

# Análisis de la seguridad vial mediante modelos locales de consistencia

<b>Apellidos, nombre</b>	Llopis Castelló, David <sup>1</sup> (dalocas@upv.es) Camacho Torregrosa, Francisco Javier <sup>1</sup> (fracator@tra.upv.es)
<b>Departamento</b>	<sup>1</sup> Ingeniería e Infraestructura de los Transportes
<b>Centro</b>	Universitat Politècnica de València

## 1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se presentan distintos modelos locales de consistencia que permiten evaluar la seguridad vial de un elemento específico del trazado. De esta manera, el empleo de este tipo de modelos nos permitirá identificar aquellos puntos de la carretera donde tienden a concentrarse los accidentes.

## 2 Objetivos

Una vez que el estudiante haya leído con detenimiento este documento, será capaz de:

- Definir el concepto de consistencia del diseño geométrico.
- Aplicar distintos modelos locales de consistencia.
- Identificar los elementos del trazado de una carretera que suponen mayor riesgo para los conductores.

## 3 Introducción

Entre los diferentes factores que están presentes en la producción de un accidente de tráfico cabe destacar tres: el humano, el vehículo y la infraestructura (Figura 1). Particularmente, el factor infraestructura está presente en más del 30 % de los accidentes ocurridos en carretera. De hecho, los accidentes tienden a concentrarse en ciertos elementos de la vía. Por ello, el factor infraestructura y su interacción con el factor humano, que está presente en alrededor del 90 % de los accidentes, han sido estudiados profundamente en los últimos años a partir del concepto de consistencia del diseño geométrico de carreteras.

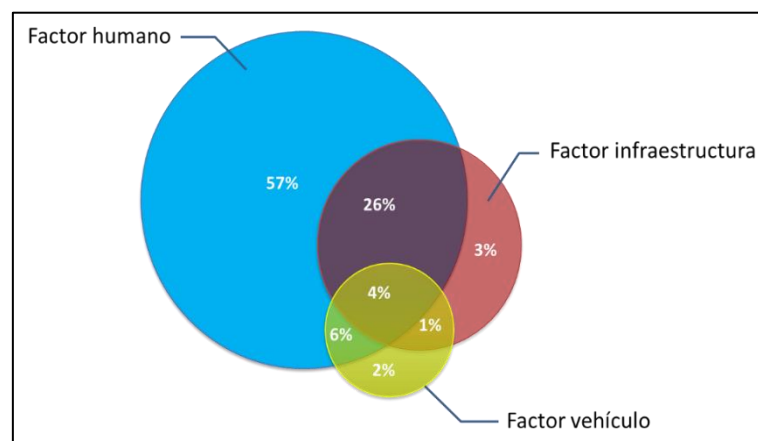


Figura 1. Interacción de los factores concurrentes en la siniestralidad.

En este contexto, la consistencia del diseño se define como el grado de adecuación entre las expectativas de los conductores y el comportamiento de la carretera. El objetivo de la consistencia del diseño geométrico es garantizar que sus usuarios no se vean sorprendidos a lo largo de la misma, es decir, se trata de conseguir que los conductores se encuentren a lo largo de la carretera con lo que ellos se esperan a partir de sus expectativas.

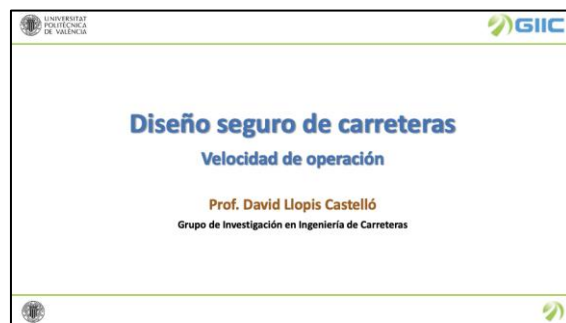
Así, un diseño consistente asegura que elementos geométricos sucesivos actúen de forma coordinada produciendo una conducción armoniosa libre de sorpresas. De esta manera, el

número de accidentes se vería reducido, puesto que se evitaría que se produjesen maniobras de conducción críticas asegurando unas condiciones del tráfico seguras. Por el contrario, un diseño inconsistente puede producir sorpresas en los conductores, lo que se traduce en la ejecución de maniobras erráticas o conflictivas aumentando la probabilidad de ocurrencia de accidentes.

Existen varios métodos para evaluar la consistencia del diseño geométrico de carreteras: velocidad de operación, estabilidad vehicular, índices de trazado y carga de trabajo del conductor (Ng and Sayed, 2004). No obstante, el uso de la velocidad de operación para determinar la consistencia es el método más comúnmente empleado. Esta velocidad se define como la velocidad a la cual los usuarios de la vía pueden conducir sus vehículos bajo condiciones de flujo libre y condiciones favorables de meteorología y sin exceder la velocidad segura en ningún momento. Debido a que esta definición no presenta aplicación práctica para el ingeniero, ya que no es determinable, tradicionalmente se asocia al percentil 85 de la velocidad ( $V_{85}$ ) a la que operan los vehículos ligeros en condiciones de flujo libre y sin restricciones ambientales.



*Si deseas profundizar más sobre el concepto de la velocidad de operación, te recomendamos visualizar el siguiente vídeo didáctico:*

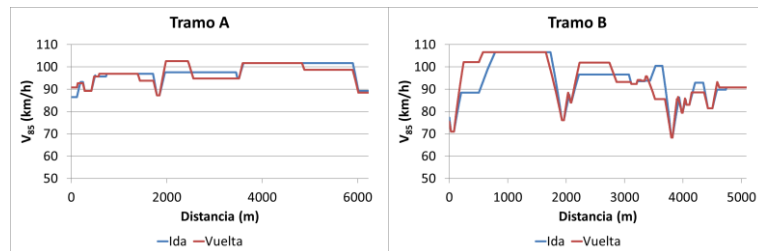


La consistencia puede ser analizada a partir de dos tipos de criterios: locales y globales. Los criterios locales se basan en el análisis de la consistencia de un elemento aislado del trazado a partir de las deceleraciones que se producen entre elementos sucesivos o la diferencia entre la velocidad de operación y la de diseño. Este tipo de modelos son ideales para detectar en qué elementos del trazado es más probable que ocurran los accidentes. Por otro lado, los modelos globales tratan de evaluar la consistencia de un tramo completo empleando diferentes variables obtenidas a partir del perfil continuo de velocidad de operación asociado. A pesar de que estos modelos no indican dónde se producirán los accidentes, permiten estimar el número de accidentes en un segmento homogéneo de carretera a partir de una Función de Estimación de la Siniestralidad (*Safety Performance Function*, SPF).

A continuación, se presentan distintos modelos de consistencia local y, posteriormente, son aplicados en un caso de estudio con el fin de identificar los problemas de seguridad vial presentes en un tramo de carretera.



Antes de conocer los distintos modelos locales de consistencia del diseño geométrico de carreteras, observa los siguientes perfiles de velocidad de operación de dos tramos de carretera.



- ¿Qué tramo de carretera crees que tendrá mayores problemas de seguridad vial?
- ¿Dónde piensas que tenderán a concentrarse los accidentes en cada uno de los tramos?

Podrás responder correctamente a estas preguntas tras la revisión de este artículo.

## 4 Modelos locales de consistencia

### 4.1 Criterio I de Lamm et al. (1988)

Los criterios locales de consistencia más ampliamente conocidos son los tres criterios desarrollados por Lamm et al. (1988). Estos criterios califican el nivel de consistencia de un determinado elemento viario como “buena”, “aceptable” o “pobre”, a partir de diferentes umbrales que fueron definidos a través de la comparación de los distintos criterios y las tasas de siniestralidad observadas.

Particularmente, el criterio I de Lamm et al. (1988) evalúa la diferencia entre la velocidad de operación ( $V_{85}$ ) y la velocidad de diseño o proyecto ( $V_d$ ). De este modo, un determinado elemento geométrico presenta buena consistencia cuando la diferencia entre  $V_{85}$  y  $V_d$  es inferior a 10 km/h, mientras que es pobre cuando dicha diferencia sea superior a 20 km/h. Entre dichos valores, el elemento geométrico presenta una consistencia aceptable (Tabla 1).

Buena	Aceptable	Pobre
$V_{85} - V_d \leq 10 \text{ km/h}$	$10 \text{ km/h} < V_{85} - V_d \leq 20 \text{ km/h}$	$V_{85} - V_d > 20 \text{ km/h}$

Tabla 1. Criterio I de Lamm et al. (1988).

Cabe destacar que este criterio está actualmente recogido en la Norma 3.1-IC Trazado (2016) de diseño de carreteras española. Sin embargo, la aplicación de este criterio está en desuso debido principalmente a la definición del concepto de velocidad de diseño o proyecto. Esta velocidad, que es escogida por el ingeniero para diseñar la carretera, realmente representa la mínima velocidad que se considera en el diseño. En otras palabras, la selección de la velocidad de operación nos va a limitar ciertos parámetros del diseño de los que, habitualmente, el ingeniero huye al diseñar el trazado de la misma.

El caso más claro se da en el diseño de la planta de la carretera. En este contexto, la velocidad de diseño nos limita el radio mínimo de las curvas. De esta manera, cuando diseñamos intentamos huir de ese mínimo y, consecuentemente, la velocidad específica del resto de elementos del trazado puede que sea significativamente mayor a la asociada a la curva de radio mínimo, que es la velocidad de proyecto. Esto conduce a que la mayor parte de la

carretera esté calificada con un nivel de consistencia aceptable o pobre bajo este criterio (Figura 2).

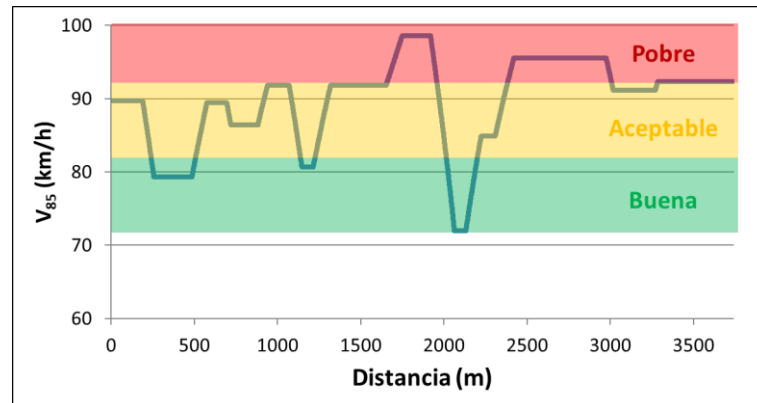


Figura 2. Criterio I de Lamm et al. (1988).

## 4.2 Criterio II de Lamm et al. (1988)

El Criterio II de Lamm et al. (1988) es el criterio local de consistencia más empleado para identificar problemas puntuales en el diseño y, consecuentemente, el que incorpora la mayoría de normas de diseño de carreteras a nivel mundial, incluyendo la Norma 3.1-IC Trazado (2016) de diseño de carreteras española.

Este criterio se define como la diferencia de las velocidades de operación entre elementos consecutivos. De este modo, el criterio trata de identificar principalmente qué transiciones recta-curva están causando decrementos significativos de la velocidad de operación. En este sentido, un elemento viario posee una consistencia buena en caso de que el decremento de velocidad de operación ocasionado sea inferior a 10 km/h. Por el contrario, si exige una reducción de la velocidad de operación superior a 20 km/h, el nivel de consistencia es pobre. En cualquier otro caso el elemento viario presenta una consistencia aceptable (Tabla 2).

Buena	Aceptable	Pobre
$V_{85\ i+1} - V_{85\ i} \leq 10\ \text{km/h}$	$10\ \text{km/h} < V_{85\ i+1} - V_{85\ i} \leq 20\ \text{km/h}$	$V_{85\ i+1} - V_{85\ i} > 20\ \text{km/h}$

Tabla 2. Criterio II de Lamm et al. (1988).

Gracias a la sencilla aplicación de este modelo, los elementos viarios que son susceptibles de ocasionar sorpresas en los conductores y, consecuentemente, aumentar el riesgo de ocurrencia de accidentes son fácilmente identificables a partir del perfil de velocidad de operación (Figura 3). Analizando las deceleraciones que se producen en el perfil, que son ocasionados principalmente por las transiciones recta-curva, rápidamente se puede determinar qué configuraciones del trazado son más peligrosas y dónde es más probable que se concentren los accidentes.

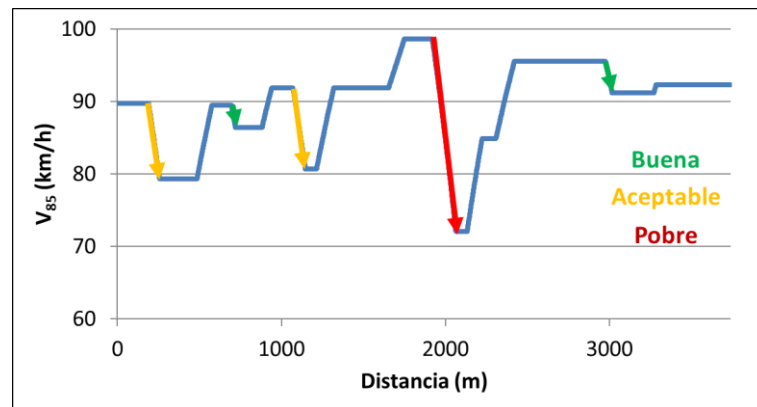
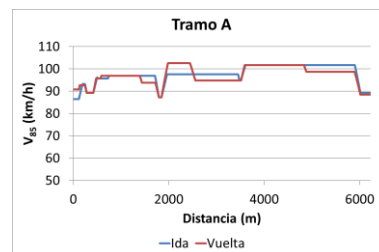


Figura 3. Criterio II de Lamm et al. (1988).



Fíjate en los perfiles de velocidad de operación del tramo de carretera A, que se corresponden con cada uno de los sentidos de circulación.



- ¿Existen elementos o configuraciones del trazado que pueden ocasionar problemas de seguridad vial?
- ¿Estos elementos o configuraciones son un problema en ambos sentidos de circulación?

Cabe resaltar que el análisis de la consistencia local a través del Criterio II de Lamm et al. (1988) debe realizarse de manera independiente para ambos sentidos de circulación, puesto que un determinado elemento viario puede que sea un problema en un sentido de circulación pero no en el otro. Si observamos los perfiles de velocidad de operación del Tramo A, el elemento viario situado aproximadamente en el punto kilométrico 2+000 está ocasionando en el sentido de ida una velocidad igual o inferior a 10 km/h, mientras que en el sentido de vuelta está generando que los conductores tengan que decelerar aproximadamente 15 km/h. Por tanto, en el sentido de ida el elemento posee un nivel de consistencia buena mientras que en el de vuelta la consistencia es aceptable.

### 4.3 Índice de Consistencia Inercial de Llopis-Castelló et al. (2018)

A pesar del uso extendido del criterio II de consistencia de Lamm et al. (1988), este no es capaz de representar y cuantificar las verdaderas diferencias que existen entre las expectativas de los conductores y el comportamiento de la carretera. Dicho de otra manera, la consistencia de un determinado elemento del trazado no depende únicamente de las características de este elemento y su anterior, sino también de las características de varios elementos anteriores a este.

En este contexto surge el Índice de Consistencia Inercial (ICI). Este índice, propuesto por primera vez por García et al. (2013), se define como la diferencia entre la velocidad de

operación inercial y la velocidad de operación (Figura 4). Este nuevo concepto de velocidad fue propuesto como medida sustitutoria de las expectativas de los conductores.

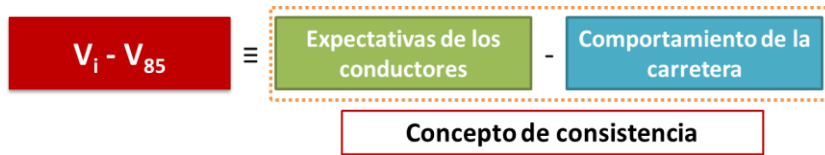


Figura 4. Índice de Consistencia Inercial.

Desde un punto de vista psicológico, el proceso de generación de expectativas de los conductores está estrechamente ligado a la memoria a corto plazo, la cual es decadente con el tiempo. Esto significa que los conductores recuerdan con mayor claridad aquello que recorren en última instancia y, por tanto, sus expectativas dependen del tiempo transcurrido. De este modo, Llopis-Castelló et al. (2018) concluyeron que la velocidad de operación inercial debe ser calculada como la velocidad de operación media ponderada de los últimos 15 segundos recorridos, asumiendo una distribución lineal de los pesos:

$$V_{i,k} = \frac{\sum w_j \cdot V_{85,j}}{\sum w_j}$$

donde  $V_{i,k}$  es la velocidad de operación inercial en el punto  $k$ ;  $w_j$  es el valor del peso en el intervalo  $j$ ; y  $V_{85,j}$  es el valor de la velocidad de operación en el intervalo  $j$ . El peso en cada intervalo ( $w_j$ ) toma valores entre 0 y 1 de acuerdo con la siguiente expresión:

$$w_j = \frac{j}{n}$$

donde  $n$  es el número de intervalos considerados en el cálculo y  $j$  el intervalo en el que se calcula el valor del peso.

#### Recomendación

*Para el cálculo de la velocidad de operación inercial habrá que previamente estimar las velocidades que se producen 15 segundos antes del punto donde queremos estimar  $V_i$ . Para ello, se recomienda el uso de intervalos de tiempo separados 0,1 segundos para  $V_{85,j}$ .*

*De esta manera, se dispondrá de un total de 150 intervalos ( $V_{85,j}$ ) cuyo peso ( $w_j$ ) será igual a la posición de cada  $V_{85,j}$  dividido entre 150, de manera que la velocidad  $V_{85,j}$  más alejada del punto donde se calcule  $V_i$  posea el peso mínimo.*

*Si quieres obtener de manera automática este perfil puedes emplear la siguiente herramienta:*

[Calculadora de Velocidad de Operación Inercial](#)

La Figura 5 muestra un ejemplo del perfil de velocidad de operación inercial, que se obtiene tras el cálculo de la velocidad de operación inercial a lo largo de toda la longitud de la carretera.

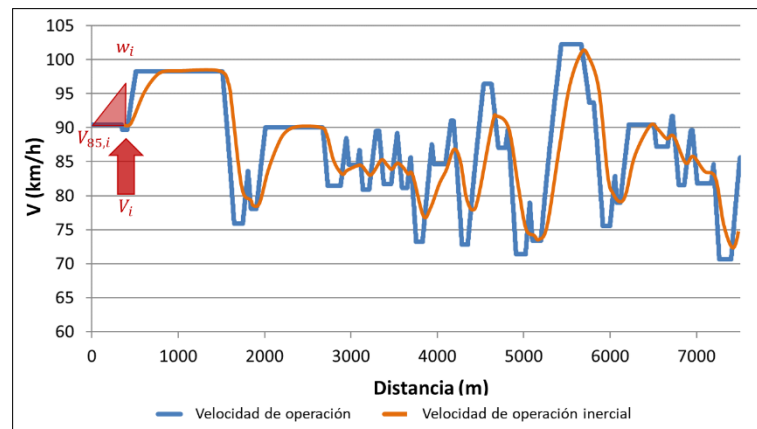


Figura 5. Estimación de la velocidad inercial.

Una vez obtenido el perfil de velocidad de operación inercial, para determinar el Índice de Consistencia Inercial (ICI) se debe realizar la diferencia entre este perfil y el perfil de velocidad de operación (Figura 6).

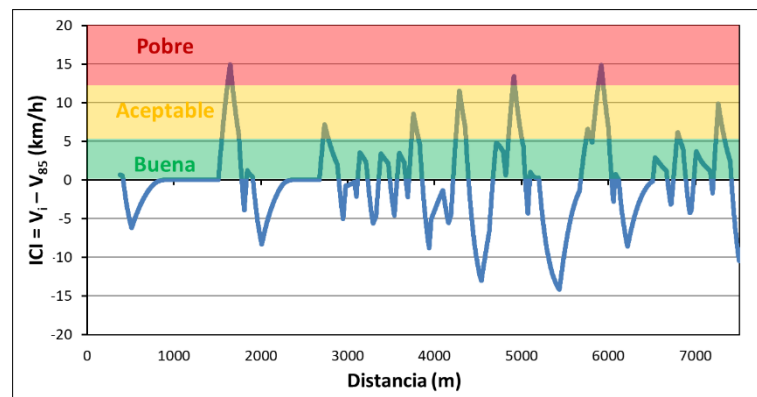


Figura 6. Diferencia del perfil de  $V_i$  y el perfil de  $V_{85}$ .



Observa la Figura 6 e intenta responder a las siguientes cuestiones antes de continuar con la lectura del artículo:

- ¿Qué ocurre cuando la diferencia entre ambos perfiles es positiva?
- ¿Y si es negativa?
- ¿En qué situación crees que los conductores pueden verse sorprendidos?

Como bien habrás anticipado, en este nuevo perfil la parte positiva nos indica que la velocidad de operación inercial es mayor que la velocidad de operación y, por tanto, la velocidad que espera desarrollar el usuario de la vía es mayor que la que la propia carretera le permite de acuerdo a sus características geométricas. En definitiva, en estas localizaciones los conductores se ven sorprendidos por las características de la vía, lo que lleva a que tengan que adaptar de manera inmediata su conducción a las condiciones del trazado con el riesgo que esto conlleva. Por tanto, cuanto mayor sea el Índice de Consistencia Inercial (ICI), mayor será el riesgo de ocurrencia de accidentes.



De este modo, Llopis-Castelló et al. (2018) concluyeron que un elemento viario posee buena consistencia si el ICI es inferior que 5 km/h, pobre consistencia en caso de que este parámetro sea superior a 12,5 km/h y aceptable en el resto de casos (Tabla 3).

Buena	Aceptable	Pobre
$ICI \leq 5 \text{ km/h}$	$5 \text{ km/h} < ICI \leq 12,5 \text{ km/h}$	$ICI > 12,5 \text{ km/h}$

Tabla 3. Modelo de consistencia local de Llopis-Castelló et al. (2018).

## 5 Caso de estudio

Imaginemos que queremos identificar los elementos o configuraciones del trazado de la carretera de la CV-132 comprendido entre Sant Mateu y Xert que presentan mayores problemas de seguridad vial (Figura 7). Para ello, vamos a aplicar los criterios de consistencia locales estudiados en este artículo. Particularmente, el criterio II de consistencia de Lamm et al. (1988) y el Índice de Consistencia Inercial propuesto por Llopis-Castelló et al. (2018).

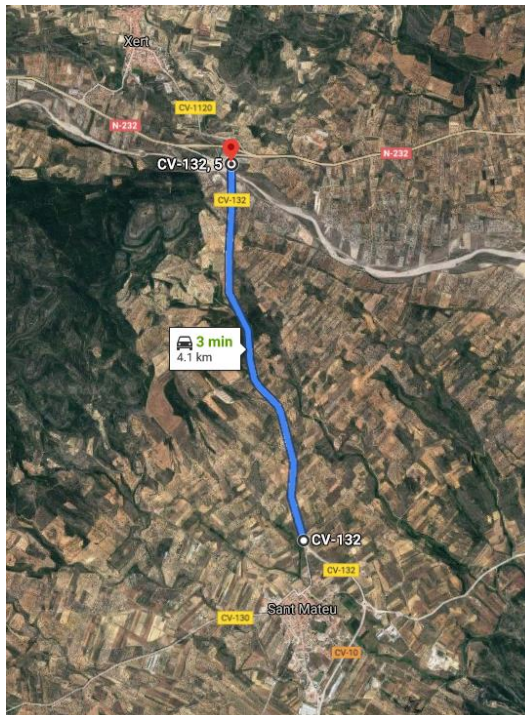


Figura 6. Tramo de carretera de estudio.

El primer paso para llevar a cabo la aplicación de estos modelos será la estimación del perfil de velocidad de operación. En este sentido, se propone la utilización de modelos de velocidad de operación desarrollados en España. Cabe destacar que la utilización de modelos calibrados en otros países no representará adecuadamente el fenómeno, pues no serán capaces de recoger adecuadamente el comportamiento de los conductores españoles. Concretamente para este caso práctico se han considerado los modelos de velocidad de operación propuestos por Pérez-Zuriaga (2012) y la definición de la velocidad de operación inercial de Llopis-Castelló et al. (2018), obteniéndose los perfiles de velocidad del tramo de estudio de la Figura 8.

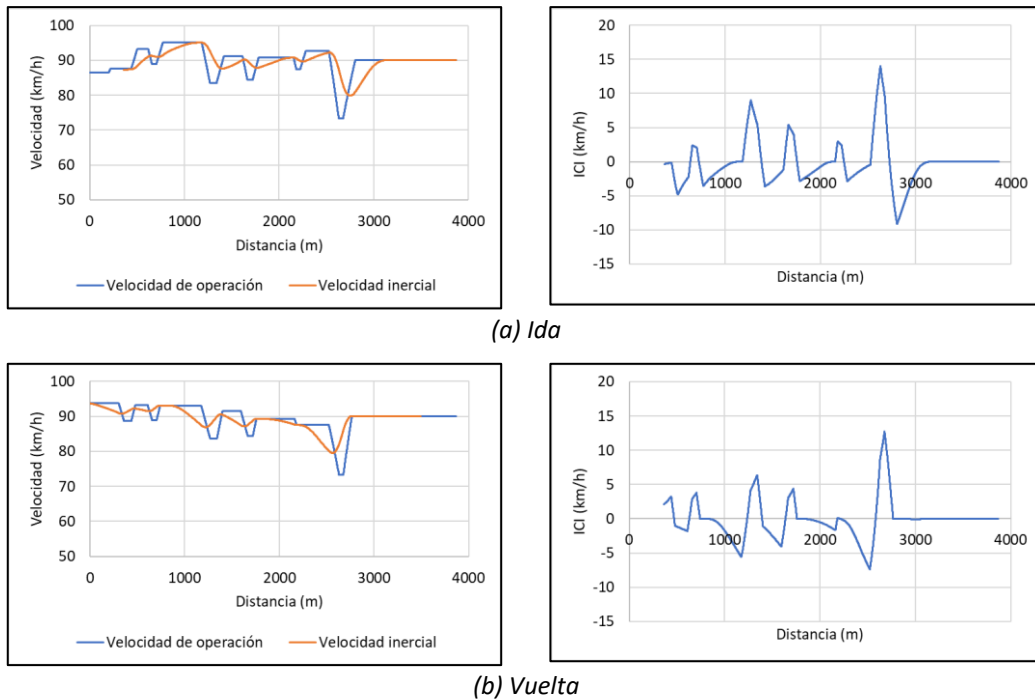
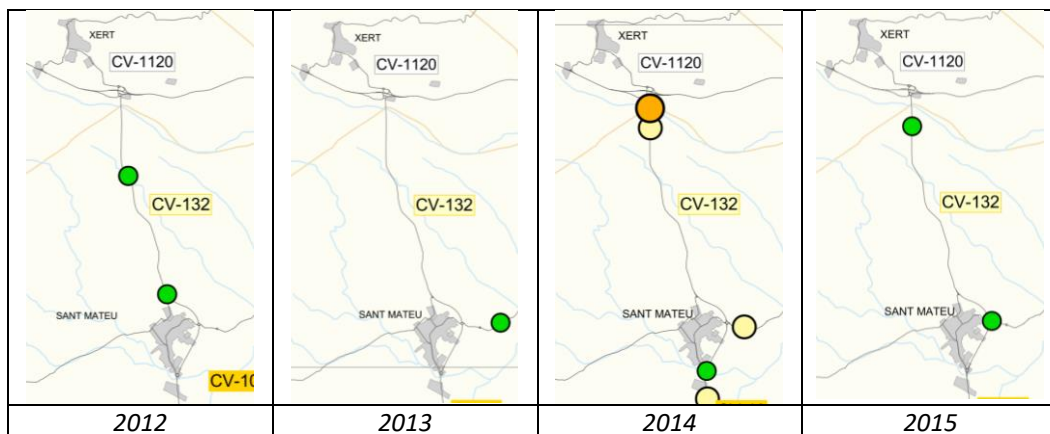


Figura 7. Perfiles de velocidad.

Partiendo de los perfiles de velocidad en ambos sentidos de circulación, se puede apreciar como el principal problema de seguridad vial en este tramo de carretera de la CV-132 se sitúa en la última transición recta-curva en el sentido de ida o, lo que es lo mismo, en la primera en el sentido de vuelta. En el sentido de ida se observa un decremento de la velocidad de operación de aproximadamente 20 km/h y un valor del Índice de Consistencia Inercial de casi 15 km/h. En el sentido de vuelta, aunque estos valores son algo menores, siguen siendo bastante importantes. De este modo, se espera que los accidentes tiendan a concentrarse en este punto. Adicionalmente, se observa algún otro elemento con consistencia aceptable, como por ejemplo la curva situada en el PK 1+300.

La Figura 8 muestra los accidentes ocurridos en este tramo de carretera durante los años 2012 y 2018, ambos inclusive. Como se puede observar, prácticamente todos los accidentes se han producido en estas dos ubicaciones que resaltábamos en el párrafo anterior.



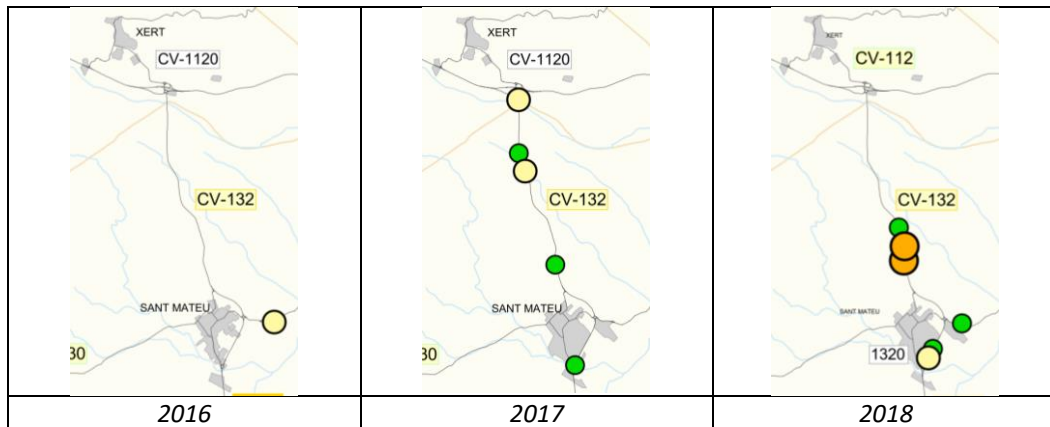


Figura 8. Siniestralidad de la carretera CV-132. Fuente: Conselleria de Política Territorial, Obras Pùblicas y Movilidad de la Generalitat Valenciana.

A pesar de que en este caso de estudio ambos criterios locales muestran resultados similares, cabe destacar que no siempre es así. Principalmente, el modelo propuesto por Llopis-Castelló et al. (2018) permite identificar de una manera más precisa los problemas de seguridad vial que presenta el tramo de carretera.

## 6 Conclusión

En este documento hemos estudiado el concepto de consistencia del diseño geométrico de carreteras desde una perspectiva local. El conocimiento de los criterios locales de consistencia nos permite identificar en qué elementos o configuraciones del trazado es más probable que se concentren los accidentes. Como resultado, la aplicación de este tipo de modelos se presenta como una herramienta útil para evaluar la seguridad vial en un tramo de carretera y determinar los elementos que requieren de una mejora, ya sea en fase de diseño de un nuevo tramo de carretera como durante el acondicionamiento de una carretera ya existente.

## 7 Bibliografía

- García, A., Llopis-Castelló, D., Camacho-Torregrosa, F.J., & Pérez-Zuriaga, A.M. (2013). New Consistency Index Based on Inertial Operating Speed. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2391), 105-112.
- Lamm, R., Choueiri, E., Hayward, J., & Paluri, A. (1988). Possible design procedure to promote design consistency in highway geometric design on two-lane rural roads. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1195).
- Llopis-Castelló, D., Camacho-Torregrosa, F. J., & García, A. (2018). Calibration of the inertial consistency index to assess road safety on horizontal curves of two-lane rural roads. *Accident Analysis & Prevention*, 118, 1-10.
- Ng, J. & Sayed, T. (2004). Effect of geometric design consistency on road safety. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(2), 218-227.
- Pérez-Zuriaga, A.M. (2012). *Caracterización y modelización de la velocidad de operación en carreteras convencionales a partir de la observación naturalística de la evolución de vehículos ligeros*. Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain).