

Análisis de la longitud de las rectas y su influencia en la consistencia del diseño geométrico de carreteras convencionales



Analysis of the tangent length on two-lane rural roads and its influence on geometric design consistency

Jaime S. Díaz García

Ingeniero de Caminos, C. y P., España

Francisco J. Camacho-Torregrosa

Ayudante Doctor, GILC, UPV, España

Alfredo García

Catedrático, Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GILC), Universitat Politècnica de València (UPV), España

Resumen

Los trazados que presentan rectas de elevada longitud fomentan que los conductores circulen a mayores velocidades, pudiendo alcanzar sus velocidades deseadas en la parte central de las mismas. Como consecuencia de ello, son grandes las reducciones de velocidad para afrontar las curvas posteriores. En cambio, con rectas cortas, las velocidades que se pueden desarrollar en las dos curvas de los extremos están condicionadas mutuamente para que no haya una reducción excesiva de la velocidad. Las reducciones excesivas de velocidad comprometen la adecuada consistencia de una carretera por lo que están correlacionadas con una mayor siniestralidad.

La mayoría de modelos existentes para la estimación de la velocidad de operación han sido calibrados a partir de mediciones puntuales de velocidad. Para estimar los perfiles de velocidad de operación, se hace necesario incorporar unas reglas de construcción. La gran mayoría de ellas considera que los cambios de velocidad se producen solo a lo largo de la recta. En la investigación que se presenta, se ha

analizado el comportamiento operacional observado de un gran número de conductores en las rectas, encontrando importantes diferencias respecto del comportamiento anterior. Analizando la evolución de la velocidad de operación observada en 70 secciones curva-recta-curva de carreteras convencionales se ha encontrado que la variación de velocidad se produce en una longitud superior a la propia recta; esa nueva longitud efectiva está conformada por la longitud de la recta más un cierto desarrollo de las curvas adyacentes. Los resultados apuntan a que la longitud empleada para variar la velocidad antes y después de las rectas es de unos 145 m, independientemente de la configuración geométrica.

Adicionalmente, se han comparado los resultados del análisis geométrico y operacional de las secciones con los criterios correspondientes de la Instrucción de Trazado de Carreteras vigente, encontrando disparidades manifiestas y planteándose mejoras a la misma, siendo el punto de mayor discrepancia las reducidas longitudes que esta emplea para considerar algunas rectas como no independientes. Se han encontrado tres niveles de independencia de las rectas a diferencia de los dos niveles tradicionalmente empleados a nivel internacional.

Abstract

Road alignments in which long tangents are present allow drivers to perform faster, and therefore to reach their desired speed in the mid-tangent sections. As a consequence, more important speed reductions might be necessary to negotiate the following curves. Conversely, curves separated by a short tangent normally present very similar speeds, not requiring sudden speed reductions. This is an important fact, since intense speed reductions are connected to local inconsistencies, thus leading to higher crash rates.

Most operating speed models have been calibrated using spot-speed data. They can be used with certain construction rules to estimate the operating speed profile along a certain road alignment. However, most of these construction rules assume that speed variations take place entirely on the tangent section. In this study,

the authors have observed the behavior of a large set of drivers along tangents, finding important differences compared to the previous assumption. The operating speed analysis across 70 curve-tangent-curve sections shows that speed variations generally take place along a longer section than the actual tangent. This new 'effective length' includes not only the whole tangent but a certain section of the adjacent curves. Moreover, this section seems to be around 145 m, regardless of the geometric design.

Additionally, the authors have analyzed the geometric design and driving performance of the previous sections, comparing them towards the current Spanish design standards. The results show important disparities, especially concerning the threshold-based criterion to define a tangent as non-independent. The authors also propose some enhancements to the existing guidelines, including a new tree-level dependence level of tangents, in contrast to the two internationally well-known ones.

1. Introducción

En carreteras convencionales, las rectas de cierto desarrollo son necesarias para poder facilitar el adelantamiento y así aliviar las demoras de los vehículos más rápidos, mejorando así el nivel de servicio. Como contrapartida, rectas largas propician mayores velocidades. En los casos de longitudes elevadas, los conductores pueden alcanzar su velocidad deseada, que mantendrán constante hasta aproximarse a la curva posterior. Este comportamiento es especialmente relevante cuando las reducciones de velocidad previas a encarar la siguiente curva son de gran magnitud. Este tipo de rectas largas se denominan rectas independientes (Lamm et al., 2007), al no estar condicionadas por las curvas.

En cambio, cuando la recta es corta, las velocidades que se pueden desarrollar están muy relacionadas con las de las curvas debido al poco desarrollo existente para variar la velocidad. En casos extremos, puede haber incluso transición directa de velocidad entre ellas. Este tipo de rectas se denominan no independientes (Lamm et al., 2007) o dependientes.

La velocidad de operación es entendida como la velocidad que desarrollan los usuarios de la carretera bajo condiciones de flujo libre. Esta velocidad de operación para cada elemento del trazado está reconocida que se corresponde con el percentil 85 de las velocidades en flujo libre de vehículos ligeros.

Se han desarrollado diversos modelos para la estimación de la velocidad de operación en rectas, si bien con gran dispersión, al no ejercer estas un control geométrico sobre los

conductores. Así, podemos encontrar como modelos más simples una velocidad única para todas las rectas independientes: Ottesen y Krammes (2000) propusieron 97,9 km/h; Fitzpatrick y Collins (2000) adoptaron 100 km/h; Easa (2003) la seleccionaba en el intervalo (94; 104) km/h, estimándose aproximadamente en 100 km/h en vías convencionales con velocidad límite de 90 km/h. Otros modelos más avanzados han tenido en cuenta algunas variables: Fitzpatrick et al. (2000) estimaban la velocidad media de las rectas de longitud superior a 200 m en función de diferentes índices de trazado; Polus et al. (2000) se basaban en los radios de las curvas de los extremos y la longitud de la recta; Pérez et al. (2010) propusieron dos modelos que dependían de la longitud de la recta y las características geométricas y operacionales de la curva anterior.

Las reducciones excesivas de velocidad comprometen la adecuada consistencia de una carretera por lo que están correlacionadas con una mayor siniestralidad. Puede definirse la consistencia del diseño geométrico como el grado de adecuación entre el comportamiento de la carretera y las expectativas de los conductores (Nicholson, 1998). Un diseño inconsistente da como resultado sorpresas en los conductores y, por tanto, mayor probabilidad de existir un comportamiento anómalo que derive en un accidente. La mayoría de las investigaciones relacionadas con la consistencia y los modelos más empleados se centran en la velocidad de operación y sus variaciones (Hassan, 2004), por ser relativamente sencilla su estimación pero a la vez ofrecer buenos resultados. Esta velocidad se emplea para

evaluar la consistencia básicamente de dos formas: examinando su variación a lo largo de la vía (buscando deceleraciones bruscas o altas variaciones), o comparándola con la velocidad de diseño de la propia curva (esto es, su velocidad específica).

En los análisis de consistencia, las transiciones recta-curva son consideradas como las ubicaciones más críticas, ya que se estima que más del 50 % de las muertes en carreteras interurbanas se producen en secciones curvas (Lamm et al., 1992). La reducción de velocidad de operación entre dos elementos consecutivos (ΔV_{85}) es una forma indirecta de cuantificar la sorpresa experimentada por los conductores, y se ha revelado como un indicador de consistencia muy sencillo y utilizado. Este es el modelo propuesto por Lamm et al. (1999) y denominado Criterio II, que establece dos umbrales de 10 y 20 km/h, de la reducción de velocidad de operación entre la recta y la curva siguiente, para distinguir una consistencia buena, aceptable o pobre. Otro modelo más reciente ha sido propuesto por García et al. (2013) para evaluar la consistencia en las curvas empleando el Índice de Consistencia Inercial (ICI). Este nuevo índice consiste en el cálculo en el punto de inicio de la curva de la diferencia entre la velocidad de operación media del kilómetro anterior (velocidad de operación inercial) y la velocidad de operación en ese punto (velocidad de operación de la curva). Posteriormente, se ha fijado la longitud óptima del segmento anterior para promediar la velocidad de operación en 750 600 m (García et al., 2015 Llopis-Castelló et al., 2018).

2. Objetivos e hipótesis

La mayoría de modelos de velocidad de operación consideran que los cambios de velocidad se producen exclusivamente a lo largo del desarrollo de la recta, manteniéndose en los tramos curvos una velocidad constante. En esta investigación se ha introducido una nueva hipótesis, ya verificada para curvas aisladas, según la cual, los conductores inician su aceleración antes de que concluya la primera curva y completan su deceleración ya dentro de la segunda curva (Pérez et al., 2010). Realizando un paralelismo con los modelos de velocidad de operación, podría establecerse que la variación de velocidad se produce exclusivamente a lo largo de una recta virtual, que comprende el desarrollo de la recta y porción de las curvas adyacentes. La longitud de esta recta virtual podría denominarse “longitud efectiva”, que será mayor que la longitud geométrica.

El objetivo principal de la investigación es la mejora del conocimiento sobre cómo influye la longitud de las rectas en la consistencia del diseño geométrico. Para ello se han analizado datos existentes, los cuales fueron obtenidos mediante la observación continua de la evolución de una muestra de vehículos recorriendo diversos tramos de carretera convencional.

Se han planteado las siguientes hipótesis adicionales a verificar mediante el desarrollo experimental:

- Una mayor longitud de recta induce a los conductores a aproximarse más a su velocidad deseada.
- A menor velocidad de diseño del tramo, menor es la longitud mínima de la recta para ser considerada independiente.
- Existe condicionamiento operacional entre curvas consecutivas para rectas con desarrollo por debajo de cierta longitud.

3. Metodología

La base experimental de esta investigación fue la observación continua de la evolución de muestras de vehículos ligeros en nueve segmentos de carretera convencional. Para ello se emplearon dispositivos GPS de rastreo pasivo de 1 Hz, que se entregaban a los conductores previa aceptación de colaboración. Para esto se siguió la metodología propuesta por Pérez et al. (2013). Al entregar el dispositivo de rastreo a los conductores, se podría estar invalidando la muestra de datos. Con el fin de cuantificar este posible sesgo, antes de realizar las cuatro primeras tomas de datos se midieron velocidades en dos puntos de cada tramo (una recta y una curva) con videocámara. El día de la toma de datos se repitió el mismo procedimiento. De este modo se logró un doble objetivo: por un lado, se validan los datos de velocidad al contrastar la velocidad puntual de vehículos obtenida mediante GPS y videocámaras. Por otra parte, se determinó que los datos con y sin GPS no pertenecen a poblaciones diferentes, con un 95% de fiabilidad, validando la metodología. Los resultados más detallados se pueden encontrar en Pérez et al. (2013).

De este modo, se dispone de muestras de perfiles individuales de velocidad en varios segmentos de carretera convencional. Se considera segmento aquel tramo de carretera de características geométricas y operacionales aproximadamente constantes, sin intersecciones intermedias de importancia y de longitud suficiente para que los conductores desarrollen libremente sus velocidades. En la Tabla 1 se observan la localización y características básicas de los nueve segmentos, todos ellos situados en la provincia de Valencia.

De cada segmento se restituyó la geometría mediante software desarrollado a tal efecto (Camacho-Torregrosa et al., 2015). A partir de la geometría en planta, se seleccionó un total de 70 secuencias curva-recta-curva de diversas características. En estas secciones la longitud de recta varía entre 31 m y 1446 m, siendo el promedio de 409 m. Las curvas adyacentes presentan radios entre 66 m y 963 m, con un radio medio de 340 m.

La primera fase del análisis consistió en explorar la variabilidad de comportamientos individuales de los conductores en secuencias curva-recta-curva. El objetivo de

Tabla 1. Características de los segmentos de carretera convencional observados

Segmento	Longitud (km)	Radio mínimo (m)	IMD (veh/día)	Recorridos disponibles (ida/vuelta)
CV-35 [Tuéjar-Titaguas]	13,4	65	860	75/90
CV-35 [Calles - Losa del Obispo]	8,2	80	2257	120/121
CV-333 [Urb. Brugar-Pedravilla]	5,1	245	2419	101/89
CV-372 [La Poblá-Ribarroja]	4,5	85	2023	77/117
CV-370 [Villamarchante-Pedralba]	8,3	195	2523	61/79
CV-401 [Alfajar-El Saler]	6,0	80	5292	102/91
CV-376 [Pedralba-Llíria]	6,7	85	2656	58/53
CV-310 [Bétera-CV-305]	4,7	130	6809	74/58

dicho análisis era determinar si existía la posibilidad de extraer patrones de comportamiento, y definir los mismos de forma probabilística. Sin embargo, se observó que el comportamiento desagregado presentaba excesiva variabilidad, tanto en la posición de los puntos de inicio/fin de cambios de velocidad, como en las tasas de aceleración. Este comportamiento fue ya reflejado en la investigación de Pérez-Zuriaga et al. (2010).

Como resultado, se decidió obtener el perfil de velocidad de operación conjunto, a partir de la determinación de la velocidad de percentil 85 en cada punto. Habida cuenta del suficiente tamaño muestral reflejado en la Tabla 1, el resultado es un perfil de velocidad de operación que presenta mucha continuidad. En la Figura 1 se muestra la comparativa, para una determinada secuencia curva-recta-curva, de algunos perfiles individuales y del perfil agregado.

Para la realización del estudio de la velocidad desarrollada en tramos rectos, es necesario utilizar aquellas rectas en las que se llega a alcanzar una velocidad aproximadamente constante, fuera de las zonas de aceleración y deceleración. Por ello, los tramos rectos de carretera utilizados en este estudio se han identificado a partir de los perfiles continuos de velocidad, seleccionando aquellos en los que la velocidad se mantiene constante durante una cierta parte de ellos, diferenciándose claramente de los tramos de aceleración y deceleración.

De cada sección de análisis y de su correspondiente perfil de velocidad de operación, se han determinado una serie de variables a partir de las cuales se han realizado todos los cálculos necesarios para el posterior análisis. Estas variables se han agrupado de la siguiente forma:

- Características del segmento (s):
 - Ls: longitud (m).
 - Rms: radio mínimo (menor radio de las curvas del segmento) (m).
 - CCRs: índice de cambio de curvatura (gon/km).
 - V85ms: velocidad de operación media (km/h).
 - V85mxs: velocidad de operación máxima (km/h).
 - V85mis: velocidad de operación mínima (sin contar la de los extremos si hay intersecciones que la reduzcan) (km/h).

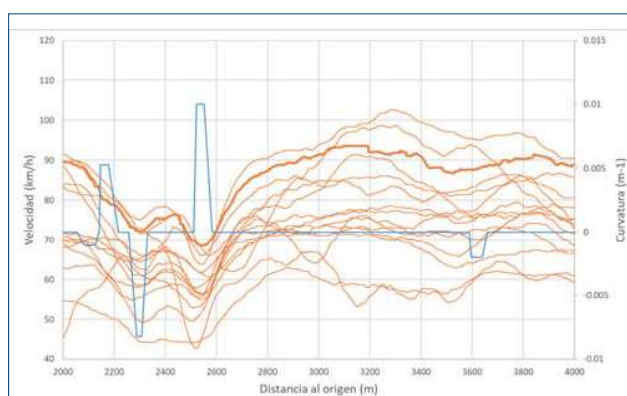


Figura 1. Perfiles de velocidad individuales (líneas finas) y percentil 85 agregado (línea naranja gruesa). Se representa frente al diagrama de curvaturas (eje derecho).

- Vds: velocidad de diseño (km/h), inferida a partir del radio en planta y considerando un peralte acorde con la Instrucción de Trazado 3.1- IC de 1999.
- Características de la sección de análisis (j):
 - Geometría:
 - Curva 1:
 - R1js: radio (m).
 - A11js: parámetro clotoide entrada (m).
 - A12js: parámetro clotoide salida (m).
 - W1js: ángulo de deflexión total (gon).
 - L1js: longitud total (m).
 - Lc11js: longitud clotoide entrada (m).
 - Lc12js: longitud clotoide salida (m).
 - Lr1js: longitud arco circular (m).
 - PKi1js: PK inicial.
 - PKf1js: PK final.
 - CCR1js: índice de cambio de curvatura (gon/km).
 - Recta:
 - Ltjs: longitud (m).
 - PKitjs: PK inicial (PKitjs = PKf1js).
 - PKftjs: PK final (PKftjs = PKi2js).
 - CCRjs: índice de cambio de curvatura de la sección completa (incluyendo ambas curvas) (gon/km).
 - Curva 2:
 - R2js: radio (m).

- A21js: parámetro clotoide entrada (m).
- A22js: parámetro clotoide salida (m).
- W2js: ángulo de deflexión total (gon).
- L2js: longitud total (m).
- Lc21js: longitud clotoide entrada (m).
- Lc22js: longitud clotoide salida (m).
- Lr2js: longitud arco circular (m).
- PKi2js: PK inicial.
- PKf2js: PK final.
- CCR2js: índice de cambio de curvatura (gon/km).
- Operación:
 - Curva 1:
 - V851js: velocidad mínima de operación (km/h).
 - PK851js: PK final de velocidad mínima de operación.
 - Recta:
 - V852js: velocidad máxima de operación inicial (km/h).
 - PK852js: PK inicial de velocidad máxima de operación.
 - V853js: velocidad máxima de operación final (no tiene por qué ser igual a V852js) (km/h).
 - PK853js: PK final de velocidad máxima de operación.
 - Curva 2:
 - V854js: velocidad mínima de operación (km/h).
 - PK854js: PK inicial de velocidad mínima de operación.
- Características globales:
 - Adelanto del inicio de aceleración: Lt1js=PKi2js-PK851js (m).
 - Retraso del final de deceleración: Lt2js=PK854js-PKf2js (m).
 - Longitud efectiva de recta: Ltejs=Ltjs+Lt1js+Lt2js (m).
 - Grado de velocidad de operación deseada: GV85djs= V85mxs- max(V852js; V853js) (km/h).
 - Incremento de velocidad de operación en aceleración: $\Delta V85ajs = V852js - V851js$ (km/h).

- Tasa media de aceleración de operación: a85js (m/s²).
- Disminución de velocidad de operación en deceleración: $\Delta V85djs = V854js - V853js$ (km/h).
- Tasa media de deceleración de operación: d85js (m/s²).

En la Figura 2 se observa cómo se determinan las variables principales asociadas a una sección de análisis, con base en el diagrama de curvaturas y el perfil de velocidad de operación. Básicamente, se trata de localizar en el perfil de velocidad de operación los cuatro puntos característicos de variación de la velocidad (1, 2, 3 y 4).

4. Análisis

Las primeras variables importantes son las longitudes de las curvas que son utilizadas para llevar a cabo variación de la velocidad. La longitud de curva inicial empleada para acelerar (Lt1) presenta un valor medio de 81,0 m, con un máximo de 336 m. Solo hay una sección de análisis donde este valor es negativo, es decir, que no se acelera dentro de la curva. La longitud de curva final empleada para decelerar (Lt2) arroja un valor medio de 82,2 m, con un máximo de 340 m. En este caso hay dos secciones donde la deceleración concluye antes de terminar la recta. Hay que recalcar que las longitudes anteriores no constituyen el total de longitud empleada para cambiar la velocidad, sino la porción que corresponde a los tramos curvos.

Sumando ambas longitudes a la propia de la recta obtenemos una longitud efectiva (Lte) superior a la longitud geométrica de la recta (Lt). Esta operación se ha realizado para todas las rectas, obteniendo la gráfica de la Figura 3. El ajuste lineal da como resultado una muy alta correlación entre las longitudes, con pendiente próxima a la unidad. Forzando la pendiente de la recta de ajuste a la unidad se obtiene que la longitud efectiva es igual a la longitud geométrica de la recta añadiéndole 142,59 m, independientemente de dicha longitud geométrica.

Así se ha verificado la primera hipótesis planteada, es decir, las variaciones de velocidad no se producen solo a lo largo de la recta intermedia. Además, el modelo resultante para la longitud de la recta efectiva, desde el punto de vista operacional, es muy simple y con mucha fortaleza estadística (Ecuación 1).

$$L_{te} = L_t + 142,59 \text{ (m)} \quad (1)$$

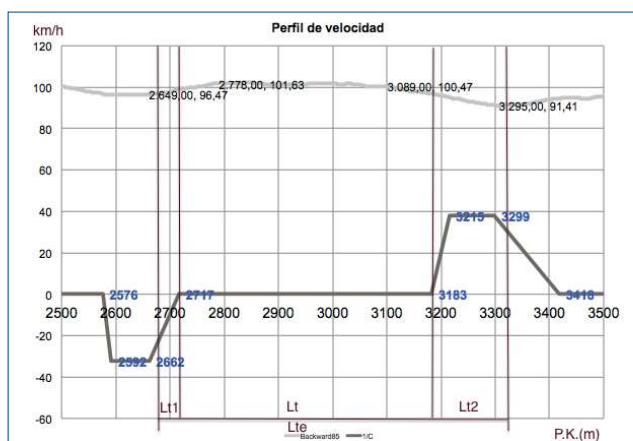


Figura 2. Esquema de determinación de las variables principales en un perfil de velocidad de operación de una sección de análisis.

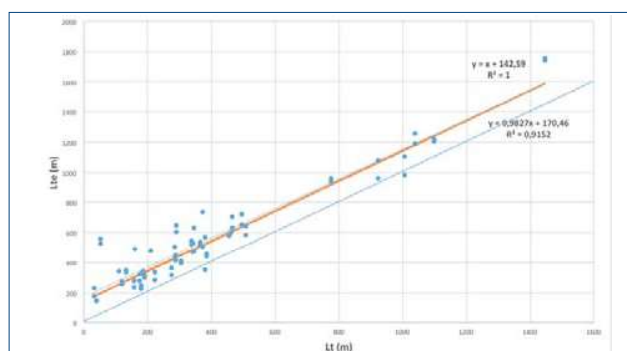


Figura 3. Relación entre la longitud geométrica y efectiva de las rectas.

Esta relación entre las longitudes efectiva y geométrica de la recta implica que, en promedio, la longitud efectiva es igual a la geométrica más una cierta constante, que aglutina las transiciones de velocidad en las curvas adyacentes. Como puede observarse, este diferencial es constante e independiente de la longitud de la recta. En la Figura 3 puede observarse cómo los residuos del ajuste no parecen presentar heterocedasticidad (si bien sería deseable contar con una muestra mayor de rectas de longitud superior a 600 m). La magnitud del residuo hace sugerir que otros parámetros, tales como el radio, longitud, e incluso la visibilidad juegan un papel importante en el diferencial L_{te} - L_t . Los dos primeros fueron analizados en el estudio, sin encontrar evidencias de suficiente fortaleza estadística. El tercero no pudo evaluarse, al no disponer para los segmentos de estudio de perfiles de visibilidad de suficiente precisión.

La segunda hipótesis a verificar implica que los conductores se aproximan más a su velocidad deseada a medida que la longitud de recta es mayor. Esto supone relacionar las longitudes de las rectas, tanto geométrica (L_t) como efectiva (L_{te}), con el grado de velocidad de operación deseada (GV_{85d}). En las Figuras 4 y 5 se observan las relaciones entre dichas variables y se verifica la hipótesis planteada, aunque aparece cierta dispersión para longitudes reducidas. Esta es debida a la influencia de otras variables, como los radios de las curvas en los extremos y, por tanto, a sus velocidades de operación. Para rectas largas, independientemente del radio de las curvas adyacentes, los conductores disponen de longitud suficiente para adquirir una velocidad mayor y, por tanto, acercarse a su velocidad deseada. En rectas cortas la influencia de las curvas adyacentes es mucho mayor. Para radios reducidos, la velocidad alcanzada en la recta distará mucho de la deseada, siendo mucho menor la limitación cuando los radios son más amplios. También influye el nivel de la velocidad de operación de referencia del segmento, que es la máxima observada a lo largo del mismo. Esta velocidad de operación se corresponde siempre con rectas largas, estando afectada por variables generalmente asociadas a la sección transversal o al entorno.

También se evaluó la posibilidad de que el diferencial observado se debiera a la existencia de límites de velocidad, tanto específicos como genéricos. La sección transversal y características globales de los segmentos empleados en el estudio son muy similares, generalmente con arcones reducidos y velocidades genéricas de 80 ó 90 km/h. En cuanto a las curvas, la mayoría no presenta limitación específica, siendo las que lo presentan de tipo máximo o recomendable. En un primer análisis exploratorio de su posible influencia no se encontró relación clara con las velocidades desarrolladas, por lo que se descartó su inclusión en el modelo.

La siguiente hipótesis planteada, acorde con la vigente Instrucción de Trazado 3.1 IC (Ministerio de Fomento, 2016), supone que, a menor velocidad de diseño, menor es la longitud mínima de la recta para ser considerada independiente. Para analizar esto, se comparará el grado de velocidad

de operación deseada para diferentes rectas para diferentes velocidades de diseño. En la Figura 6 se observa que, para el conjunto global de secciones, el grado de velocidad deseada no depende de la velocidad de diseño. Si se agrupan las secciones en tres subgrupos con velocidades de diseño próximas a 50, 60 y 70 km/h, y se calculan los promedios del grado de velocidad de operación deseada para longitudes de rectas menores de 200, 300, 400 y todas ellas, se obtiene la gráfica de la Figura 7. En ella se comprueba que no existe la relación planteada en la hipótesis, por lo que se refuta la misma.

La última hipótesis propone que hasta cierta longitud de recta existe condicionamiento operacional entre las curvas de los extremos. Rectas muy cortas implican que no se alcanza la velocidad deseada, aspecto que cambia en rectas largas. Esta conjetura puede ser verificada a través de la influencia que tiene la longitud de la recta en la reducción de la velocidad al final de la recta, es decir, la diferencia entre la velocidad máxima de operación final de la recta (V_{85js}) y la velocidad mínima de operación de la curva 2 (V_{854js}). En la Figura 8 se puede observar cómo a mayor longitud de recta hay una tendencia hacia una mayor reducción de velocidad, si bien la dispersión también es elevada. En la figura se han destacado los valores según los umbrales de reducción de velocidad de operación propuestos por Lamm et al. (1999), es decir, 10 y 20 km/h. Cuanto menor es la reducción de velocidad mayor condi-

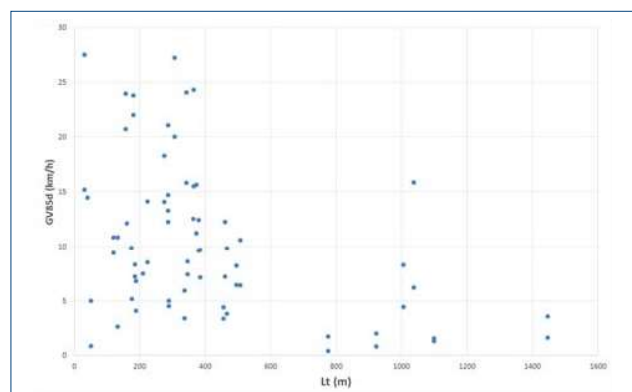


Figura 4. Relación entre la longitud geométrica de las rectas y el grado de velocidad de operación deseada.

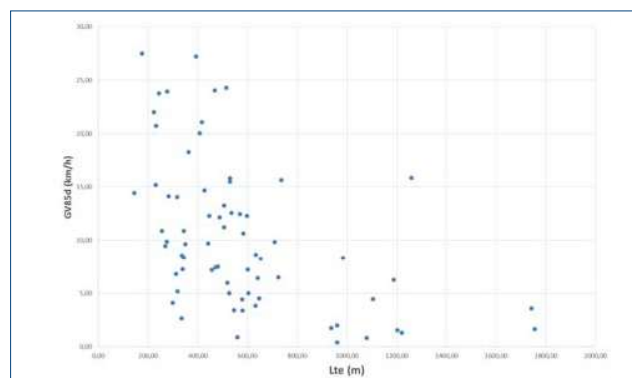


Figura 5. Relación entre la longitud efectiva de las rectas y el grado de velocidad de operación deseada.

cionamiento existe entre las curvas y, por tanto, menos independiente será la recta. Así, se ha calificado la independencia de las rectas en débil, intermedia y fuerte, siguiendo los umbrales de consistencia de Lamm et al. (1999).

Cabe tener en cuenta que la reducción de velocidad dependerá no solo de la longitud de la recta, sino también de la velocidad de operación de la curva final. Es decir, si se trata de una curva con alta curvatura, se fomentarán las deceleraciones elevadas, mientras que en curvas suaves la reducción tenderá a ser menor, independientemente de la longitud de la recta. De ahí la dispersión que se puede apreciar en la figura anteriormente referida.

Otra forma de abordar el contraste de esta hipótesis es a través del análisis de la influencia que tiene la longitud de la recta en la diferencia de velocidad de operación entre la media de las velocidades máximas de operación en la recta (V852js, V853js) y la media de las velocidades de operación de las curvas (V851js, V854js). En la Figura 9 se puede observar cómo a mayor longitud de recta hay una más clara tendencia hacia una mayor variación de la velocidad de operación. En la figura se han destacado los valores según los umbrales de reducción final de velocidad de operación de la figura anterior (10 y 20 km/h), calificando de la misma forma la independencia de las rectas en débil, intermedia y fuerte. Se vuelve a apreciar que cuanto menor es la variación de velocidad de operación mayor condicionamiento existe entre las curvas y, por tanto, menos independiente es la recta. En este caso se ve de forma más evidente el cambio de dispersión entre

umbrales, pues se tiene en cuenta tanto la velocidad de partida como la final para cada recta.

Por tanto, a través de los dos análisis realizados se puede verificar la hipótesis formulada, es decir, que cuanto más longitud presenta la recta mayor independencia adquiere al acoger unas variaciones de velocidad de operación mayores.

5. Discusión

Una vez contrastadas las hipótesis, se ha realizado una comparación entre los parámetros de las secciones estudiadas y los que la Instrucción 3.1-IC anterior (Ministerio de Fomento, 1999) y la vigente Instrucción 3.1-IC (Ministerio de Fomento, 2016) establecen que deberían tener. Así, de las 70 secciones estudiadas, habría 33 secciones que no cumplirían con la Norma anterior y 43 que no lo harían para la nueva Norma.

En la anterior Norma, el criterio establecido para distinguir rectas independientes de no independientes era muy claro y sencillo, ya que las rectas superiores a 400 metros eran consideradas como independientes sin tener en cuenta otros factores que pueden influir. En cambio, en la nueva Norma (Tabla 2), esta longitud aumenta con la velocidad de proyecto.

Esto ha quedado demostrado en el análisis de velocidad en rectas que no se cumple, ya que trazados con radios menores implican menores velocidad de operación en las curvas, y por lo tanto precisarán de mayor longitud en las rectas para ser consideradas independientes. Es de-

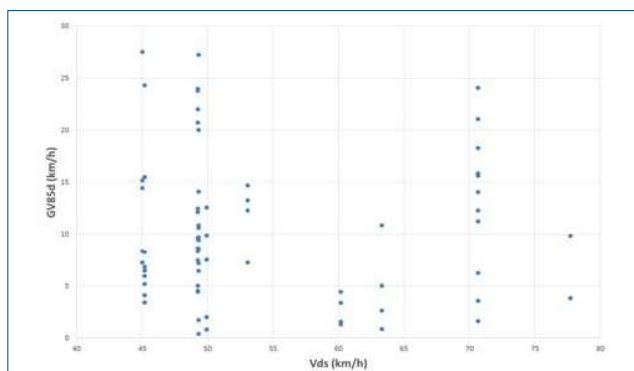


Figura 6. Relación entre la velocidad de diseño del segmento y el grado de velocidad de operación deseada.

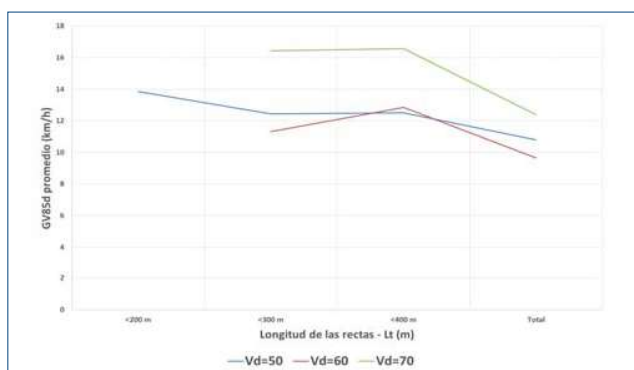


Figura 7. Relación entre la velocidad de diseño del segmento, las longitudes de las rectas y el promedio del grado de velocidad de operación deseada.

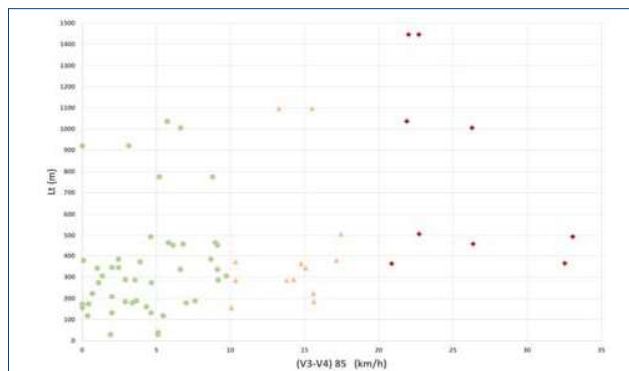


Figura 8. Relación entre la longitud de la recta y la reducción de velocidad de operación al final de la recta.

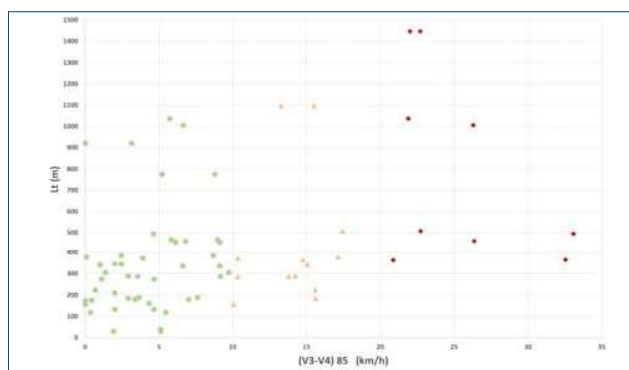


Figura 9. Relación entre la longitud de la recta y la media de la variación de la velocidad de operación al inicio y final de la recta.

cir, la actual Norma no solo no refleja la realidad, sino que el criterio establecido se ha escalado de manera inversa.

Del total de las rectas de las secciones, según la Norma anterior, 22 serían rectas independientes y según la nueva Norma, todas serían rectas independientes excepto cuatro. Esto es muy llamativo, ya que una proporción de rectas independientes del 94% no parece muy consistente, puesto que según esta misma Norma el diseñador está obligado en dichos casos a aumentar los radios de las curvas adyacentes de una forma muy generalizada a lo largo del trazado. Esto conlleva elevar la velocidad media de operación del segmento, separando aún más la velocidad de operación de la de diseño designada al inicio del proceso.

Para profundizar en el análisis y obtener conclusiones prácticas, partiendo de la Figura 7 se ha realizado una agrupación de los casos, proponiendo tres grupos y determinando el centroide de cada uno, así como la dispersión media en términos de longitud de recta y reducción última de velocidad. Para identificar mejor los niveles de independencia se han utilizado distintos colores (Figura 10).

Observando el gráfico de la Figura 10, se podrían situar las líneas marcadas en rojo y verde que muestran las fronteras entre los distintos niveles de independencia de las rectas y, por tanto, la mayor o menor holgura de la relación de los radios de entrada y salida. Así, se puede distinguir claramente entre tres grupos de secciones según su longitud: 0-200 metros, 200-400 metros y secciones de longitud superior a 400 metros. Por encima de los 200 m se encuentran la mayoría de secciones con rectas de independencia intermedia o fuerte, mientras que por encima de los 400 m se hallan la mayoría de las secciones con rectas de independencia fuerte.

6. Conclusiones

La investigación experimental desarrollada ha permitido llegar a diversas conclusiones sobre la influencia de la longitud de las rectas en la consistencia del diseño geométrico. Para ello se han analizado datos existentes, los cuales fueron obtenidos mediante la observación continua de la evolución de una muestra de vehículos ligeros recorriendo nueve tramos de carretera convencional. Se han seleccionado 70 secciones constituidas por una recta entre dos curvas.

Tabla 2. Longitud mínima de recta para ser independiente (Instrucción 3.1-IC, 2016).

Velocidad de proyecto (Vp) del tramo (km/h)	Máxima longitud de una alineación recta para ser considerada de longitud limitada (m)
140, 130, 120, 110 y 100	400
90	300
80	230
70	175
60	85
50	50
40	30

La primera conclusión importante es que el comportamiento general de los conductores es iniciar su aceleración antes de que concluya la primera curva y completar su deceleración ya dentro de la segunda curva. Por tanto, se ha encontrado que hay una longitud de recta efectiva mayor que la longitud geométrica y el modelo resultante es muy simple, ya que la longitud efectiva parece guardar una relación constante con la longitud geométrica, siendo la primera aproximadamente 145 m superior a la última, sin que influyan otras variables.

La segunda conclusión se corresponde con la verificación de que a mayor longitud de recta, los conductores se aproximan más a su velocidad deseada. Esta relación presenta cierta dispersión debida a la influencia de otras variables, como las velocidades de operación de las curvas adyacentes. También influye el nivel de la velocidad de operación de referencia del segmento, que es la máxima observada a lo largo del mismo.

La tercera conclusión supone la refutación de la hipótesis que subyace en lo dispuesto en la vigente Instrucción de Trazado para establecer la máxima longitud de recta para ser considerada de longitud limitada (recta dependiente) en función de la velocidad de diseño (proyecto). En esta investigación ha quedado demostrado que ciertamente hay una relación, pero esta es completamente contraria a la prescrita en la tabla 4.2 de la Instrucción de Trazado.

Al verificar la cuarta hipótesis se concluye que hasta cierta longitud de recta existe condicionamiento operacional entre las curvas de los extremos, por lo que se ha llegado a proponer unos umbrales de longitud de recta que marcan el nivel de independencia de la recta, asociados a las variaciones de velocidad entre la recta y las curvas. Se han propuesto tres grupos de rectas:

- Grupo 1 – rectas muy dependientes: $L_t \leq 200$ m.
- Grupo 2 – rectas dependientes: $200 < L_t \leq 400$ m.
- Grupo 3 – rectas independientes: $L_t > 400$ m.

En el primer nivel se encuentra la zona de relación de radios estricta en la que, según los resultados obtenidos,

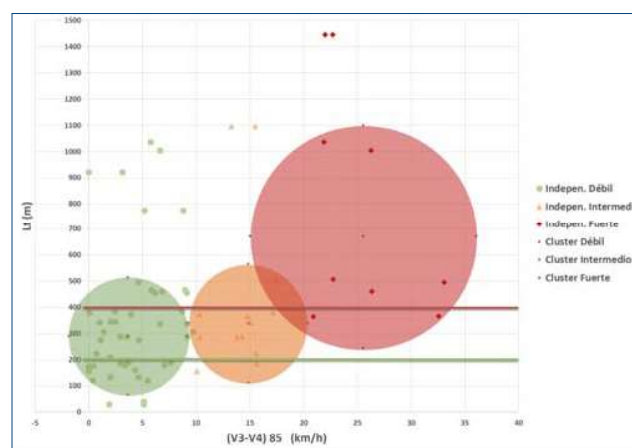


Figura 10. Niveles de independencia de la recta según la relación entre la longitud de la recta y la reducción de velocidad de operación al final de la recta

la proporción entre el radio de entrada y salida no permite apenas variación. Este criterio sólo será válido para valores de longitudes de recta inferiores a 200 metros.

El segundo nivel delimita el rango de longitudes para el que la relación entre radios consecutivos puede tener cierta holgura. Pese a existir una dependencia entre ambos radios, esta no es tan restrictiva como en el caso de rectas inferiores a 200 metros.

Por último, se encuentra el grupo menos restrictivo, conformado por rectas de longitud superior a 400 metros. En este caso, se considera que a partir de esta longitud de recta, el radio de la curva de entrada no tiene influencia sobre el conductor a la hora de afrontar la curva de salida.

Como evolución de esta investigación, se debería fijar una relación de radios para cada intervalo de longitud de recta a la vista de los resultados obtenidos, siendo más estricta la proporción de radios para el Grupo 1 que para el Grupo 2. Para el Grupo 3, donde las rectas son independientes, lo que primará será fijar un radio mínimo de las curvas de los extremos y no una proporción máxima entre los radios de las curvas. Después de analizar la normativa anterior y la nueva Norma, parece que la mejor opción para solucionar la problemática es hacer una combinación de las dos. Así, para relaciones de radio estrictas (Grupo 1) se propone utilizar la Norma nueva y para las relaciones de radios intermedias (Grupo 2) la anteriormente vigente, que era menos estricta. Para poder aplicar la Norma que corresponda en cada caso, bastaría regirse por los umbrales propuestos en la presente investigación. Asimismo, el estudio detallado de estos comportamientos podría permitir el desarrollo de modelos de velocidad de operación en rectas de mayor precisión que los existentes en la actualidad.

Con los resultados obtenidos del análisis de la muestra de secciones, se ha llegado a varias conclusiones que contradicen y complementan la vigente Norma de Trazado. De la continuación de esta investigación, se podrán proponer criterios alternativos específicos para las características de las rectas y sus curvas en los extremos que estén correlacionados con la mejora de la consistencia del diseño geométrico y, por tanto, con el incremento de la seguridad vial.

Agradecimientos

El desarrollo de esta investigación se enmarca dentro del proyecto "CASEFU – Estudio Experimental de la Funcionalidad y Seguridad de las Carreteras Convencionales", con referencia TRA2013-42578-P, subvencionado por el Ministerio de Economía y Competitividad.

Asimismo, la toma de datos continuos de velocidad en la que está basada este proyecto se llevó a cabo dentro del proyecto "REVEL – Una Metodología para la Revisión de los Límites de Velocidad", de referencia PT-2006-031-25 IAPP, gracias a la subvención parcial recibida del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Ministerio de Fomento).

Referencias

- CAMACHO-TORREGROSA, F.J.; PÉREZ-ZURIAGA, A.M., CAMPOY-UNGRÍA, J.M.; GARCÍA, A. Y TARKO, A. (2015). Use of Heading Direction for Recreating the Horizontal Alignment of an Existing Road. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 30(4), pp. 282-299.
- EASA, S. (2003). Improved Speed-Profile Model for Two-Lane Rural Highways. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 30, pp. 1055-1065.
- FITZPATRICK, K.; ELEFTERIADOU, L.; HARWOOD, D.; COLLINS, J.; MCFADDEN, J.; ANDERSON, I.; KRAMMES, R.; IRIZARRY, N.; PARMA, K.; BAUER, K. Y PASSETI, K. (2000). Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways. FHWA Report.
- FITZPATRICK, K. Y COLLINS, J. (2000). Speed-Profile Model for Two-Lane Rural Highways. *Transportation Research Record*, vol. 1737, pp. 42-49.
- GARCÍA, A.; LLOPIS-CASTELLÓ, D.; CAMACHO-TORREGROSA, F.J. Y PÉREZ-ZURIAGA, A. (2013). New Consistency Index Based on Inertial Operating Speed. *Transportation Research Record*, vol. 2391, pp. 105-116.
- HASSAN, Y. (2004). Highway Design Consistency: Redefining the State of Knowledge and Practice. *Transportation Research Record*, vol. 1881, pp. 63-71.
- LAMM, R.; CHOUEIRI, E. M. Y MAILAENDER, T. (1992). Traffic safety on two continents—a ten year analysis of human and vehicular involvements. *Proceedings of the Strategic Highway Research Program (SHRP) and Traffic Safety on Two Continents*, pp. 18-20.
- LAMM, R.; PSARIANOS, B. Y MAILAENDER, T. (1999). *Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*. Editorial McGraw-Hill.
- LAMM, R.; BECK, A.; RUSCHER, T.; MAILAENDER, T.; CAFISO, S. Y LA CAVA, G. (2007). *How to Make Two-Lane Rural Roads Safer*. Editorial WITPress.
- LLOPIS-CASTELLÓ, D.; BELLA, F.; CAMACHO-TORREGROSA, F.J. y GARCÍA, A. (2018). New Consistency Model Based on Inertial Operating Speed Profiles for Road Safety Evaluation. *Journal of Transportation Engineering – ASCE. Part A: Systems*. Vol 144(4), pp. 04018006-1 - 04018006-10.
- NICHOLSON, A. (1998). Superelevation, Side Friction and Roadway Consistency. *Journal of Transportation Engineering*. Vol 124, nº 5. pp. 411-418.
- OTTESEN, J. Y KRAMMES, R. (2000). Speed-Profile Model for a Design-Consistency Evaluation Procedure in the United States. *Transportation Research Record*, vol. 1701, pp. 76-85.
- PÉREZ-ZURIAGA, A.M.; GARCÍA, A.; CAMACHO-TORREGROSA, F.J. Y D'ATTOMA, P. (2010). Modeling Operating Speed and Deceleration on Two-Lane Rural Roads with Global Positioning System Data. *Transportation Research Record*, vol. 2171, pp. 11-20.
- PÉREZ-ZURIAGA, A.M.; CAMACHO-TORREGROSA, F.J.; CAMPOY-UNGRÍA, J.M. Y GARCÍA, A. (2013). Application of Global Positioning System and Questionnaires Data for the Study of Driver Behavior on Two-Lane Rural Roads. *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 7(2), pp. 182-189.
- POLUS, A.; FITZPATRICK, K. Y FAMBRO, D. (2000). Predicting Operating Speeds on Tangent Sections of Two-Lane Rural Highways. *Transportation Research Record*, vol. 1737, pp. 50-57. ❖