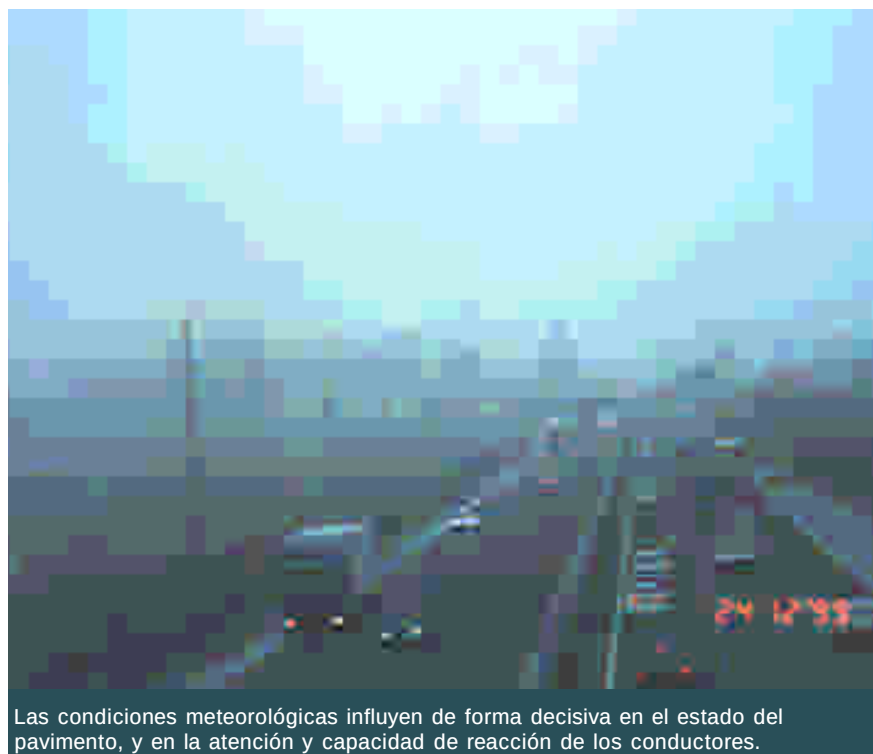
Los modelos matemáticos que regulan el comportamiento de los sistemas lineales son fácilmente abordables. Así, los sistemas lineales presentan una geometría simple e idéntica; esta simplicidad permite captar la esencia del sistema por medio de una imagen mental relativamente fácil. Técnicamente, incluso en algunos sistemas lineales donde el número de los factores es muy elevado (hasta infinito) las soluciones se pueden encontrar de forma teórica.

En el sistema de la seguridad vial, la falta de linealidad no se produce siempre en la misma medida. Esto es debido a la falta de determinismo del sistema: éste evoluciona normalmente de forma suave, y la transición de los factores a lo largo del tiempo se produce sin grandes cambios y de forma previsible. Pero esto no ocurre siempre así: se pueden presentar súbitamente cambios en algunos factores que producen una evolución no lineal del sistema.

Sistema afectado de localidad

El sistema de la seguridad vial de un vehículo dado está afectado de localidad; esta característica es propia de los sistemas complejos, en particular de aquéllos en los que intervienen un gran número de variables.

El hecho de tratarse de un sistema que posee localidad indica que el modelo matemático que formalizaría el fenómeno (en el caso de poderse encontrar) sólo sería válido para esa pequeña porción del universo que tratamos de comprender. No cabe esperar la integración de todos los sistemas locales en un único sistema global (es decir, no es posible encontrar un modelo uni-



Las condiciones meteorológicas influyen de forma decisiva en el estado del pavimento, y en la atención y capacidad de reacción de los conductores.

versal que explique el fenómeno).

La localidad es propia de muchos fenómenos naturales y de los sistemas en los que intervienen.

En el sistema considerado, la localidad produce que nunca se encuentre en la misma situación: la dinámica de los factores que intervienen varía constantemente.

Influencia del ruido en el sistema

El sistema contemplado está seriamente afectado de *ruido*: es decir, la influencia de las fluctuaciones estocásticas del entorno afectan al sistema, a veces de una manera determinante.

Esta singularidad, que se puede presentar de forma súbita, representa una parte nada despreciable de los accidentes que se producen. El *ruido* está presente tanto en los factores internos como en los externos.

- Por una parte, en cuanto a los factores internos, está presente en el comportamiento del vehículo (un fallo repentino en los frenos, un fallo en la dirección, una rueda reventada, etc.); y en el propio conductor (distracción, ataque repentino al corazón, etc.).

- Los factores externos (la vía y

las condiciones del entorno) tampoco están libres del *ruido*. Las condiciones del entorno y, en particular, las condiciones meteorológicas son ontológicamente unos factores sometidos a fluctuaciones estocásticas. Por otra parte, el comportamiento de los demás vehículos que circulan por la vía (que, a su vez, constituyen parte de los factores internos de su propio sistema) influye decididamente en provocar unas situaciones estocásticas en nuestro sistema.

Afortunadamente, la presencia e influencia del *ruido* en el sistema no siempre conduce a unas situaciones que escapan del control del conductor. En este sentido, el *ruido* puede disminuirse sensiblemente a través de las medidas preventivas de seguridad pasiva de los vehículos, contando con la capacidad de reacción del conductor. Análogamente, se puede actuar sobre la vía impidiendo parte de las contingencias por medio del diseño (calzadas separadas, enlaces, cercas, etc.).

El sistema posee la capacidad de aprender

El comportamiento humano está sujeto a aprendizaje; esta cualidad

afecta al sistema y lo condiciona. Una buena capacidad de aprendizaje continuo por parte del conductor mejora la técnica y la habilidad para conducir, y aumenta el nivel de percepción de los factores que intervienen en cada instante del sistema y en su peligrosidad. El aprendizaje también ayuda a calibrar el nivel de riesgo que se puede asumir en cada instante.

La existencia de aprendizaje en el sistema condiciona su comportamiento y puede hacerlo evolucionar en cada instante en la dirección deseada, casi siempre, por el conductor.

Es tan importante el factor "conductor" en el sistema, que sin él no puede explicarse la seguridad vial. En realidad el conductor actúa como un sistema experto que capta información de los factores del sistema y es capaz de tomar unas decisiones instantáneas. Éstas serán tanto más correctas cuanto mejor se perciba la información y el nivel de riesgo que se desee asumir en cada circunstancia sea menor. Por este último efecto, el aprendizaje adquiere su importancia: *ceteris paribus*, un mayor nivel de experiencia y conocimiento sobre el sistema implica generalmente una mayor capacidad para percibir la información y, por lo tanto, mejora las posibilidades de actuación adaptándose a las circunstancias imperantes en cada momento.

Hay otro efecto asociado al conductor y al aprendizaje: la auto-organización. Modelando el sistema de la seguridad de un vehículo desde el punto de vista del riesgo, el sistema tiende al equilibrio (entendido en el sentido de ausencia de riesgo) debido a las continuas interferencias o correcciones del conductor sobre el sistema. De esta forma nos encontramos con un sistema auto-organizado que interacciona, como hemos visto, con otros sistemas también auto-organizados (los vehículos que circulan en su entorno). Todo esto tiende a estabilizar tanto el sistema particular de un determinado vehículo como los diferentes sistemas de los vehículos que circulan por la vía. Sólo en unas circunstancias que escapen al control



Sólo en unas circunstancias que escapen al control del conductor y, en algunos casos, asociadas a otros factores que actúen en un sentido adverso para la seguridad, se puede producir un accidente.

El aprendizaje del sistema se basa en la experiencia, y ciertos procedimientos de la técnica de la conducción se convierten en mecánicas para el conductor

del conductor y, en algunos casos, asociadas a otros factores que actúen en un sentido adverso para la seguridad, se puede producir un accidente y el sistema se sitúa fuera de la posición de equilibrio.

El isomorfismo del sistema

El sistema considerado posee isomorfismo; es decir, hay una cierta analogía entre el estado del sistema

en un instante dado y otro anterior o posterior. La analogía también se produce entre el sistema asociado a un vehículo y el sistema de otro que se encuentre en ese momento en las proximidades del primero.

Debido al isomorfismo, la evolución del sistema en su conjunto y en circunstancias normales presenta unas formas análogas (aunque no iguales). Es decir, la evolución del conjunto de los factores normalmente se realiza de una forma suave (linealmente, en términos matemáticos). Por este motivo, el aprendizaje del sistema (que se manifiesta a través de la mejora de la técnica y de la habilidad para conducir y en la mejora del nivel de percepción del conjunto de los factores que intervienen en el sistema) se basa en la experiencia; y ciertos procedimientos de la técnica de la conducción se convierten en mecánicas para el conductor, permitiendo centrar la atención en otros factores.

Gracias a esta propiedad, la conducción en circunstancias normales no es complicada, e incluso puede resultar atractiva.

Sensibilidad a las condiciones iniciales

La sensibilidad a las condiciones iniciales está relacionada con la falta

de linealidad del sistema, e implica que un pequeño cambio en el estado del sistema en un determinado instante produce una evolución posterior, que crece exponencialmente con el tiempo.

Para que exista sensibilidad a las condiciones iniciales, no se necesita un estado inicial excepcional: se puede producir con una gran variedad de estados iniciales. Muchos sistemas físicos dependen de forma sensible de las condiciones iniciales, cualesquiera que sean éstas.

Esta propiedad va en contra de la intuición, y es necesario realizar un esfuerzo para entender cómo funcionan los sistemas sometidos a ella.

Los sistemas con sensibilidad a las condiciones iniciales son difíciles de modelar matemáticamente: esto explica por qué el interés por ellos es relativamente reciente. En cualquier caso se podría realizar una discusión heurística sobre estos sistemas.

- El sistema de la seguridad vial, como se ha descrito, tiene sensibilidad a las condiciones iniciales, presente tanto en los factores externos como internos.

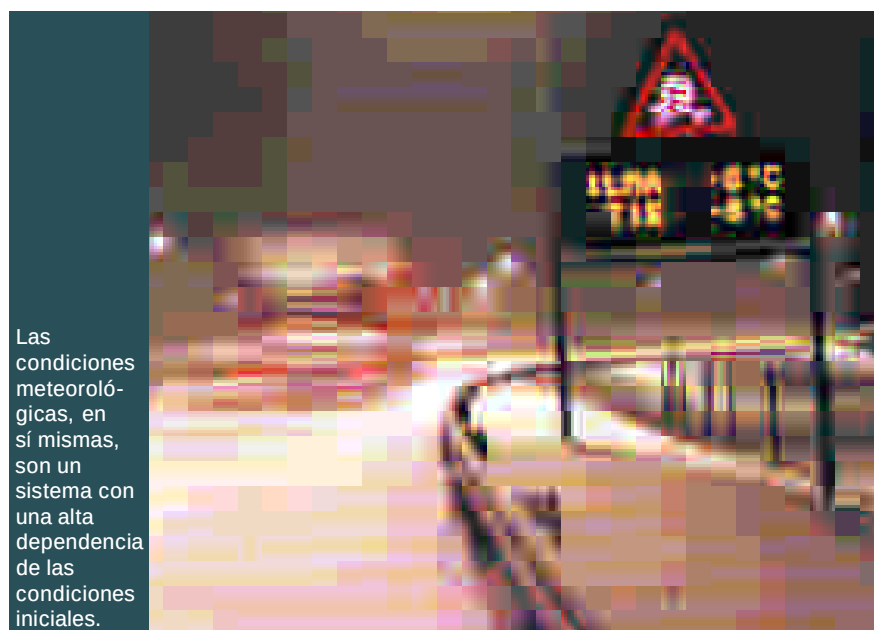
- En cuanto a los factores internos, una pequeña variación en el comportamiento de algún componente mecánico del vehículo puede provocar una evolución del sistema que difiera exponencialmente del estado inicial.

- El otro factor interno, el conductor, por la componente humana que entraña está sujeto a un comportamiento que requiere una atención ininterrumpida a la conducción y a los diferentes factores que están constantemente variando a su alrededor. Basta una pequeña distracción en la conducción para provocar una evolución del sistema que genere una situación de peligro. El estado del resto de los factores que intervienen en el sistema puede variar el nivel de la peligrosidad.

- Entre los factores externos, la vía puede ser que represente el factor de menor dependencia de las variaciones de las condiciones iniciales: ello es debido al carácter invariante que

tiene. No se puede afirmar lo mismo de las condiciones del entorno: las condiciones meteorológicas, en sí mismas, son un sistema con una alta dependencia de las condiciones iniciales. Naturalmente, los demás vehículos que circulan por la vía están sometidos a su vez a esta dependencia; y, análogamente, todos ellos influyen en las condiciones generales de la circulación.

- También se producen dependencias de las condiciones iniciales en las condiciones del entorno: invasión de la vía, impactos contra el vehículo, etc.



Las condiciones meteorológicas, en sí mismas, son un sistema con una alta dependencia de las condiciones iniciales.

Consideraciones finales

Desde la perspectiva introducida por el sistema, tal y como se ha definido, se pueden realizar algunas consideraciones:

- El sistema de la seguridad vial es un sistema dinámico auto-organizado, no lineal, no determinista y complejo, cuyos factores están relacionados entre sí, y que presenta aprendizaje, localidad e isomorfismo. Además el sistema posee "ruido", tiene la propiedad del aprendizaje y una alta sensibilidad a las condiciones iniciales.

- El sistema se comporta normalmente de forma suave; el conductor puede influir en el sistema, organizándolo y corrigiendo los desequilibrios que se producen.

- Excepcionalmente, la alta sensibilidad a las condiciones iniciales provoca unos estados del sistema que se alejan del equilibrio y pueden convertirse en accidentes.

- La presencia del conductor (un factor interno fundamental del sistema) y su posibilidad de aprendizaje y actuación inmediata hacen que el sistema se comporte como un "sistema experto", analizando el estado de los factores en cada instante y tomando las decisiones oportunas.

Las actuaciones encaminadas a la mejora de la seguridad vial, desde el punto de vista que se está conside-

rando, no difieren de las ya conocidas; pero se puede aportar un método de estudio novedoso y sistemático.

En una primera aproximación, se podría afirmar lo siguiente:

- Entre los factores internos, **el conductor es la clave del comportamiento del conjunto del sistema.** Como se ha comentado, el sistema se auto-organiza y aprende por la influencia del conductor. Cualquier medida encaminada a incrementar el nivel técnico y la habilidad del conductor, en principio, fomenta el nivel de percepción de los factores que influyen y el conocimiento de las limitaciones propias y de las del vehículo para reaccionar ante unas circunstancias desfavorables. Además, ayuda a percibir el riesgo que se quiere asu-

mir y a ajustar la conducción.

• **El comportamiento del sistema como experto, debido a la actuación del conductor, puede potenciarse a través de la aplicación de unos sistemas expertos artificiales** (tanto en el interior del vehículo como en la propia vía) que ayuden al conductor a la toma de decisiones sobre el sistema, potenciando su capacidad para percibir los factores que influyen y, consecuentemente, mejorando la respuesta.

• Para reducir la siniestralidad parece importante incrementar las acciones sobre el conductor, bien sea mediante una formación específica o a través de procedimientos que colaboren con él. Estas acciones deben ayudar al conductor a ser consciente de sus limitaciones humanas para reaccionar ante unas circunstancias imprevistas, teniendo en cuenta las singularidades de cada persona en cada instante, para que cada conductor adopte el nivel de riesgo que considere aceptable y controlable teniendo en cuenta todos los factores que intervienen.

• El vehículo (el otro factor interno del sistema) es el elemento que interacciona con el conductor y con los factores externos (la vía y las condiciones del entorno); los constructores de los vehículos tienen en cuenta este hecho y los diseñan para ello. Consideran tanto la seguridad activa como la pasiva, e incluso están investigando unos sistemas de navegación para ayudar al conductor en la toma de decisiones. Las mejoras técnicas constantemente introducidas en los vehículos tienen un efecto positivo para eliminar o minimizar los fenómenos estocásticos que se pueden producir en ellos y en los factores del entorno.

• La vía, sobre la que se actúa intensamente para mejorar la seguridad, aporta el medio sobre el que evoluciona el sistema. Los esfuerzos que se aplican tanto en su diseño como en su conservación y explotación, tienen un efecto directo para mejorar el sistema; pero no determinan en última instancia la eliminación definiti-

va del problema de la inseguridad. Esto es debido a que se debe contemplar la seguridad vial como un *sistema* en el que todos y cada uno de los factores influyen en él y lo condicionan. En este sentido, tiene una enorme importancia la consideración de las acciones mutuas de los factores, y la coordinación y coherencia de las medidas adoptadas.

Un adecuado trazado de la vía, sobre todo en los puntos singulares, es una medida eficaz para que el conductor no encuentre tramos en los que las características técnicas se restringen repentinamente. El objetivo de un correcto trazado es que la vía sea un itinerario homogéneo, en el que el conductor no encuentre puntos singulares para los que no ha acomodado su conducción. Si por alguna circunstancia el trazado posee estos tramos o puntos singulares, debe existir una señalización que permita al conductor percibir estas singularidades y ajustar su conducción y su nivel de riesgo.

En cualquier caso, las elevadas inversiones que se aplican a mejorar la seguridad en las vías deben ir acompañadas de otras medidas sobre otros factores, particularmente sobre los procesos de formación del conductor; de esta forma, se potenciaría la eficacia de las medidas de alto coste, produciendo efectos de sinergia.

• Los factores del entorno (elementos externos del sistema) pueden ser controlados, en algunos casos totalmente, por medio de acciones en la vía y en su entorno. En este sentido, por ejemplo, la presencia de unas medianas suficientemente amplias en las carreteras impide la in-

vasión por otros vehículos de la calzada contraria, igual que el vallado de la traza impide su invasión por animales. Hay que tener en cuenta que los procesos estocásticos asociados a estos factores, y la alta sensibilidad a las condiciones iniciales, hacen muy difícil la erradicación de las circunstancias que pueden provocar un accidente.

En resumen, el fenómeno de la seguridad vial contemplada bajo el punto de vista de *sistema*, cuya naturaleza se ha tratado de esbozar, puede aportar un buen método de análisis.

Observando la influencia de los factores que intervienen y su interacción en el conjunto del sistema, así como la sensibilidad a las condiciones iniciales, se pueden extraer algunas consideraciones para actuar sobre los diferentes factores, teniendo en cuenta el funcionamiento del conjunto.

Particularmente, **las acciones dirigidas al conductor, tanto para aumentar el aprendizaje como para ayudarle en la toma de decisiones, y de esta forma ajustar el nivel de riesgo que quiere asumir, son esenciales para mejorar la seguridad**. Si a esto se asocian otras medidas de seguridad pasiva en los vehículos y en las vías, y, además, se actúa en la mejora del diseño y en su conservación y explotación (todo ello para **evitar en lo posible la aparición de los fenómenos estocásticos que provocan la alta sensibilidad a las condiciones iniciales**), tendremos una aproximación razonable a las medidas que hay que adoptar para mejorar la seguridad vial. ■

Naturaleza del sistema de la seguridad vial

- Dinámico
- Isomorfo
- Experto
- Complejo
- No determinista
- Auto-organizado
- Sujeto a procesos de aprendizaje
- Afectado por "ruido" y localidad
- Con alta sensibilidad a las condiciones iniciales
- Con fluctuaciones aleatorias que lo pueden alejar de la situación de equilibrio