



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS



ANEJO N°6

SEGURIDAD VIAL

ESTUDIOS PARA LA REDACCIÓN DEL PROYECTO BÁSICO DE LA VARIANTE DE LA CARRETERA CV-35 A SU PASO POR EL MUNICIPIO DE CHELVA (PROVINCIA DE VALENCIA)
ALTERNATIVA NORTE



ANEJO 6: SEGURIDAD VIAL

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....2

2. PERFILES DE VELOCIDAD DE OPERACIÓN.....2

2.1. Confección de los perfiles de velocidad de operación.....2

 2.1.1. Velocidad de operación en curvas.....3

 2.1.2. Velocidad de operación en rectas.....3

 2.1.3. Tasas de aceleración y deceleración.....3

 2.1.4. Perfil de velocidad de operación.....3

 2.1.5. Comprobación de la consistencia.....5

3. HOMOGENEIDAD DE LA DEFLEXIÓN ACUMULADA EN EL TRAZADO. TRAMIFICACIÓN.....6

4. ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE ACCIDENTES MEDIANTE FUNCIONES SPF.....7

APÉNDICE I. PERFILES DE VELOCIDAD DE OPERACIÓN.



1. INTRODUCCIÓN.

En todo proyecto de trazado de una carretera se debe tener en cuenta su seguridad vial. En los últimos años la tendencia de accidentes, accidentes con víctimas y de muertos ha ido aumentando pese a su reducción en los años de recesión económica entre 2007 y 2011.

A nivel estadístico, los fallecimientos entre enero y abril del presente año se sitúan en 363, que significan 40 más que en el año anterior, tal y como muestra la siguiente figura, que contiene un extracto del cuadro comparativo de accidentes mortales entre 2015 y 2016, con datos proporcionados por la Dirección General de Tráfico:

Periodo desde	01/01/2015								
Periodo hasta	25/05/2016								
Mes	Accidentes (AMVI24)		Acumulados (AMVI24)		Muertos (AMVI24)		Acumulados (AMVI24)		
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	
Enero	80	79	80	79	88	90	88	90	
Febrero	69	79	149	158	79	84	167	174	
Marzo	75	81	224	239	80	100	247	274	
Abril	71	69	295	308	76	89	323	363	
Mayo	84		379		98		421		
Junio	74		453		82		503		
Julio	104		557		113		616		
Agosto	97		654		113		729		
Septiembre	108		762		120		849		
Octubre	85		847		90		939		
Noviembre	92		939		101		1.040		
Diciembre	84		1.023		91		1.131		

Figura 1. Cuadro comparativo de accidentes con víctimas 2015-2016

Con estos datos es sencillo comprobar el importante problema de salud pública que consisten los accidentes de tráfico, repercutiendo en un enorme coste para la sociedad, en costes económicos y sociales.

La política vial de España se centra, según la Dirección General de Tráfico, en la llamada “Visión 0”, consecuencia de un sistema que reduce la posibilidad de accidentes y sus lesiones. Dicha política vial supone la necesidad de implicar a todos los agentes sociales responsables a fin de una actuación integral que garantice asegurar la perspectiva multidisciplinar de la materia.

El Plan Mundial vigente para los años 2011 a 2020 proclama el decenio de acción para la seguridad vial con el objetivo de reducir las víctimas en accidentes de tráfico previstas, aumentando las actividades en todos los ámbitos.

Paralelamente y a menor escala, es conocido en España el movimiento “Ponle freno”, promovido por entidades privadas, administraciones públicas y organizaciones, y cuenta en su manifiesto con el objetivo “2020 cero víctimas”.

Por esto es importante plantear la seguridad vial desde la fase de concepción de una carretera, con el objetivo de conseguir un diseño que permita una conducción cómoda, sin discontinuidades bruscas en las características de la vía que puedan sorprender al usuario.

2. PERFILES DE VELOCIDAD DE OPERACIÓN.

2.1 Confección de los perfiles de velocidad de operación.

Un elemento esencial en una carretera, desde su fase de concepción a la fase de explotación es la velocidad. La velocidad de diseño determina las características de la vía como su sección transversal, radios mínimos y necesidad de disponer elementos auxiliares como lechos de frenado, carriles para circulación de vehículos lentos o avisadores acústicos. Además, la velocidad es un factor recurrente en los accidentes, por lo que es crucial buscar un diseño que facilite la conducción sin cambios bruscos de velocidad.

Sin embargo, reducir la velocidad no es siempre la solución para reducir los accidentes. Reducir la velocidad de circulación provoca, entre otras cosas, la dispersión de velocidades entre los vehículos más lentos y los que son capaces de hacerlo más rápido, y aumentan también las distracciones aumentando con ello el riesgo de accidente.

El comportamiento de los conductores en la vía es difícilmente calculable con exactitud si esta no está construida, mientras que en los casos de vías existentes es sencillo medir la velocidad de circulación de sus usuarios. Por ello en los proyectos de carreteras se emplea el concepto de velocidad de operación. Esta velocidad equivale al percentil 85 de la distribución de velocidades de toda la muestra de conductores analizada, indicando que únicamente un 15% de los conductores teóricamente circulará más rápido que la velocidad de operación.

La velocidad de operación se obtiene mediante métodos teóricos que incluyen parámetros diferentes en recta, curva y clotoide, cuyos resultados finales se plasman en un perfil continuo de velocidad de operación.

La seguridad vial, tal y como se ha comentado, también está presente durante el diseño de una carretera. Existen criterios de consistencia que se aplican al perfil de velocidad de operación en aquellos puntos que denotan falta de cohesión en el diseño, como frenadas bruscas o curvas con un radio fuera del habitual dentro del tramo correspondiente.



En el caso actual de la variante de la CV-35 a su paso por el municipio de Chelva se realizarán perfiles de velocidad de operación para todo el recorrido de la variante, uno para cada sentido de la marcha, pues se comprobará que no son simétricos.

2.1.1. Velocidad de operación en curvas.

Los modelos teóricos existentes para el cálculo de la velocidad de operación asumen que el cambio de velocidad durante las diferentes zonas de un tramo se realiza siempre en las rectas o clotoides, manteniendo la velocidad uniforme dentro de las curvas. De este modo, las aceleraciones y deceleraciones necesarias para trazar cada curva correctamente y enlazar con los elementos anteriores y siguientes a la misma quedan siempre fuera de la propia curva. Estas variaciones en la velocidad son conocidas en estos modelos como “Tasas de aceleración y deceleración”.

Para el cálculo de la velocidad de operación en curvas se utiliza el modelo teórico de *Pérez et al. (2010)* en el cual la velocidad en las curvas depende exclusivamente del radio de las mismas de la forma siguiente:

$$v_{85} = 97.4254 - \frac{3310.94}{R}; 400 \text{ m} < R \leq 950 \text{ m}$$

$$v_{85} = 102.048 - \frac{3990.26}{R}; 70 \text{ m} < R \leq 400 \text{ m}$$

La mayor parte de los radios del trazado son de menor radio, siendo necesario entrar en la segunda ecuación del modelo, pero existen también curvas de mayor radio cuya velocidad de operación es necesario obtener mediante la primera ecuación.

2.1.2. Velocidad de operación en rectas.

Tal y como se ha comentado, la velocidad de operación en rectas y clotoides incluye las tasas de aceleración. Aun así, existen tramos de estos elementos donde la velocidad es constante. En los modelos utilizados de cálculo de la velocidad de operación de las rectas, *Pérez et al. (2010)*, los parámetros de los que depende dicha velocidad son la velocidad de operación de la curva anterior, la longitud de la recta en cuestión y el radio de la curva anterior, tal y como se muestra a continuación:

$$v_{85} = v_{85C} + (1 - e^{-\lambda \cdot L}) * (110 - v_{85C})$$

$$\lambda = 0.00135 + (R - 100) * 7.00625 * 10^{-6}$$

Siendo:

v_{85C} = Velocidad de operación de la curva anterior

R = Radio de la curva anterior

L = Longitud de la recta actual

2.1.3. Tasas de aceleración y deceleración.

Los modelos de obtención de las tasas de aceleración y deceleración son los menos precisos y son los más complejos de aplicar, pues pretenden modelizar la aceleración y frenado del gran grueso de la muestra del parque de vehículos, algo difícil de cuantificar de raíz. Los modelos a utilizar, son los de *Pérez, García y Camacho (2010)*, cuya variable dependiente es el radio de la curva anterior y tienen la formulación siguiente:

$$d_{85} = 0.313 + \frac{114.436}{R}$$

$$a_{85} = 0.417 + \frac{65.936}{R}$$

Las tasas de aceleración y deceleración obtenidas son las que hacen posible la obtención de un perfil de velocidad de operación continuo, uniendo las velocidades de curvas y rectas.

2.1.4. Perfil de velocidad de operación

Con las herramientas descritas es posible la obtención de un perfil de velocidad de operación con el apoyo del estadillo de alineaciones tanto de la variante como de la carretera actual. El perfil de velocidad de operación que se obtiene es un gráfico en cuyo eje de abscisas se representan los PPKK de la variante, y en cuyo eje de ordenadas se representa la velocidad.

Cabe reseñar que el proceso de obtención del perfil de velocidad es iterativo junto con el control de la consistencia y, si es necesario, del rediseño geométrico. Una variación en el estado de alineaciones provoca el cambio de lugar de las curvas y su radio, modificando su velocidad y en consecuencia el resultado en el perfil de velocidad. De esta forma se obtiene un trazado con mayor nivel de cohesión, aspecto que se comenta más adelante.

El proceso de obtención del perfil de velocidad como tal se ha realizado mediante la consideración de la velocidad en cada metro del trazado de la variante desde el PK 0+000 hasta el PK final. Mediante la introducción de los modelos teóricos ya comentados en una hoja de cálculo es posible obtener la velocidad de cada metro según se trate de una curva, recta o clotoide.

Por sencillez, inicialmente se han obtenido las velocidades de los tramos rectos y curvos, a los que posteriormente se les aplican los coeficientes de aceleración y deceleración. En



este primer paso del proceso no se obtiene un perfil de velocidad continuo, sino escalones correspondientes a velocidades constantes en cada elemento del trazado.

Por último, el proceso de adición de tasas de aceleración y deceleración al perfil de velocidad parcialmente terminado es prácticamente individualizado a cada unión recta-curva. La velocidad de inicial será la del elemento con menor velocidad, a la que se le aplicará la correspondiente tasa, metro a metro, hasta converger a la velocidad del elemento con mayor velocidad de operación de los dos.

De esta forma, en una unión recta-curva con elevada diferencia de velocidades de operación es posible que la longitud de la alineación no fuera suficiente, siendo imposible que la velocidad del elemento con mayor velocidad llegue a alcanzarse. En esos casos aparece un pico en el perfil de velocidad de operación. Ese pico será superior, en caso de una insuficiencia de distancia en recta, o inferior, en caso de insuficiencia de distancia en curva.

Los perfiles de velocidad para los sentidos crecientes y decrecientes se muestran en la figura siguiente:

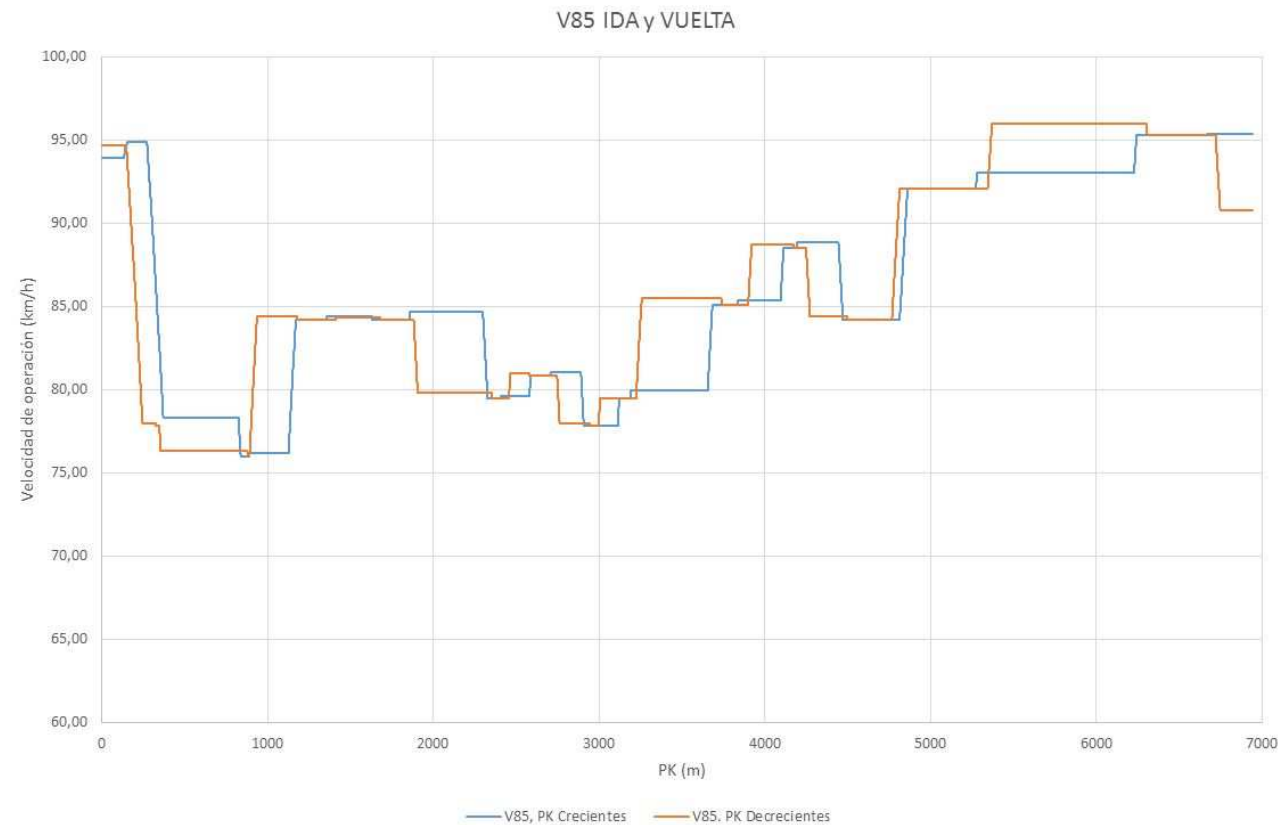


Figura 2. Perfiles de velocidad de operación. Ambos sentidos

En el Apéndice I quedan adjuntos los perfiles de velocidad completos para todo el trazado de la variante y en ambos sentidos.

2.1.5. Comprobación de la consistencia.

La consistencia mide la adecuación de las expectativas de los conductores y el comportamiento real de la carretera.

Las expectativas de los conductores se dividen en expectativas *a priori* y expectativas *ad hoc*. Las expectativas *a priori* se crean a partir de la experiencia pasada del propio conductor, mientras que las expectativas *ad hoc* son creadas en particular para la vía que se está recorriendo.

Para evaluar la consistencia se aplican distintos criterios, siendo los más utilizados los basados en la velocidad de operación. Los criterios de consistencia pueden ser locales y globales. Para la evaluación de la consistencia local en el perfil de velocidad de operación de la variante se utilizan los criterios de consistencia de Lamm.

Los criterios de consistencia local de Lamm son los siguientes:

- Criterio I: Diferencia entre velocidad de operación (V85) y velocidad de diseño (Vd). Es un criterio menos extendido en su uso que el Criterio II. En él se evalúan localmente las diferencias entre la velocidad de diseño y la velocidad de operación, con los umbrales de aceptación siguientes:

Criterio	Condición	Modificaciones en diseño
$V85 - Vd \leq 10 \text{ km/h}$	BUENA	No son necesarias
$10 \text{ km/h} < V85 - Vd \leq 20 \text{ km/h}$	ACEPTABLE	Ajuste del peralte o distancia de parada
$V85 - Vd > 20 \text{ km/h}$	MALA	Rediseño del trazado

Tabla 1. Criterio I de Lamm. Consistencia local.

- Criterio II: Diferencia de velocidad de operación entre elementos consecutivos. Es el criterio de consistencia de local de Lamm más utilizado. Se comprueba mediante este criterio que la diferencia de velocidad de operación entre dos elementos del trazado consecutivos ($V85_i$ e $V85_{i+1}$) no es excesiva, facilitando una conducción suave, sin cambios bruscos de velocidad y evitando sorprender al usuario.

Criterio	Condición	Modificaciones en diseño
$V85_i - V85_{i+1} \leq 10 \text{ km/h}$	BUENA	No son necesarias
$10 \text{ km/h} < V85_i - V85_{i+1} \leq 20 \text{ km/h}$	ACEPTABLE	Señalización o rediseño
$V85_i - V85_{i+1} > 20 \text{ km/h}$	MALA	Rediseño del trazado

Tabla 2. Criterio II de Lamm. Consistencia local



En el caso del análisis de la seguridad vial del trazado de la variante se ha empleado el criterio de Lamm II, por su uso más extendido y su composición más centrado en la velocidad de operación y la relación entre elementos consecutivos de forma aislada.

A través del perfil de velocidad de operación se muestran las zonas según su consistencia local según su consistencia:

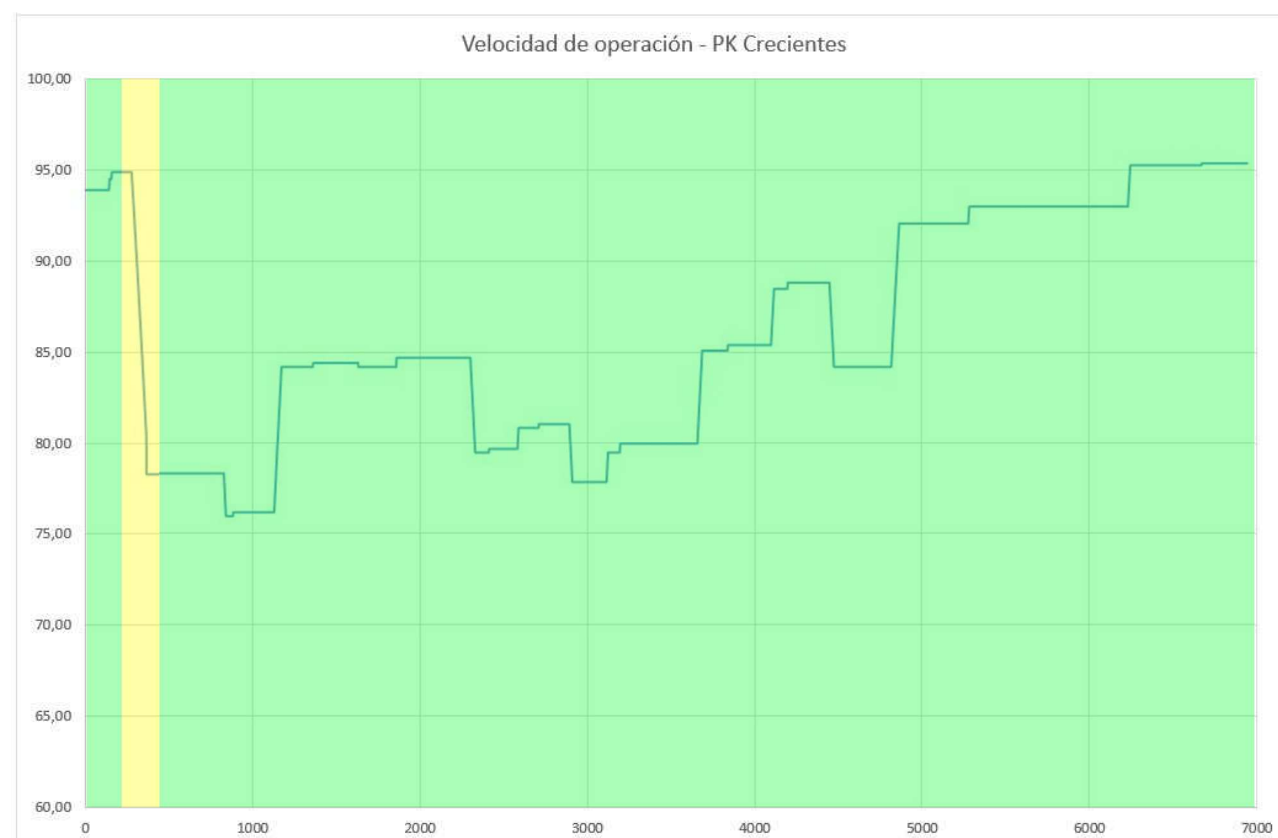


Figura 3. Criterio II de Lamm sobre el perfil de velocidad de operación. PK crecientes.

De igual forma, en el sentido decreciente de PK el perfil no es simétrico, pero presenta consistencias similares, pues la estructura clotoide-curva-clotoide es simétrica en todos los casos.

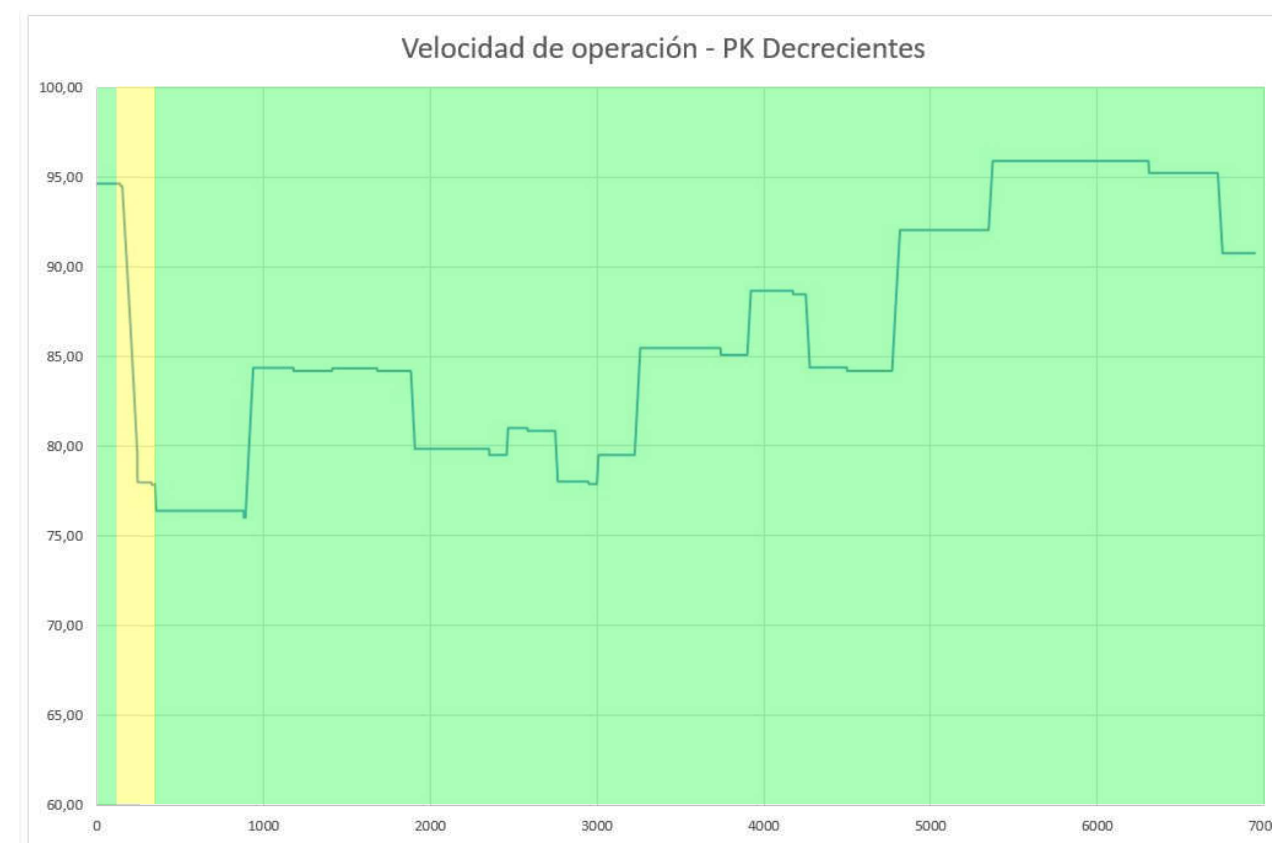


Figura 4. Criterio II de Lamm sobre el perfil de velocidad de operación. PK decrecientes.

Tal y como queda señalado en las figuras anteriores, la consistencia es buena en todo el trazado de la variante en ambos sentidos, excepto en el PK correspondiente a la curva que forma el nudo de bifurcación. Esta zona del trazado se encuentra fuertemente condicionada por el espacio reducido que existe para el trazado de la propia variante y del nudo que une la CV-35 con la variante en este punto inicial. Además, el puente que se encuentra pocos metros antes reduce las posibilidades de trazado al máximo, tal y como se muestra en la figura siguiente:



Figura 5. Zona con consistencia local aceptable. Condicionantes.

Por lo tanto, siguiendo las recomendaciones del criterio de Lamm utilizado para las zonas con consistencia local aceptable, en el tramo afectado deberá ser señalizada la limitación de velocidad correspondiente, reduciendo la diferencia de velocidad con respecto al tramo siguiente a menos de 10 km/h, llegando a la consistencia buena desde la señalización.

Por otro lado, es necesario evaluar también la consistencia global. Los criterios de consistencia global toman el trazado en su totalidad para el análisis, obviando los aspectos más concretos de la consistencia y trabajando con valores generales de todo el trazado. En el caso del análisis de la consistencia global de la variante se ha utilizado el Método de Camacho, el cual tiene en cuenta la velocidad de operación media del trazado (V85), y la deceleración media del mismo (d85). Estos parámetros son derivados del perfil de velocidad de operación. En el caso de la deceleración media se han contabilizado únicamente las deceleraciones entre elementos consecutivos con cierta entidad, descartando aquellas con valor inferior a 1 m/s².

El método de Camacho evalúa la consistencia local con la siguiente formulación:

$$C = \sqrt[3]{\frac{V85}{d85}}$$

Se considera una consistencia global buena por encima de 5.

Tras el análisis de los perfiles de velocidad de operación en ambos sentidos los resultados de la velocidad media de operación y la deceleración media son:

Sentido	V85	d85	C	Consistencia
Creciente	32.03 m/s	0.16 m/s ²	5.84	BUENA
Decreciente	32.23 m/s	0.16 m/s ²	5.84	BUENA

Tabla 3. Criterio de consistencia de Camacho. Consistencia Global.

3. HOMOGENEIDAD DE LA DEFLEXIÓN ACUMULADA EN EL TRAZADO. TRAMIFICACIÓN.

Las condiciones geométricas de la carretera deben ser tales que permitan circular al usuario con seguridad y comodidad, pero no son siempre las mismas. De esta forma, la concepción de la homogeneidad de sus características en las distintas zonas del trazado pueden no ser las mismas, debiendo establecer tramos homogéneos que otorguen continuidad a las variaciones de la carretera, evitando sorprender al usuario.

Existe un método de tramificación de una carretera, basado en el valor acumulado del ángulo de deflexión. Este valor acumulado se representa gráficamente según las variaciones causadas por las distintas curvas que se disponen a lo largo de la carretera. Para tramificar la carretera, basta con fijar tramos de pendiente uniforme a lo largo del gráfico de ángulo de deflexión acumulado. Por tanto, la tasa de cambio de curvatura (CCR) se define según la formulación siguiente:

$$CCR = \frac{\sum |\gamma_i|}{L}$$

Siendo:

γ_i = deflexión de cada elemento geométrico

L = Longitud del tramo

Para el análisis del CCR en la variante se ha considerado en estado de alineaciones definitivo, el cual considera la deflexión de cada elemento geométrico proyectado para la variante, en consonancia con el estado de alineaciones de la carretera actual, proporcionado en el anejo 3. Situación Actual.



Para la consideración conjunta de los dos estadillos en una única representación gráfica se han representado los metros previos al inicio de la variante y los metros posteriores justo tras el final de la misma, como si de una única vía se tratase.

Tras el análisis de los datos y la disposición de los respectivos estadillos en conjunto, la representación gráfica del CCR queda visualizada en la figura siguiente:

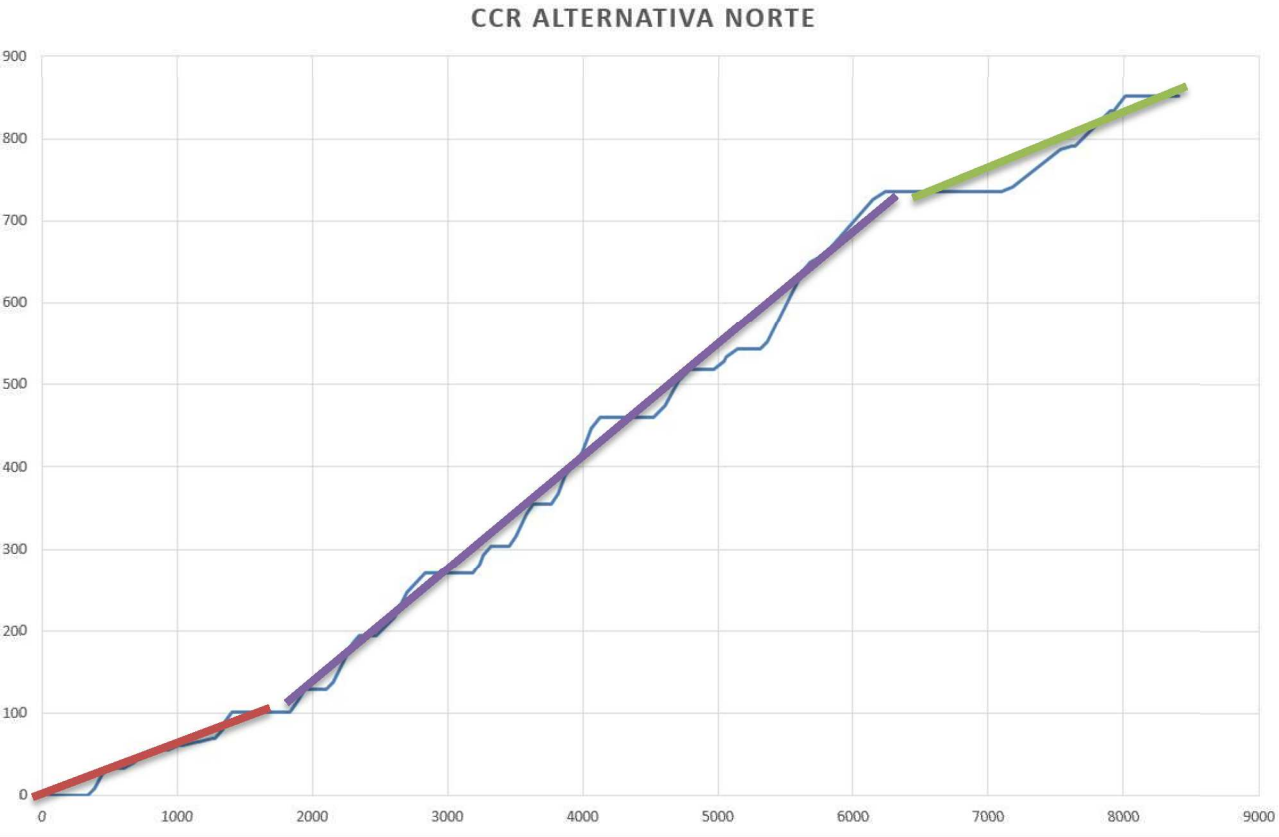


Figura 6. Índice CCR para el conjunto CV-35 y variante

Teniendo en cuenta que la variante empieza en el PK 1+009 de este gráfico, se puede comprobar que existen tres tramos con distinto valor del CCR:

- Tramo 1: hasta PK 1+750, dando continuidad con la actual CV-35 hasta más allá del inicio de la variante.
- Tramo 2: desde el PK 1+750 (PK 0+750 de la variante), hasta el PK 6+250 (PK 5+250 de la variante)..
- Tramo 3: desde el PK 6+250 en adelante, con la continuidad necesaria para enlazar de nuevo con la CV-35.

Los tramos definidos presentan características geométricas similares, siendo además tramos mayores a 2 km, lo que añade cierta progresividad a los sucesivos cambios de las características de la vía.

4. ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE ACCIDENTES MEDIANTE FUNCIONES SPF.

Con la variante ya caracterizada, la IMD ya obtenida y verificadas sus condiciones adecuadas de diseño, es posible acometer un cálculo estimado del número de accidentes esperados en la vía.

Los accidentes en la vía se pueden estimar a partir de funciones SPF. Estas funciones modelizan el comportamiento estadístico del tráfico según variables como la longitud del tramo, la intensidad media diaria o la consistencia global del tramo.

En la tabla siguiente se adjuntan los accidentes acaecidos en el tramo actual de la CV-35, sin variante, para los años 2002 a 2011, junto con un breve explicativo de cada uno y el lugar del suceso.

PK	Año	Zona	Características	Causas	Accidente
65+500	2002	Carretera	Curva	Velocidad inadecuada	Salida de vía y vuelco
65+700	2004	Carretera	Recta	Despiste conductor	Salida por la izquierda
65+800	2011	Carretera	Curva	Velocidad inadecuada	Salida de via por cuneta
65+900	2005	Carretera	No especificado	Colisión frontolateral	Colisión sin causa clara
66+800	2009	Carretera	Curva	Despiste conductor	Salia de vía en terraplén
67+400	2008	Carretera	Recta	Atropello animal	-
67+800	2003	Travesía	Intersección X	No respeto STOP	Colisión frontolateral
67+900	2007	Carretera	Recta	Infracción de la norma	Colisión frontolateral
68+000	2004	Carretera	Intersección T	No respeto STOP	Colisión frontolateral



68+400	2007	Carretera	Recta	Falta de visibilidad	Colisión frontolateral
68+800	2003	Carretera	Curva	Despiste conductor	Salida de vía en desmonte
68+900	2005	Carretera	Curva	Velocidad inadecuada	Salida de vía en terraplén
69+500	2003	Carretera	Recta	Maniobra incorrecta	Alcance
69+900	2002	Carretera	Curva	Velocidad incorrecta	Choque barrera de seguridad
70+000	2007	Carretera	Curva	Velocidad inadecuada	Colisión frontolateral

Tabla 4 Accidentes de 2002 a 2011 en el tramo objeto de estudio.

Para los años siguientes al de puesta en servicio, de 2021 en adelante, es posible estimar los accidentes esperados mediante la siguiente función SPF::

$$N^{\circ} \text{ Accidentes} = e^{-5.582} * L^{1.161} * IMD^{0.8015} * e^{-0.643 * C}$$

Siendo:

L = Longitud del tramo objeto de cálculo (km)

IMD = Intensidad media diaria del tramo objeto de estudio ($\frac{veh}{d}$)

C = Consistencia global del tramo objeto de estudio.

De esta forma, para el actual trazado de la CV-35 se estiman los accidentes de la carretera actual y su tramo de travesía por el interior del núcleo urbano de Chelva, resultando los para los periodos 2021-2031 y 2031-2041.

Las IMD de los periodos incluidos en la función SPF son IMD medias para dichos periodos, calculadas mediante los datos de IMD para los años de puesta en servicio y año horizonte, según la siguiente tabla:

IMD año 2021 (puesta en servicio)	2682	Periodo 2021-2031	2904
IMD año 2031	3126	-	-
IMD año 2041 (año horizonte)	3570	Periodo 2031-2041	3348

Tabla 5. IMD de los años correspondientes a los periodos de estimación de accidentes.

Como resultado, para la variante se estiman los accidentes en periodos de diez años desde su año de puesta en servicio, resultando los siguientes según la tabla dispuesta a continuación:

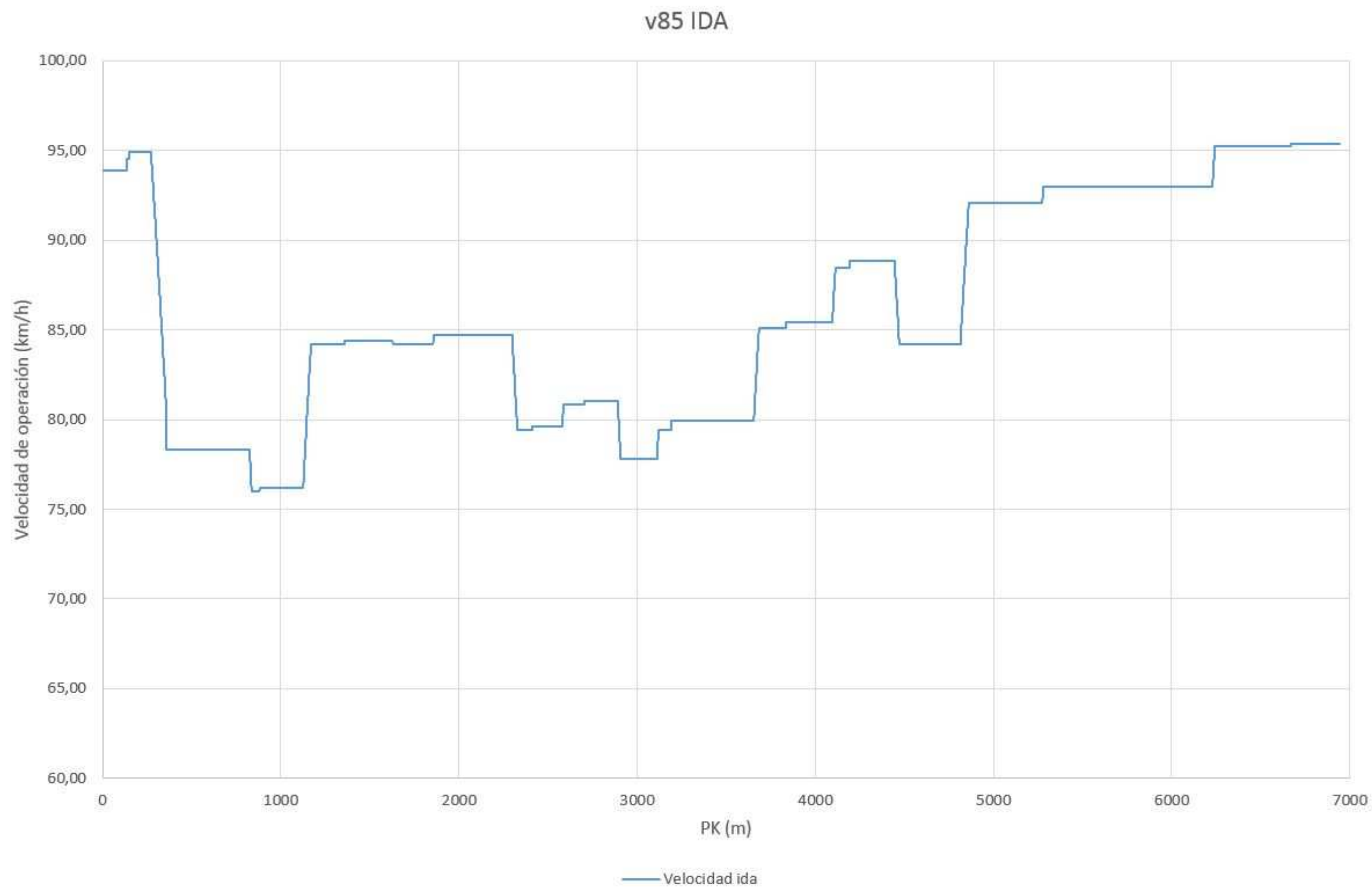
Periodo	Longitud tramo	Consistencia	IMD	Nº Accidentes	Accidentes reales
2021-2031	6,650	5.84	2904	0.47	1
2031-2041	6,650	5.84	3348	0.53	1

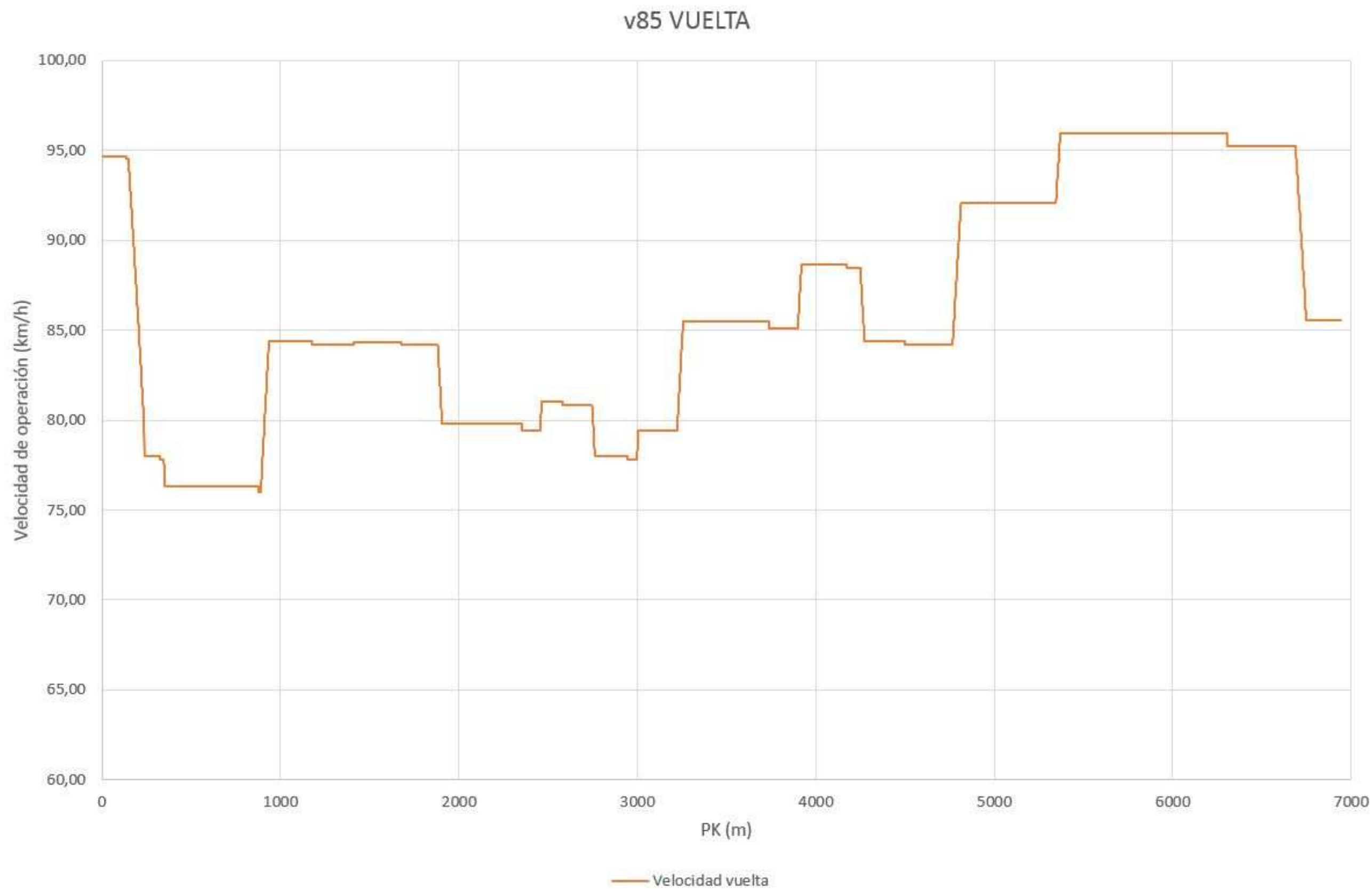
Tabla 6. Estimación de accidentes para el tramo de la variante.

Del cálculo de accidentes para un periodo de 10 años según las variables enumeradas se obtiene que para los años 2021-2031 y 2031-2041 sólo habría un accidente cada diez años según la función SPF utilizada, valor muy por debajo de los 15 accidentes acaecidos en el trazado actual de la CV-35 entre los años 2002 y 2011.



APÉNDICE I: Perfiles de velocidad de operación.







BIBLIOGRAFÍA.

- Camacho Torregrosa F.J. (Coordinador): *Seguridad Vial, Grado en Ingeniería Civil*, Capítulo 7. Consistencia.