

CÁLCULO DE LA VELOCIDAD SEGURA DE CIRCULACIÓN DE LOS VEHÍCULOS AUTOMÓVILES EN FUNCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA CARRETERA. COMPARACIÓN DE MODELOS.

JIMÉNEZ ALONSO, Felipe ⁽¹⁾; APARICIO IZQUIERDO, Francisco ⁽²⁾

(1) Universidad Politécnica de Madrid, España
Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Aeronáutica
Departamento de Vehículos Aeroespaciales
e-mail: felipe.jimenez@upm.es

(2) Universidad Politécnica de Madrid
Instituto Universitario de Investigación del Automóvil
e-mail: faparicio@insia.upm.es

RESUMEN

Dentro de los factores más influyentes sobre la seguridad de la circulación por carretera están los derivados de la propia geometría de ésta. Existe un gran interés por parte de las administraciones reguladoras de las vías públicas en Europa, EEUU y Japón en la estimación, con criterios objetivos, de las velocidades seguras. El descrédito de la actual señalización demuestra la inadecuación de ésta a la percepción del riesgo por parte de los usuarios.

En este trabajo, se presenta una metodología de cálculo de la velocidad segura en base a una medida precisa y un análisis detallado de las características geométricas de la carretera. Para ello, se localizan las secciones de peligro potencial, se definen los criterios objetivos de riesgo y se emplean modelos matemáticos de dinámica vehicular. Los resultados se comparan con los que se obtienen de la aplicación de otros métodos y modelos más simplificados.

Los niveles de velocidad segura han sido implementados dentro de un sistema de aviso al conductor embarcado en un vehículo comprobándose su efectividad en cuanto a una mejor adecuación de la marcha a la geometría de la vía.

Palabras clave: geometría carretera, modelo, dinámica vehicular, velocidad

ABSTRACT

Some of the most influential factors on road safety are related to road geometry. There is a great interest in Europe, USA and Japan in establishing safe speed limits. Current limits do not reflect drivers risk assessment so they should be revised.

In this paper, a methodology for speed limits calculation is presented. This novel methodology is based on a mathematical vehicle model and the accurate road geometry measurement. Results have been compared with the limits that simplified methods provide.

The safe speed limits have been used in advanced driver assistance systems.

Key words: road geometry, model, vehicular dynamics, speed

1. Introducción

Dentro de los factores más influyentes sobre la seguridad de la circulación por carretera están los derivados de la propia geometría de ésta. Existe un gran interés por parte de las administraciones reguladoras de las vías públicas en Europa, EEUU y Japón en la estimación, con criterios objetivos, de las velocidades seguras. El descrédito de la actual señalización demuestra la inadecuación de ésta a la percepción del riesgo por parte de los usuarios.

La velocidad de los vehículos es un factor fundamental en el tráfico para conseguir fluidez, pero también puede ocasionar riesgos de accidente. El conductor debe tener en cuenta su propia capacidad física y psíquica, las características y el estado de la vía, del vehículo y su carga, las condiciones meteorológicas, ambientales y de circulación y, en general, cuantas circunstancias concurren en cada momento, a fin de adecuar la velocidad de su vehículo a las mismas.

Las limitaciones de velocidad gozan de un muy bajo prestigio entre los conductores, los cuales no aprecian la conveniencia de respetarlas. Esta situación se ve agravada por la introducción en el mercado de nuevos modelos de vehículos con mayores prestaciones, medidas de seguridad y sistemas de ayuda a la conducción. Así, no se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- El conductor puede juzgar mal la geometría y la peligrosidad del trazado por no apreciar todos los factores
- El conductor tiende a no considerar imprevistos que puedan tener lugar en zonas que no controla visualmente
- Las condiciones meteorológicas adversas como la lluvia y la niebla suelen hacer disminuir la velocidad de circulación en general, si bien esa disminución no es suficiente para mantener el mismo margen de seguridad.

Dentro del proyecto europeo MASTER (Managing Speeds of Traffic of European Roads), se identificaron los siguientes efectos negativos de la velocidad de circulación [17][41]:

- Accidentes y sus costes
- Impacto medioambiental (emisiones, ruido y vibraciones)
- Costes de operación
- Efectos socioeconómicos (condicionado por el movimiento de masas)
- Efecto sobre la infraestructura

Idénticos efectos son los señalados en [38]. En este trabajo, se puede encontrar una amplia relación bibliográfica de diferentes experiencias y estimaciones realizadas con el fin de cuantificar los costes de la velocidad sobre la sociedad.

Por otra parte, es común encontrar diversas teorías que ponen de manifiesto que la relación entre la velocidad y el número de accidentes no es lineal. En [2] se propone una relación cuadrática, aunque posteriormente se matizó dicha evolución considerando la densidad de tráfico, el tipo de carretera y el tipo de accidente.

Dos enfoques basados en las capacidades del conductor son los siguientes. En [12] se plantea que un accidente es más probable si hay más situaciones potenciales de conflicto, las cuales son mayores si se circula por encima o por debajo de la media. En [34] se identifica que un accidente puede acontecer en aquellas situaciones en las que la información que deba procesar el conductor sobrepase sus capacidades, lo que se encuentra relacionado con el número de conflictos en los que se vea envuelto.

En [33] se sostiene también la influencia sobre el número de accidentes de la varianza de la distribución de velocidades además de la propia velocidad media. En esta línea, ya se había apuntado anteriormente una relación en forma de U entre los accidentes y la desviación de la velocidad frente al promedio [37]. Esta distribución ha sido criticada por otros autores basados, en su mayor parte, en análisis experimentales [6]. Otros autores detectaron que el crecimiento del riesgo de estar envuelto en un accidente crecía notablemente cuanto mayor fuese la velocidad comparada con la velocidad media [21][18][31].

En [7] se establece una relación lineal entre velocidad media y accidentes con víctimas, si bien esta conclusión parece que no es de aplicación para cualquier rango de velocidades por lo que se prefieren soluciones asintóticas en las que el efecto de un aumento de la velocidad media es menos perjudicial a bajas o a muy altas velocidades que a velocidades medias [27].

Todo lo anterior motiva la adopción de medidas para controlar la velocidad. La conveniencia de estas medidas viene condicionada por su eficacia para limitar la velocidad, la aceptación por parte de los conductores, otros usuarios y terceros implicados y la reducción global de la peligrosidad de la circulación y otros efectos negativos. Los métodos de control de velocidad se pueden clasificar en los siguientes grupos: medidas informativas y legales, medidas relacionadas con el diseño de carreteras y medidas de intervención [41].

En la tarea de implantación de límites de velocidad en las carreteras, se presentan dos problemas fundamentales: la determinación del límite más conveniente en cada sección y en cada circunstancia teniendo en cuenta factores permanentes y transitorios, y la determinación de los métodos que se van a emplear para controlar el cumplimiento de dichos límites. Este trabajo se centra en el primero de ellos, y se presenta y aplica una metodología de cálculo de la velocidad segura en base a una medida precisa y un análisis detallado de las características geométricas de la carretera. Para ello, se localizan las secciones de peligro potencial, se definen los criterios objetivos de riesgo y se emplean modelos matemáticos de dinámica vehicular. Los resultados se comparan con los que se obtienen de la aplicación de otros métodos y modelos más simplificados.

2. Mapa electrónico de la carretera

Los mapas actuales de las carreteras empleados en aplicaciones de navegación de vehículos terrestres no tienen la suficiente precisión y detalle [11][39][40]. En concreto, para el establecimiento de límites seguros de circulación, es necesario generar mapas digitales propios atendiendo a especificaciones concretas.

El procedimiento de construcción del mapa electrónico, basado en el uso de un vehículo instrumentado con sensor de velocidad, plataforma giroscópica, cámara de video y receptor GPS para la medida en continuo de los factores permanentes de la vía (geometría y elementos del entorno), así como los ensayos de validación y aplicación en carreteras, se recogen en [15].

3. Mapa de velocidades seguras

La efectividad de los límites de velocidad está muy condicionada por la objetividad con la que se han sido fijados. Así, el conductor tiene que apreciar que, en aquellas situaciones en las que se recomienda una reducción de velocidad, el riesgo es evidente, aunque no sea capaz de ponderar la magnitud exacta del mismo ni lo próximo que se encuentra del límite.

3.1. Alcance del mapa de velocidades seguras

Una clasificación muy usual encontrada en la bibliografía de los factores que afectan a la seguridad toma como criterio la permanencia del citado factor en el tiempo. Así, se diferencian dos grupos:

- Factores permanentes que se mantienen inalterados en un periodo de tiempo razonablemente largo
- Factores transitorios que cambian en un corto plazo de tiempo

A su vez, resulta conveniente la subdivisión en 4 categorías:

- a) Factores derivados de la geometría de la carretera
- b) Factores derivados de las condiciones exteriores
- c) Influencia de las características del vehículo
- d) Influencia del conductor

En este trabajo se considera el primer grupo, pero es preciso realizar las siguientes puntualizaciones:

1. De las variables geométricas de la carretera, algunas se pueden relacionar de forma directa con indicadores objetivos de la seguridad de marcha como, por ejemplo, la adherencia utilizada o la aceleración lateral no compensada en curvas. En tales casos, esos indicadores proporcionan un criterio objetivo para limitar la velocidad.
2. De otras variables, también englobadas en el mismo subgrupo (incorporaciones y salidas o el número de carriles y la anchura de los mismos), si bien sí existen estudios sobre su peligrosidad, no es inmediata la obtención de la velocidad óptima para minimizar el riesgo adicional. Reducciones en las velocidades de paso redundará en disminuciones del riesgo de accidente, aunque no está sustentada esa reducción por criterios objetivos.
3. Las condiciones meteorológicas son factores transitorios que afectan a la visibilidad y la adherencia. La luminosidad se relaciona con la visibilidad.
4. Las características del vehículo (pesos, dimensiones, componentes, sistemas de ayuda a la conducción) influyen en su dinámica. Resulta razonable un análisis diferenciado para cada tipo de vehículo, si bien no se esperan discrepancias notables entre vehículos de igual gama. El uso como herramienta de un modelo de simulación de la dinámica vehicular posibilita este estudio diferenciado.
5. No todos los conductores poseen las mismas capacidades al volante ni el mismo estilo de conducción. Por ello, resulta complejo el establecer un sistema de avisos que satisfaga a todos los conductores. Diversos autores abogan por el desarrollo de sistemas adaptativos [1][10][22].

Concluyendo, para el establecimiento del mapa de velocidades seguras objetivas se considerarán:

- Las curvas del trazado en planta, empleando criterios objetivos basados en la adherencia y la aceleración lateral no compensada
- Las restricciones de visibilidad causadas por el trazado de la carretera y los elementos circundantes

Obsérvese que, si bien no se tratarán las modificaciones que puedan implicar los factores transitorios (luminosidad y condiciones meteorológicas) sobre la adherencia o la visibilidad, al centrarnos en la geometría de la vía, la metodología de cálculo presentada sí sería válida también para tales situaciones.

3.2. Indicadores del riesgo

Para el establecimiento de los límites de velocidad, se deben usar indicadores del riesgo que sean objetivos y aceptados por los conductores. En concreto, se considerarán los siguientes:

- Adherencia
- Aceleración lateral
- Visibilidad

Adherencia

La adherencia es clave en la seguridad ya que es la responsable de producir las reacciones necesarias para el guiado, la aceleración y el frenado. La capacidad adherente total es igual, en cada rueda, al coeficiente de adherencia disponible multiplicado por la carga dinámica de dicha rueda.

Por un lado, la carga dinámica depende de la carga estática, de la transferencia de carga producida de un eje a otro o entre ruedas de un mismo eje y de las variaciones ocasionadas por las irregularidades de la calzada.

Por otra parte, el coeficiente de adherencia depende de múltiples factores, algunos de los cuales de difícil evaluación, lo que hace complicado y costoso su conocimiento preciso en tiempo real. En

general, los coeficientes son ligeramente diferentes en las direcciones longitudinal y transversal, aunque, con frecuencia, se obvia esta circunstancia.

Cuando los esfuerzos son combinados, se presenta la situación en la que el neumático proporcionará toda la adherencia longitudinal requerida, hasta alcanzar el máximo y sólo se empleará para contrarrestar la fuerza lateral la adherencia remanente que quede en cada instante. En [25] se desarrolló el concepto de elipse de fricción que determina los límites de adherencia de los neumáticos en todas las direcciones. Empleando este concepto, se han planteado criterios de seguridad basados en calcular la diferencia entre el esfuerzo máximo admisible y el esfuerzo combinado utilizado [9][20].

Aceleración lateral

Diversos estudios apuntan a que en el control lateral del vehículo, además de intervenir la adherencia entre el neumático y la calzada, debe tenerse presente la aceleración lateral sin compensar, aspecto que, salvo en condiciones de baja adherencia, impondrá límites inferiores de velocidad segura. Precisamente, a causa de este motivo, se ha demostrado experimentalmente que la velocidad práctica a la que se puede abordar una curva es bastante inferior a la teórica y está condicionada por el conductor y el vehículo con los siguientes niveles [19]:

- Inferior a 2 m/s^2 : Todos los vehículos pueden soportarla sin pérdida de estabilidad y todos los conductores son capaces de abordarla.
- Entre 2 m/s^2 y 4 m/s^2 : Todos los vehículos ligeros y la mayoría de los conductores medios la soportan.
- Entre 4 m/s^2 y 6 m/s^2 : Los vehículos modernos en buenas condiciones no pierden la estabilidad, pero los conductores tienen problemas para ejercer el control del mismo.
- Entre 6 m/s^2 y 8 m/s^2 : Difícil de soportar para la mayoría de los vehículos y conductores.

El criterio de seguridad límite a partir del cual pueden aparecer problemas se fija en $a_{y \text{ lim}} = 3 \text{ m/s}^2$, lo que resulta coherente con la indicación realizada en [10] donde se citaban estudios que establecían un intervalo de aceleraciones laterales aceptables de $0.2 \text{ g} - 0.4 \text{ g}$ en buenas condiciones de adherencia y con independencia de la velocidad de circulación.

En la misma línea, la Instrucción de Señalización Vertical [24] indica que las limitaciones de velocidad en curva deben ser tales que se tenga, como máximo, una aceleración lateral no compensada de 0.25 g , de lo que se deduce, en km/h, que

$$v = \sqrt{1.27 \cdot R \cdot (p + 25)}$$

donde el radio se expresa en metros y el peralte en %.

Un trabajo canadiense [5] apunta al hecho experimental de que los conductores, en curvas cerradas, eligen la velocidad para alcanzar un cierto valor confortable de aceleración lateral, valor que cifran en $0.35 \text{ g} - 0.4 \text{ g}$. En curvas de amplio radio, ya no se considera esta variable, sino que se siguen los mismos criterios de conducción cómoda que en secciones rectas.

Visibilidad

La distancia de visibilidad es un factor capital desde el punto de vista de la seguridad y debe considerarse en función de dos variables:

- a) la velocidad de circulación
- b) el tipo de discontinuidad en el trayecto

La distancia de visibilidad está condicionada por características geométricas de la vía y su entorno más cercano. La Norma sobre Trazado de carreteras [23] considera que la visibilidad mínima requerida para realizar una maniobra depende de la velocidad de los vehículos y del tipo de maniobra. Por ello, define los siguientes casos:

- ✓ Visibilidad de parada
- ✓ Visibilidad de adelantamiento
- ✓ Visibilidad de cruce

Los problemas más relevantes causados por una insuficiente distancia de visibilidad aparecen en intersecciones (por la diferencia de velocidades de los vehículos), curvas (por la falta de percepción real de un tramo de la misma) y zonas de transición y adelantamiento autorizado. En [42] se establecen valores de distancia de visibilidad por debajo de los cuales aparecen problemas de seguridad en cada una de las singularidades en función de la clasificación de vías realizada por el INRETS.

En las curvas surge un simple problema geométrico si existe un obstáculo en el lado de la vía hacia el que se gira. El cálculo de la mínima distancia F entre el obstáculo y la carretera necesaria para tener una visibilidad D se recoge en la Normativa de Trazado de Carreteras [23] y vale:

$$F = R - (R + b) \cdot \cos\left(\frac{31.83 \cdot D}{R + b}\right)$$

donde R es el radio interior de la curva y b es la distancia desde el borde interior al conductor.

La misma normativa se refiere también a los acuerdos verticales. La curva de acuerdo es una parábola de eje vertical y ecuación:

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot K_v}$$

Para determinar el valor de la constante se tienen en cuenta consideraciones de visibilidad y estética.

Existen otras situaciones en las que la distancia de visibilidad no se establece en virtud de las características geométricas de la carretera.

Al circular por una vía insuficientemente iluminada, la zona de visibilidad queda reducida al haz de los faros, por lo que el margen de reacción y actuación ante un imprevisto es limitado. Dada la asimetría del haz, se ilumina una mayor distancia de carretera cuando se aborda una curva a derechas que cuando ésta es a izquierdas. En el proyecto PROVE [9] se analiza la velocidad máxima a la que se puede circular por curvas a derechas y a izquierdas de diferentes radios manteniendo la posibilidad de frenar ante un imprevisto. Las diferencias entre ambos sentidos del trazado son del orden de 11 %. Un estudio experimental llevado a cabo en [28] muestra que las luces cortas no son, en general, suficientes para la circulación a alta velocidad (superior a los 90 km/h).

Las condiciones atmosféricas adversas como la lluvia o la nieve, además de reducir la adherencia en el contacto neumático – calzada, disminuyen la visibilidad. Estudios experimentales recogidos en [14] conducen a una expresión de la distancia de visibilidad en función de la intensidad de lluvia I:

$$D_{\text{visibilidad}}(m) = \frac{353954.88}{\left[I \left(\frac{mm}{h} \right) \right]^{0.68} \cdot V \left(\frac{km}{h} \right)}$$

3.3. Metodología para la generación del mapa de velocidades seguras

Como ha quedado reflejado con anterioridad, el mapa de velocidades seguras recoge las limitaciones de velocidad a causa de la presencia de curvas en el trazado y de restricciones de visibilidad. La generación de este mapa de velocidades seguras se realiza en 4 fases:

- Fase 1: Determinación de la velocidad segura de circulación atendiendo a las limitaciones impuestas por los tramos en curva de la trayectoria
- Fase 2: Corrección de las velocidades seguras del mapa por curvas consecutivas

- Fase 3: Determinación de la velocidad segura de circulación atendiendo a las limitaciones impuestas por la distancia de visibilidad
- Fase 4: Construcción del mapa completo incluyendo la velocidad legal, la velocidad segura en curvas y la limitación por la distancia de visibilidad

Fase 1: Velocidad limitada en curva

Basándose en la definición de curva incluida en [29], la catalogación de una sección como curva o recta se hará en función del radio. Así, se define la *singularidad curva* como el tramo de carretera cuyo radio es inferior a 1000 metros.

Formas simplificadas de cálculo

En la bibliografía se puede encontrar una amplia relación de formas simplificadas de cálculo de la velocidad de paso por curva

En la señalización de curvas, la Norma de Señalización Vertical [24] establece, como ya se ha indicado anteriormente el límite basado en la aceleración lateral no compensada máxima admisible, límite que se fija en 0.25 g.

Por otra parte, usando el modelo simplificado de vehículo con suspensión rígida, el límite de derrape está condicionado por la adherencia lateral de los neumáticos, el radio de la curva y el peralte ζ :

$$V_{derrape} = \sqrt{g \cdot R \cdot \frac{\mu_{y \max} + tg \zeta}{1 - \mu_{y \max} \cdot tg \zeta}}$$

De igual forma, el límite de vuelco se deduce sin más que sustituir $\mu_{y \max}$ por $B/(2h)$ donde B es la vía y h es la altura del centro de gravedad del vehículo. Sin embargo, en vehículos automóviles la situación del vuelco es mucho menos frecuente que el agotamiento de la adherencia lateral.

Una particularización de la expresión anterior es la “fórmula de velocidad crítica”, muy usada en la investigación de accidentes y tratada ampliamente en [36], entre otros, la cual proporciona la velocidad a la que los neumáticos llegan a su saturación lateral.

$$V_{critica} = \sqrt{g \cdot \mu \cdot R}$$

Puesto que la medida del peralte es conocida, trabajaremos en la expresión más general. En ella, intervienen 3 parámetros que, según [30], pueden estar sujetos a errores, los cuales deben evaluarse para conocer la incertidumbre introducida sobre el cálculo de la velocidad límite de derrape. Las desviaciones individuales atribuibles a cada uno de los parámetros están dadas por:

$$\frac{V_{err_R}}{V_c} = \frac{\frac{\partial V_c}{\partial R} \cdot R_{err}}{V_c} = \frac{1}{2 \cdot R} \cdot R_{err}$$

$$\frac{V_{err_zeta}}{V_c} = \frac{\frac{\partial V_c}{\partial \zeta} \cdot \zeta_{err}}{V_c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + \mu_{y \max}^2}{(1 - \mu_{y \max} \cdot \zeta) \cdot (\zeta + \mu_{y \max})} \cdot \zeta_{err}$$

$$\frac{V_{err_mu}}{V_c} = \frac{\frac{\partial V_c}{\partial \mu} \cdot \mu_{err}}{V_c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + \zeta^2}{(1 - \mu_{y \max} \cdot \zeta) \cdot (\zeta + \mu_{y \max})} \cdot \mu_{err}$$

donde se ha aproximado la tangente del ángulo del peralte por el propio ángulo.

Nótese que, en el cálculo de la velocidad límite de derrape, interviene el radio de la trayectoria, el cual puede no coincidir, en la práctica, con el geométrico de la curva y varía según la forma de conducción

de cada usuario y las condiciones tanto objetivas como subjetivas. Según [5], cuando el radio de la curva es amplio, los conductores suelen seguir la línea media del carril, si bien, cuando las curvas son más cerradas, existe la tendencia de recortar la trayectoria con lo que se consigue abordar la curva a velocidades superiores.

Para salvar la dificultad anterior, en [8] se proponen dos valores prácticos en relación con las velocidades medias y de aproximación a la curva en carreteras de dos carriles y doble sentido de circulación teniendo en cuenta este aspecto:

$$V_m = \frac{86}{1 + \frac{314}{R^{1.5}}} \quad V_a = \frac{102}{1 + \frac{346}{R^{1.5}}}$$

donde la velocidad se expresa en km/h y el radio en metros.

Aunque el uso de la fórmula de derrape está muy extendido, en [10] se ponen de manifiesto ciertas carencias del modelo si se desea una estimación precisa de la velocidad segura. En concreto, apunta los siguientes aspectos:

- No es suficiente trabajar con la curvatura para definir con precisión la velocidad crítica de una curva
- No se tiene en cuenta la pendiente de la carretera
- El efecto de curvas concatenadas tampoco es considerado
- Aspectos de la dinámica longitudinal, como el consumo de una parte de la adherencia disponible y las transferencias de carga, son obviadas en la formulación clásica

Para subsanar esas carencias, se propone el cálculo de una velocidad límite en curvas basada en un modelo simplificado de vehículo. Se usa un modelo de 2 ruedas en el que se tienen 5 grados de libertad: desplazamientos longitudinal, transversal y vertical del vehículo y giros alrededor de los ejes transversal y vertical (θ y ψ). El método de cálculo se basa en el planteamiento de las ecuaciones de la dinámica según los grados de libertad anteriores, con el fin de despejar los esfuerzos en los neumáticos. La velocidad límite se obtiene a partir de la composición de esfuerzos longitudinales y transversales y el uso del concepto de elipse de adherencia. Las expresiones finales de la velocidad límite deducida a partir de un modelo de 5 grados de libertad son:

$$v^2 = gR \cdot \left(\left(1 - \frac{H}{l_2} \cdot \theta \right) \cdot \lambda_{lat} \cdot \mu_{max} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\theta}{\lambda_{lon} \cdot \mu_{max}} \right)^2} + \varphi \right) \quad \theta \geq 0$$

$$v^2 = gR \cdot \left(\left(1 + \frac{H}{l_1} \cdot \theta \right) \cdot \lambda_{lat} \cdot \mu_{max} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\theta}{\lambda_{lon} \cdot \mu_{max}} \right)^2} + \varphi \right) \quad \theta < 0$$

donde l_1 y l_2 son las distancias horizontales entre los ejes delantero y trasero y el centro de gravedad, cuya altura respecto al suelo es H , λ_{lon} y λ_{lat} son coeficientes adimensionales que matizan la adherencia máxima que se utiliza y φ es el peralte de la carretera.

Cálculo por medio del modelo tridimensional de vehículo

Partiendo de las observaciones realizadas por [10] sobre las carencias observadas al emplear las fórmulas simplificadas de limitación por aceleración lateral no compensada, velocidad de derrape y velocidad crítica, se estima necesario considerar aspectos como el perfil en alzado de la carretera (rampas y peraltes), las dinámicas longitudinales y transversales del vehículo y la adherencia utilizada y disponible en los neumáticos.

De este modo, un modelo tridimensional de vehículo basado en un sistema de 14 grados de libertad modificado [16] se hace “circular” por el mapa electrónico de la carretera, para lo que se considera la

hipótesis de que el conductor sigue la línea media del trazado. La velocidad de circulación se controla de forma que la aceleración lateral no supere, en ningún caso los 3 m/s^2 en las curvas [32] y la adherencia utilizada del neumático más desfavorable no se encuentre fuera del límite marcado por la elipse de adherencia segura. Los ejes de la elipse de adherencia serán los valores calculados empleando los coeficientes de Calspan recogidos en [26]. La elipse segura se considerará de ejes iguales a un 80 % de los anteriores.

El perfil de velocidad del modelo al recorrer cada una de las singularidades de la carretera garantiza que los límites de los indicadores de riesgo de aceleración lateral sin compensar y adherencia utilizada no son superados. Estos criterios son de aplicación en secciones curvas y presentan la ventaja de ser límites objetivos que un conductor medio percibe como razonables.

Fase 2: Corrección de la velocidad segura en curvas enlazadas

En el caso en el que dos tramos con velocidad limitada estén muy próximos, puede ser necesario modificar la velocidad límite con el fin de permitir la adecuación correcta de la velocidad de forma suave por parte del conductor cuando circule por ellas. Atendiendo a la normativa de trazado de carreteras [23] y señalización vertical [24], se establece como proceso de adecuación suave de la velocidad aquel que implique una deceleración de 2 m/s^2 (la normativa indica $7 \text{ km/h/s} = 1.94 \text{ m/s}^2$) aceptando un tiempo de reacción de 2 segundos.

Así, dadas dos singularidades consecutivas, se establecen las siguientes situaciones:

1. En el caso de que la velocidad segura de la segunda singularidad sea mayor que la de la primera, se considerarán singularidades separadas, con independencia de la distancia que las separe.
2. En el caso de que la velocidad segura de la primera singularidad sea mayor que la de la segunda se plantean dos posibilidades:
 - a) Si la distancia entre el final de la primera y el principio de la segunda es superior a la distancia que recorrería el vehículo, a la velocidad de la segunda singularidad, en el tiempo de reacción, entonces se minorará la velocidad de la primera, si fuese necesario, de forma que sea posible la adecuación de la velocidad, con las condiciones antes referidas, en la distancia existente entre singularidades.
 - b) Si la distancia entre el final de la primera y el principio de la segunda es inferior a la distancia que recorrería el vehículo a la velocidad de la segunda singularidad en el tiempo de reacción, entonces se enlazarán ambas singularidades en una única tomando el menor valor de velocidad

Se revisan los valores de las velocidades seguras en las singularidades empezando desde la última de la trayectoria y recorriendo ésta en sentido inverso.

Fase 3: Velocidad limitada por la distancia de visibilidad

El criterio utilizado en la fase 1 no limita la velocidad en recta ni en curvas de amplio radio. Para tales situaciones, aunque también de aplicación en secciones curvas, se usa el tercer indicador de riesgo: la visibilidad.

Se establece como criterio de circulación segura en cuanto a visibilidad el hecho de que el conductor sea capaz de detener el vehículo en su distancia de visibilidad, con lo que evitaría la colisión con un obstáculo que se encontrase en la calzada más allá de su zona de visión. La distancia de visibilidad se ve condicionada por la geometría de la carretera (cambios de rasante) y el entorno (árboles, edificaciones, etc), factores meteorológicos y condiciones de luminosidad. Así, de cada punto de la carretera se conoce la distancia de visibilidad, la velocidad segura deducida en la fase 2 y una cota de la adherencia remanente en cada neumático disponible para el frenado del vehículo tras haber

considerado los esfuerzos laterales en las secciones curvas. Por otra parte, el tiempo de reacción del conductor se considerará igual a 2 segundos, tal y como establece la Norma de trazado de carreteras [23] para el cálculo de la visibilidad de parada.

Con los datos anteriores, es posible calcular, en cada punto del trazado, la velocidad de circulación máxima que permite la detención del vehículo dentro de la distancia de visibilidad. Debe hacerse notar que, en el caso de curvas, sólo tiene sentido el resultado para velocidades inferiores a la calculada en la fase 2. Además, obsérvese que el procedimiento seguido tiende a estimar la velocidad segura ligeramente por defecto ya que la propia reducción de velocidad en el proceso de frenado implica una menor utilización de la adherencia en sentido lateral, disponiéndose, pues, de una mayor adherencia longitudinal remanente.

Fase 4: Construcción del mapa completo de velocidades seguras

El mapa de velocidades completo incluye la siguiente información:

- Velocidad limitada en curvas
- Velocidad limitada por distancia de visibilidad
- Velocidad legal

3.4. Aplicación a la carretera M-104

La carretera M 104 corresponde a una carretera convencional de una única calzada y doble sentido de circulación, con un carril en cada sentido. El límite genérico de velocidad es de 90 km/h.

Limitación en curvas

Atendiendo a la definición de curva dada anteriormente, en la carretera analizada existen 48 curvas fuera de poblado excluyendo las propias de una rotonda intermedia. La tabla 1 muestra los límites obtenidos al hacer recorrer al modelo matemático de vehículo el mapa electrónico generado de la carretera.

Tabla 1: Velocidades de paso mínimas por curva

Índice curva	Veloc (km/h)	Índice curva	Veloc (km/h)	Índice curva	Veloc (km/h)	Índice curva	Veloc (km/h)	Índice curva	Veloc (km/h)	Índice curva	Veloc (km/h)
1	92	9	120	17	149	25	91	33	140	41	74
2	93	10	115	18	160	26	74	34	70	42	65
3	114	11	91	19	95	27	60	35	65	43	135
4	91	12	122	20	110	28	62	36	131	44	72
5	91	13	91	21	169	29	82	37	61	45	55
6	150	14	104	22	121	30	97	38	67	46	108
7	143	15	107	23	111	31	77	39	69	47	99
8	91	16	134	24	108	32	83	40	108	48	147

Resulta de interés establecer comparaciones entre los límites anteriores y la señalización de la carretera en las secciones curvas así como con los resultados de aplicar los métodos simplificados. Para dicho estudio comparativo, sólo se considerarán aquellas curvas en las que la limitación calculada por medio del modelo de dinámica vehicular sea inferior a los 90 km/h, velocidad genérica de la carretera.

En primer lugar, se comparan los resultados con la señalización de velocidad limitada recogida en el mapa electrónico (tabla 2). Debe hacerse notar además que, en virtud de las normas sobre señalización vertical, las limitaciones específicas en curvas deben seguir la expresión basada en la aceleración lateral no compensada antes presentada [24].

Tabla 2: Comparación entre velocidades seguras y señalización (velocidades en km/h)

Curva	V. segura modelo	Expresión MOPU [24]	Señalización		
			Límite	Recomendación	Señal peligro
26	74	65.83	90	70	No
27	60	53.71	60		No
28	62	56.22	60		No
29	82	74.43	90		No
31	77	69.76	90	70	Sí
32	83	75.49	90	70	Sí
34	70	63.91	90		No
35	65	59.38	90		No
37	61	55.49	90		Sí
38	67	60.25	90		No
39	69	61.58	90		No
41	74	65.03	90		No
42	65	59.32	90		No
44	72	64.78	90	60	Sí
47	55	50.57	90	60	Sí

De la tabla anterior se pueden extraer las siguientes conclusiones para el caso de la carretera analizada:

1. Si se tiene en cuenta que la limitación genérica de la vía es de 90 km/h, se observa una carencia de señalización de velocidad limitada en la mayoría de las curvas del trayecto analizado, aún en aquellos casos en los que la expresión recogida en [24] la aconseja. Idéntica observación se puede hacer referente a la señalización de peligro por curvas.
2. Los límites obtenidos por medio del modelo de simulación son mayores que los dados por la expresión usada por el MOPU, ya que, se ha justificado el uso de un límite para la aceleración lateral sin compensar de 3 m/s^2 frente al valor de $0.25g$ de [24]
3. Las velocidades seguras de la tabla 1 se acercan a las limitaciones y recomendaciones específicas de la vía, cuando éstas están presentes, de forma que los límites seguros calculados corroboran los límites presentes en la carretera y los complementan ya que la señalización de la vía es insuficiente.

Las carencias en la señalización puestas aquí de manifiesto generan desconfianza en el conductor hacia las mismas lo que se traduce en que los límites, recomendaciones y advertencias de peligro establecidos por la señalización sean frecuentemente superados e ignorados [3][4][13][35].

Por otra parte, se comparan los resultados obtenidos con los que arrojan las formas simplificadas de cálculo (tabla 3). Se escoge un valor del coeficiente de adherencia lateral de 0.6 para las velocidades de derrape y crítica mientras que, para las fórmulas de [10], se asumirá que los conductores, en buenas condiciones de la calzada y circulación normal, utilizan la mitad de la adherencia disponible.

Tabla 3: Comparación de los resultados dados por el modelo de simulación con los valores obtenidos por los métodos simplificados de cálculo (velocidades en km/h)

Curva	V. segura modelo	Velocidad de derrape	Velocidad crítica	Gambard [8]		Glaser y Aguilera [10]
				Vm	Va	
27	74	102.58	102.14	71.89	83.86	69.73
28	60	82.79	81.76	62.19	71.74	57.19
29	62	86.03	82.75	62.81	72.50	60.00
30	82	115.80	115.38	75.69	88.69	81.03
32	77	106.99	105.46	72.98	85.24	74.23
33	83	114.97	112.12	74.89	87.66	79.80
35	70	96.91	93.90	68.65	79.79	67.86
36	65	90.82	89.10	66.37	76.93	63.18
38	61	85.83	85.24	64.29	74.33	59.66
39	67	92.29	90.76	67.20	77.96	64.27
40	69	94.63	93.54	68.49	79.59	65.88
42	74	101.50	102.39	71.97	83.97	70.55
43	65	90.85	87.48	65.52	75.87	63.80
45	72	100.24	99.31	70.86	82.57	70.60
46	55	75.42	70.95	54.23	61.99	54.34

Las principales conclusiones que se extraen son:

1. La velocidad de derrape y la velocidad crítica presentan diferencias poco significativas (diferencia promedio del 2%), ya que éstas radican en la consideración o no del peralte de la vía, y, en el caso de la carretera analizada, el efecto del peralte es bastante reducido.

Como era esperable, las velocidades anteriores son considerablemente superiores a la velocidad segura calculada por el modelo de simulación ya que, con la superficie de la calzada en buenas condiciones, la restricción sobre la aceleración lateral máxima es más estricta que la correspondiente al agotamiento lateral de la adherencia. Esta conclusión ya no sería aplicable de una forma tan categórica en el caso de calzada deslizante.

Según [30], la velocidad límite de derrape está sujeta a los errores de los parámetros que intervienen en su expresión. En concreto, para los valores de peraltes de la carretera, el error sobre la velocidad límite es del mismo orden que la desviación absoluta entre el valor del peralte real y el medido. Sin embargo, una mala estimación del coeficiente de adherencia lateral introduce mayores errores, de forma que una desviación de 0.1 en dicha estimación conduce a discrepancias en la velocidad límite en el entorno del 8%, en función del peralte.

2. La velocidad media de paso por curva establecida en [8] es ligeramente inferior a la deducida por el modelo de simulación. Téngase en cuenta que ese resultado se deduce a partir de resultados prácticos de hace dos décadas, siendo los vehículos de entonces, inferiores, en general, a los actuales en aspectos de seguridad y estabilidad.
3. En cuanto a los resultados obtenidos por las fórmulas de [10], se observa una alta correlación con los resultados deducidos de la simulación con el modelo tridimensional. La diferencia máxima es de 5.8% y la promedio es 3.2%. De todas formas, que estas comparaciones están sujetas a los valores adoptados para la adherencia utilizable y los límites admisibles de aceleración lateral.

Corrección en curvas enlazadas

A continuación, se analiza la influencia de unas singularidades sobre otras. Se debe observar que la influencia de una curva puede implicar variaciones en más de una singularidad anterior de la carretera de forma que se hace necesario el estudio en sentido inverso al de circulación.

Limitación por distancia de visibilidad

Se calcula la velocidad máxima admisible que garantice la detención del vehículo en la distancia de visibilidad sin que se sobrepasen los esfuerzos límite en los neumáticos tal y como se indicó con anterioridad. Para el caso de las zonas con alineación curva, sólo se analizan velocidades inferiores a las establecidas en la misma.

Mapa de velocidades seguras completo

Se completa el mapa de velocidades seguras con la información de la velocidad limitada por curva y la velocidad limitada por distancia de visibilidad. Además, se incluye la información de la velocidad legal. La figura 1 muestra los perfiles de la velocidad segura por curvas y por restricciones de visibilidad junto a las limitaciones legales a lo largo de un tramo de la carretera M 104.

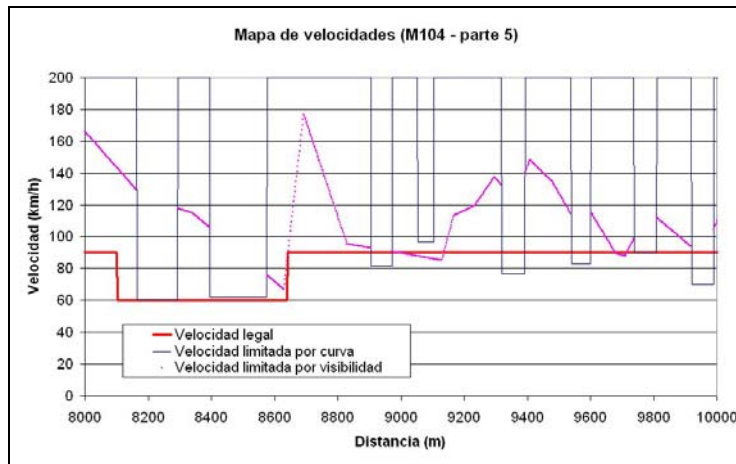


Figura 1: Mapa de velocidades legales y velocidades seguras de la carretera M 104

4. Conclusiones

De la aplicación de la metodología de construcción del mapa de velocidades seguras a un tramo de carretera concreto, (carretera M 104), se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Se ha observado que la señalización de la vía presenta claras carencias:
 - secciones de evidente riesgo no están indicadas (no existe señalización de peligro ni velocidades máximas limitadas o recomendadas en ellas)
 - señalizaciones de velocidad limitada o recomendada no vienen acompañadas de la señalización de peligro que las motiva y no aparecen señales de fin de limitación lo que resulta confuso para el conductor.
2. El mapa de velocidades seguras completa, racionaliza y aclara la señalización ya existente.
2. Los resultados obtenidos han sido comparados con otros modelos más simplificados. Resulta de interés la alta correlación con los valores que proporciona la metodología de [10] fundamentada también en un modelo de vehículo.
3. El procedimiento de construcción del mapa de velocidades seguras se basa en la hipótesis de que el vehículo recorre la línea media del trazado de la carretera, lo que, en realidad, no es completamente cierto ya que, la forma de negociar las curvas está muy relacionada con el estilo de conducción [32].
4. La corrección de los límites de paso por curvas cercanas debe abordarse empezando por el final de la trayectoria y recorriéndola en sentido inverso al de la marcha.
5. Las limitaciones por distancia de visibilidad se han tenido en cuenta fuera de las curvas, o dentro de ellas si la velocidad calculada es inferior a la de paso por curva.

Por último, cabe indicar que el mapa de velocidades seguras presentado está siendo empleado en un sistema inteligente embarcado de aviso al conductor en experiencias piloto en condiciones reales de circulación [16].

Referencias

- [1]. BATAVIA, P. H. (1998). *Driver adaptive warning systems*. Pittsburgh: Tesis Doctoral, Carnegie Mellon University.
- [2]. BELMONT, D. M. (1953). *Effect of average speed and volume on motor vehicle accidents on two-lanes tangents*. Proceedings of Highway Res. Board. Vol 32, pp 383-395.

- [3]. CHOWDURY, M. A., WARREN, D. L., BISSELL, H. Y TAORI, S. (1998). *Are the criteria for setting advisory speeds on curves still relevant?* Institution of Transportation Engineers. 68 (2)
- [4]. DONALD, D. (1998). *Be warned! A review of curve warning signs and curve advisory speeds.* ARRB Transport Research Report No ARR 304. Melbourne, Australia.
- [5]. FELIPE, E. Y NAVIN, F. (1998). *Automobiles on Horizontal Curves: Experiments and Observations.* Transportation Research Board's 77th Annual Meeting. Enero 1998
- [6]. FILDES, B. N., RUMBOLD, G. Y LEENING, A. (1991). *Speed behaviour and drivers' attitude to speeding.* Australia: Monash University Accident Research Center.
- [7]. FINCH, D. J., KOMPFFNER, P., LOCKWOOD, C. R. Y MAYCOCK, G. (1994). *Speed, speed limits and accidents.* TRL Project Report 58. Crowthorne: Transport Research Laboratory.
- [8]. GAMBARD, I. M. (1985). *Vitesse pratique et géométrie de la route.* Service d'études Techniques des routes et autoroutes. Francia: septiembre 1985
- [9]. GIVET (1994). *Influencia de la velocidad en los accidentes de tráfico y sus consecuencias.* Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales
- [10]. GLASER, S. Y AGUILERA, V. (2003). *Vehicle – infrastructure – driver speed profile: towards the next generation of curve warning systems.* 10th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services. Madrid: 16 – 20 Noviembre 2003
- [11]. GOMI, Y. (2001). *Digital map data from vehicle probes.* LLC, 7 Agosto 2001.
- [12]. HAUER, E. (1971). *Accidents, Overtaking and Speed Control.* Accident Analysis and Prevention, Vol. 3, pp. 1–13.
- [13]. HUGHES, P. K. Y COLE, B. L. (1984). *Search and attention conspicuity of road traffic control devices.* Australian Road Research 14, 1–9.
- [14]. IVEY, D. L., LEHTIPUU, E. K. Y BUTTON, J. W. (1975). *Rainfall and visibility. The view from behind the wheel.* Journal of Safety Research. Vol 7, N° 4
- [15]. JIMÉNEZ, F. Y APARICIO, F. (2005). *Determinación precisa de la geometría de la carretera mediante vehículo de serie instrumentado circulando a lata velocidad.* Actas del XVII Congreso Internacional INGEGRAF-ADM. Sevilla, 1-3 Junio 2005
- [16]. JIMÉNEZ, F. (2006). *Sistema de adaptación de la velocidad de los vehículos automóviles a la geometría de la carretera.* Madrid: Tesis Doctoral, ETSII, Universidad Politécnica de Madrid.
- [17]. KALLBERG, V-P Y TOIVANEN, S. (1998). *Framework for assessing the impacts of speed in road transport.* Finlandia: VTT Communities and Infrastructure
- [18]. KLOEDEN, C. N. Y MCLEAN, A. J. (2001). *Rural speed and crash risk.* Road Safety research, policing and education. Melbourne, 19-20 Noviembre 2001
- [19]. LECHNER, D., FERRANDEZ, F. Y FLEURY (1983). *Manoeuvres et sollicitations en situation de urgente.* Francia: INRETS
- [20]. LÓPEZ, A. (1994). *Predicción de situaciones inseguras en vehículos automóviles.* Madrid: Tesis Doctoral ETSII, Universidad Politécnica de Madrid
- [21]. MAYCOCK, G., BROCKLEBANK. P. Y HALL. (1998). *Road layout design standards and driver behaviour.* TRL Report 332, Crowthorne, Reino Unido.
- [22]. MAYSER, C., EBERSBACH, D. Y DIETZE, M. (2003). *To drive the appropriate speed in curves.* 10th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services. Madrid: 16 – 20 Noviembre 2003
- [23]. MOPU (2000). *Trazado. Instrucción de carreteras. Norma 3.1-IC.* Madrid: Centro de publicaciones del Ministerio de Fomento.

- [24]. MOPU (2000). *Señalización vertical. Instrucción de carreteras. Norma 8.1-IC*. Madrid: Centro de publicaciones del Ministerio de Fomento.
- [25]. NALECZ, A. G. (1987). *Investigation into the effects of suspension design on stability of light vehicles*. SAE paper n° 870497.
- [26]. NALECZ, A. G. Y BINDEMANN, A. C. (1988). *Analysis of the dynamic response of four wheel steering vehicle at high speed*. International Journal of Vehicle Design. Vol 9, n° 2
- [27]. NILSSON, G. (1990). *Speed and safety. Research results from the Nordic countries*. Linköping, Suecia: VTI
- [28]. OLSON, P. L. Y SIVAK, M. (1983). *Comparison of headlamp visibility distance and stopping distance*. Perceptual and Motor Skills. Vol 57, pp 1177-1178.
- [29]. PÁEZ, F.J. (1999). *Modelo de predicción de ocurrencia de accidentes en tramos de carretera mediante la medición continua de variables de influencia*. Madrid: Tesis Doctoral, ETSII, Universidad Politécnica de Madrid.
- [30]. POMERLEAU, D., JOCHEM, T., THORPE, C., BATAVIA, P., PAPE, D., HADDEN, J., MCMILAN, N., BROWN, N. Y EVERSON, J. (1999). *Run-off-road collision avoidance using IVHS countermeasures. Final report*. Washington: NHTSA
- [31]. QUIMBY, A., MAYCOCK, G., PALMER, C. Y GRAYSON, G. (1999) *Drivers' speed choice – an in depth study*. TRL report 326. Londres, Reino Unido.
- [32]. REVUE, A., NASHASHIBI, F. Y LAURGEAU, C. (2003). *Contribution of GIS to danger prevention in curved roads*. 10th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services. Madrid: 16 – 20 Noviembre 2003
- [33]. SALUSJARVI, M. (1988). *The speed limit experiments on public roads in Finland*. Proceedings Road and Traffic Safety in two continents. Linköping, Suecia
- [34]. SHINAR, D. (1978). *Psychology on the Road: The Human Factor in Traffic Safety*. Nueva York: Wiley
- [35]. SHINAR, D. Y DRORY, A. (1983). *Sign registration in daytime and nighttime driving*. Human Factors 25, 117–122.
- [36]. SLEDGE, N. H. Y MARSHEK, K. M. (1997). *Formulas for estimating vehicle critical speed from yaw marks. A review*. SAE paper n° 971147.
- [37]. SOLOMON, D. (1964). *Accidents on main rural highways related to speed, driver and vehicle*. Washington: Bureau of Public Roads, Department of Commerce
- [38]. TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1998). *Managing speeds. Review of current practice for setting and enforcing speed limits*. Washington: National Research Council
- [39]. T'SIOBEL, S. (2003). *The road to safety maps*. 10th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services. Madrid: 16 – 20 Noviembre 2003
- [40]. T'SIOBEL, S. Y VAN ESSEN, R. (2004). *The map enabled ADAS future*. FISITA World Automotive Congress, Barcelona, 23-27 Mayo 2004.
- [41]. VTT Communities and Infrastructure (1998). *MASTER: Managing Speeds of Traffic on European Roads*. Finlandia: VTT Communities and Infrastructure
- [42]. YERPEZ, J. Y FERRANDEZ, F. (1986). *Road characteristics and safety. Identification of the part played by road factors in accident generation*. Arcueil: INRETS.