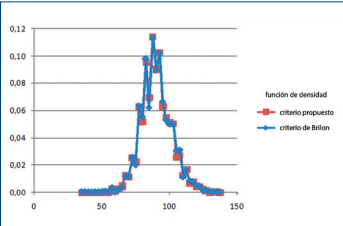


Valores característicos de circulación en carreteras de dos carriles para su empleo en simulación



Characteristic values on circulation on two-lane roads for use in case of simulation

Manuel Romana García
Doctor Ingeniero de Caminos
Escuela de Ingenieros de Caminos
Universidad Politécnica de Madrid

Guillermo Castilla
Master en Sistemas de Ingeniería Civil
Universidad Europea de Madrid
Escuela Politécnica

Resumen

Las carreteras de dos carriles no son fáciles de modelar. Los modelos macroscópicos generalmente omiten la estructura de cola, esencial para describir el nivel de servicio. Los modelos microscópicos son más adecuados, pero en términos prácticos pueden ser considerados inadecuados, ya que requieren la introducción de datos que no están disponibles para la mayoría de las áreas. Este documento trata de proporcionar información para mejorar el uso de los modelos microscópicos, en particular para la Comunidad de Madrid.

Los vehículos tradicionales son turismos, camiones, autobuses y motocicletas. Sin embargo, está claro que la congestión en las carreteras está causada por los vehículos pesados, pero también por vehículos más lentos, cuando ambos circulan a una velocidad inferior a la deseada. Estos vehículos más lentos pueden circular de forma aislada o como líderes de pelotón.

Este artículo se centra en la distribución de velocidad de los diferentes tipos de vehículos y la estructura de cola, para establecer los procedimientos de medición, y sobre los errores que surgen cuando se tienen en cuenta vehículos aislados o líderes de pelotón. También proporciona información estadística sobre la distribución de la velocidad deseada y sobre la conducción de día o de noche en carreteras de dos carriles en la Comunidad de Madrid.

Se propone un nuevo criterio sobre el vehículo aislado, lo que permite unas condiciones menos restrictivas y un aumento de tamaño de las muestras. Se establecen otras conclusiones con respecto a la inclusión de todos los líderes de pelotón en cuanto al diseño de velocidad, y si los líderes de cola corta pertenecen a la misma población que los de colas largas cuando se tiene en consideración la longitud de cola detrás de un vehículo.

PALABRAS CLAVES: simulación, modelos de cola, carreteras de dos carriles, distribución de velocidad.

Abstract

Two-lane roads are not easy to model. Macroscopic models usually omit the queue structure, essential for characterizing the level of service. Microscopic models are more adequate, but in practical terms they can be considered inadequate, since they require the introduction of data unavailable for most areas. This paper seeks to provide information to improve the use of microscopic models, in particular for the Madrid Region.

Traditional vehicle types are passenger cars, trucks, buses and motorcycles. However, it is clear that congestion is caused by heavy vehicles, but also by slower cars, both having lower desired speeds. These slower vehicles can travel isolated or as platoon leaders.

This paper focuses on the speed distributions of different vehicle types and queue structure, to establish measurement procedures and what errors arise from considering isolated vehicles or queue leaders. It also provides statistical information on desired speed distributions and day and nighttime driving in two-lane roads in the Madrid region.

A new isolated vehicle criterion is proposed, allowing less restrictive conditions and larger sample sizes. Other conclusions are established regarding the inclusion of all platoon leaders in design speed considerations, and whether different populations can be established regarding queue length behind a vehicle.

KEY WORDS: simulation, queue models, two-lane roads, speed distribution.

1. Introducción

En la actualidad, el uso de *software* de simulación microscópica para el modelado del transporte está muy extendido. Sin embargo, no hay ningún modelo extensamente aceptado para carreteras convencionales. Todos los simuladores basan la generación de vehículos y tráfico de sus modelos en leyes de velocidades deseadas, o en velocidades obtenidas a partir de la geometría del trazado. Generalmente estas leyes no han sido contrastadas con investigaciones que aseguren que se adecuan a la realidad. Esto ocurre en el caso de España, así como en otras muchas regiones. Éste artículo pretende dar información experimental aplicada a modelos españoles, específicamente en la Comunidad de Madrid.

2. Estado del arte

2.1. Simulación

En carreteras convencionales el uso de simulaciones es menos común que en autovías, autopistas y otras vías arteriales debido a las dificultades que surgen a la hora de reproducir las interacciones que se dan entre vehículos que circulan en sentidos opuestos. Congestión y adelantamientos no dependen solamente del tráfico en un sentido, sino que también les influye las características geométricas de ese segmento de carretera, las limitaciones legales a la velocidad y su nivel de acatamiento. Para simular esta situación, los programas más utilizados y conocidos, son: VTI (sueco), TRARR (australiano), ambos desarrollados en la década de los setenta, y TWOPAS, desarrollado por la FHWA en Estados Unidos. TWOPAS es el modelo de simulación del paquete IHSDEM para el análisis de la consistencia de diseño de carreteras convencionales, lo que significa que su uso va en aumento. Hoy día hay otros paquetes de *software*, como CORSIM que busca convertirse en una referencia en el mundo de las simulaciones de tráfico.

Tabla 1. Lista de símbolos y abreviaturas	
V85	Percentil 85 de la distribución de velocidades deseadas.
V99	Percentil 99 de la distribución de velocidades deseadas.
V85 _{@PC200}	Percentil 85 de la distribución de velocidades deseadas 200 m antes de la curva PC.
Sx	Desviación Típica.
R	Radio de curvatura.
GC	Grado de curvatura.
CCR	Ratio de Cambio de Curvatura.
Lc	Longitud de la curva.
Ω	Ángulo girado total.
Lr	Longitud de la recta que precede a la curva.
Vr	Velocidad de operación en aproximación a la curva.

Un estudio de evaluación de los paquetes de *software* de simulación, conducido por BOTHA (1993), comparaba la aplicabilidad de TRARR y TWOPAS en Estados Unidos. BOTHA concluyó que ambos realizaban simulaciones más que aceptables a la hora de simular este tipo de vías, pero el que resultó mejor fue TWOPAS por modelar con límites de 80 km/h, que puede utilizarse como referencia a la hora de realizar comparativas con el caso español.

Koorey (2003) estudió la aplicabilidad de modelos de simulación para carreteras convencionales en Nueva Zelanda, concluyendo que TRARR es el programa más adecuado para éste país debido a la gran cantidad de estudios realizados que lo respaldan.

El modelo sueco, conocido como VTI, no está disponible ni para profesionales del sector ni para investigadores, y por lo tanto es usado casi exclusivamente por sus creadores. Esto significa que es difícil tener un juicio comparativo independiente de la validez de su aplicabilidad.

Suárez (2007) estudió la aplicabilidad del reciente paquete VISSIM al caso de intersecciones urbanas en

Colombia. Previamente a este estudio, realizó otro aplicando el paquete a carreteras convencionales de dos carriles, lo cual, como en el caso de BOTHA, puede ser considerado una referencia la hora de buscar comparativas de resultados para el caso español.

VISSIM fue creado originalmente para simular tráfico urbano con señalización vertical. Para otras vías, como autopistas o carreteras convencionales, aún tiende a presentar algunos problemas. PARAMICS es un simulador para autovías, pero puede modelar carreteras convencionales de dos carriles bajo condiciones muy simplificadas.

La más reciente inclusión en la lista es el modelo CORSIM. Su módulo para carreteras de dos carriles ha sido desarrollado basándose en Washburn & Li 2010. Pero su reciente distribución significa que su aplicabilidad a carreteras convencionales en España es tan dudosa como el resto de los simuladores mencionados.

Concluimos que no hay unanimidad sobre lo adecuado de utilizar modelos de simulación microscópica para el estudio de carreteras convencionales de dos carriles en España. Particularmente si consideramos que no hay ningún estudio sólido que pueda alimentar a los simuladores con datos apropiados de los últimos años.

2.2. Cálculo de la V85 basado en el diseño geométrico.

Las velocidades deseadas en recta para carreteras convencionales que se pueden encontrar en estudios e investigaciones son muy variadas. Hay por lo tanto poca certeza en los resultados, ya que dependen del modelo escogido en cada caso. La velocidad de operación (V85) se define en el Manual de Capacidad del 2010, así como en la mayor parte de los manuales de diseño geométrico (Fomento 2001; AASHTO 2011), como el percentil 85 de la distribución de velocidades deseadas.

Tabla 2. Listado cronológico de los valores propuestos por diversos autores para la estimación de la velocidad de operación considerando todos los vehículos de la vía.				
Autor/es	Ecuación	Estimación para la conducción en un tramo recto	Año	País
Cardoso et al.	$V_{85} = 35086 - 289999/\sqrt{R} + 0,759V_r + c$	N/A	1998	Several
Ottesen&Krames	$V_{85} = 103,66 - 1,95GC$ $V_{85} = 102,44 - 1,57 GC + 0,012Lc - 0,01GC Lc$ $V_{85} = 41,62 - 1,29GC + 0,0049Lc - 0,12 GC Lc + 0,95V_r$	$V_{85} = 103,66 V_{85_{@PC200}} = 102,44$ $V_{85} = 41,62$	2000	USA
McFadden & Elefteriadou	$V_{85} = -14,90 + 0,144V_{85_{@PC200}} + 0,0153L_r + 954,55/R$ $V_{85} = -0,812 + 0,0017L_r + 998,19/R$	$V_{85} = -14,90 + 0,144V_{85_{@PC200}}$	2000	USA
Gibreel et al.	$V_{85} = 102,2 - 0,10\Omega$	$V_{85} = 102,2$	2001	USA
Missaghi y Hassen	$V_{85} = 91,85 + 9,81 \cdot 10^{-3}R$ $V_{85} = 94,30 + 8,67 \cdot 10^{-6}R^2$	$V_{85} = 91,85$ $V_{85} = 94,30$	2005	Canada
Castro et al.	$V_{85} = 120,16 - 5596,72/R$	$V_{85} = 120,16$	2006	Spain

La Tabla 2 resume el desarrollo de criterios de estimación de la V85 que solo toman como referencia la geometría de la vía, dónde los principales parámetros involucrados son:

- R: radio de curvatura
- GC: grado de curvatura
- CCR: ratio de cambio de curvatura
- Lc: longitud de la curva
- Ω: ángulo girado total
- Lr: longitud del tramo recto anterior a la curva.
- Vr: velocidad de operación en aproximación a la curva.

Es llamativo que la estimación de Castro (2006) es aproximadamente un 20% superior que la mayoría de los valores aportados. En este caso de estudio, Castro (2006), se considera el más adecuado para el caso de Madrid, ya que es resultado de investigaciones llevadas a cabo en carreteras españolas.

2.3. Intervalos críticos

De cara a establecer si un vehículo viaja a su velocidad deseada (aislados y líderes de cola) o si forma parte de una cola, es necesario considerar un intervalo de tiempo crítico para poder decidir si a la

velocidad de un vehículo le afecta la de sus predecesores o no. Brilon (1977) establece el intervalo crítico en 5 segundos para marcar a un vehículo como seguidor. También estipula que los vehículos pueden ser considerados aislados con seguridad cuando queden fuera del rango de 15 segundos de sus predecesores y a menos de 5 segundos de sus seguidores.

Harwood en su estudio para el Manual de Capacidad (HCM) en el 2000 redujo el rango aún más, dejando en 3 segundos el tiempo crítico de los seguidores, criterio que permanece constante en la revisión de éste del año 2010.

2.4. Distribuciones y estimaciones estadísticas

Los modelos estadísticos para distribuciones de velocidad en carreteras convencionales de dos carriles no son objeto frecuente de investigación. El caso español de este campo apenas ha sido acometido y los estudios existentes generalmente los conforman datos muy antiguos. Por lo tanto es un área a considerar para nuevas líneas de investigación.

Gerlough (1977) caracterizó las distribuciones de velocidad de datos medidos vehículo a vehículo como distribuciones normales y distribuciones beta, pero sus conclusiones son para autopistas.

Gardeta (1983) confirma las afirmaciones dadas por Gerlough en su tesis doctoral, adaptándolas al caso de carreteras convencionales de dos carriles. Su estudio demuestra que usar el modelo beta es sólo una muy ligera mejora sobre la distribución normal. Por lo tanto será en general más fácil utilizar esta última.

3. Objetivos

Este artículo busca aportar algunos valores de referencia que puedan ser utilizados para calibrar modelos microscópicos que puedan ser aplicados al caso español, en particular a la Comunidad de Madrid. El estudio tiene cuatro objetivos principales:

1. Obtener la distribución de velocidades deseadas de cara a su posible uso en la simulación de casos dentro de la Comunidad de Madrid a partir de grandes conjuntos de datos. En la mayor

parte de los casos estas distribuciones de velocidad se obtienen de muestras (pequeñas) de vehículos aislados, midiendo sus velocidades en curvas o tramos rectos. Si Brilon (1977) tiene razón hay velocidades deseadas más bajas que no se están considerando: las de los líderes de cola.

2. Examinar el criterio de Brilon para vehículos aislados e intentar utilizar una definición alternativa que dé los mismos resultados pero tamaños de muestra mayores. Brilon (1977) toma una aproximación muy conservadora al problema ya que su objetivo se limita a localizar con mucha seguridad a aquellos vehículos que circulen aislados. Esto es un problema cuando se trabaja con series de datos cortas, ya que las muestras que resultan de un criterio tan conservador generalmente son muy pequeñas.
3. Contrastar las velocidades de los líderes de cola para comprobar que los líderes de colas cortas pertenecen a la misma población que los líderes de colas largas.
4. Obtener un estimador puntual del valor de la desviación típica, comparándola con los valores de la media, ya que tradicionalmente se estima la desviación como un 10 % de ésta.

4. Datos

Los datos utilizados para este estudio provienen de la red de estaciones de detectores de doble lazo de la Comunidad de Madrid, que registra la información vehículo a vehículo. Los datos fueron recogidos en períodos de aproximadamente tres días por estación entre los días 17 y 27 de diciembre del 2009. Tres estaciones pertenecen a la carretera M-501 y otras tres a la M-607. La descripción de los datos de posición y tiempo de campaña se resumen en la Tabla 3.

5. Procesado de los datos

La longitud crítica de los vehículos ligeros se estableció en 5,5 m, según las recomendaciones del Manual de Capacidad, considerándose vehículo pesado cualquiera que superase esta cifra.

Se decidió estudiar la división en colas de los vehículos atendiendo a dos criterios: el propuesto por Brilon (1977) y un criterio alternativo que propone este artículo. Ambos criterios establecen cinco grupos principales tanto para vehículos ligeros como para pesados. Esto grupos son:

1. Aislados – El criterio propuesto establece los tiempos críticos en

5 segundos por delante y 5 por detrás, mientras que el criterio de Brilon establece estos tiempos en 15 segundos por delante y 5 segundos por detrás.

2. Colas de 2 – Líderes de colas formadas por dos vehículos. Los seguidores se definen como cualquier vehículo dentro del rango de 3 segundos consecutivos a su predecesor. Los líderes de cola son aquellos que se encuentran a más de 5 segundos de su predecesor.
3. Colas de 3 – Líderes de colas formadas por 3 vehículos. Las definiciones de líder y seguidor son las mismas que para las colas de dos vehículos.
4. Colas de 4 – Líderes de colas formadas por 4 vehículos. Las definiciones de líder y seguidor son las mismas que para las colas de dos vehículos
5. Colas de 5 o más – Líderes de colas formadas por 5 vehículos. Las definiciones de líder y seguidor son las mismas que para las colas de dos vehículos.

Se realizó un análisis estadístico para obtener las velocidades V85 y V99 de cada grupo. También se calcularon la media, la mediana, la desviación típica y las velocidades máximas y mínimas de cada grupo. La Tabla 4 muestra un extracto de este análisis.

Tabla 3. Resumen de datos de las seis estaciones.						
Carretera	M-501			M-607		
Código de estación	572	586	587	626	629	632
P.K.	53,8	56,11	62,12	57,3	50,41	37,5
Sentido 1	San Martín de Valdeiglesias	San Martín de Valdeiglesias	Ávila	Navacerrada	Becerril de la Sierra	Colmenar Viejo
Sentido 2	Navas del Rey	Pelayos de la presa	San Martín de Valdeiglesias	Cerceda	Cerceda	Cerceda
Inicio del intervalo	11:36 17 – DIC – 2009	11:47 17 – DIC – 2009	11:58 17 – DIC – 2009	08:12 21 – DIC – 2009	08:21 21 – DIC – 2009	08:32 21 – DIC – 2009
Fin del intervalo	13:30 19 – DIC – 2009	12:13 19 – DIC – 2009	15:55 20 – DIC – 2009	00:44 27 – DIC – 2009	07:32 23 – DIC – 2009	18:26 22 – DIC – 2009
Vehículos aforados	18.959	18.978	19.004	18.961	18.956	18.847

Tabla 4. Ejemplo de la similitud entre los resultados obtenidos con ambos criterios.						
	Método propuesto					
	Total	Aislados	Colas de 2	Colas de 3	Colas de 4	Más de 5
V85	92	104,7	97	94,75	92	88
V99	110,66	124,56	107,87	119,35	103,13	96,89
Media	77,3	90,3	84,9	82,7	80,4	76,3
Mediana	78	91	86,5	84,5	82	77,5
Sx	15,2	14,8	13,8	14,3	12,4	11,7
max	142	137	132	139	105	101
min	26	33	32	33	41	46
Vehiculos	7.635	823	414	216	130	212
	Brilon					
	Total	Aislados	Colas de 2	Colas de 3	Colas de 4	Más de 5
V85	92	105	99	96	95	91
V99	110,66	121,2	113	126	106,28	104,12
Media	77,3	91,2	88,8	86,6	84,5	79,4
Mediana	78	91	89	87	84	81
Sx	15,2	13,3	11,6	11,1	11,8	12,7
max	142	130	132	139	121	115
min	26	47	39	52	44	31
Vehiculos	7.635	491	227	125	93	199

Tabla 5. Ejemplo de los resultados de las ANOVAS por escenario.				
M-607 - Estación 632 - Dirección 1 - día				
grupos		F	P-value	Crit F
aislados	colas de 2	38,905989	6,0966 ⁻¹⁰	3,84899926
				rechazar Ho
grupos		F	P-value	Crit F
colas de 2	colas de 3	3,65269627	0,05643345	3,85630842
				aceptar Ho
grupos		F	P-value	Crit F
colas de 4	Más de 5	27,1471953	3,8616 ⁻⁷	3,87775387
				rechazar Ho
grupos		F	P-value	Crit F
aislados	colas de 4	53,0159909	6,9302 ⁻¹³	3,8512554
				rechazar Ho
grupos		F	P-value	Crit F
colas de 2	colas de 4	11,1228364	0,00091107	3,85867252
				rechazar Ho
grupos		F	P-value	Crit F
colas de 3	colas de 4	2,28138625	0,13185278	3,86863254
				aceptar Ho

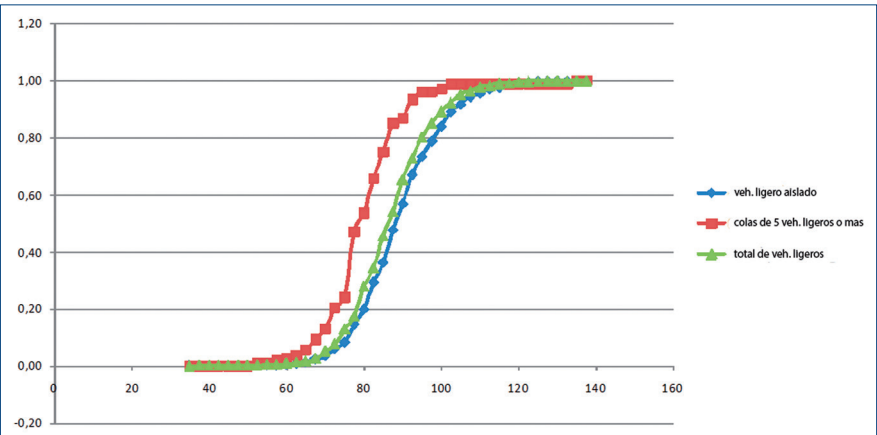


Figura 1. Ejemplo de la comparación entre funciones de distribución de varios grupos con el método propuesto en este artículo. Estación 587 de la carretera M-501.

Se obtuvieron 48 escenarios de análisis a base de considerar la conducción diurna o nocturna, las tipologías de vehículos (ligeros o pesados) y segregar cada sentido en las seis estaciones estudiadas. Quedando por ejemplo el primer escenario como: M501, estación 572 – Diurno – Sentido 1 – Vehículos ligeros.

Los resultados de ambos criterios fueron iguales o extremadamente cercanos, aunque el tamaño de muestra del criterio propuesto en la mayoría de los casos doblaba el tamaño de muestra obtenido aplicando el criterio de Brilon.

Se aplicó también un contrate tipo ANOVA. El test ANOVA es una forma habitual de comparar poblaciones. El test se aplicó sobre los mencionados 48 escenarios, obteniendo unos resultados que permiten afirmar categóricamente que los vehículos aislados pertenecen a distribuciones diferentes de aquellas de las colas.

En la Tabla 5 figura un ejemplo del análisis llevado a cabo en cada escenario. Los subgrupos representados son aquellos que se utilizaron en todos los casos:

- Aislados - Colas de 2
- Colas de 2 - Colas de 3
- Colas de 4 - Colas de 5 o más
- Aislados - Colas de 4
- Colas de 2 - Colas de 4
- Colas de 3 - Colas de 4

Se llevó a cabo una ANOVA para comparar la conducción diurna con la nocturna entre los líderes de cola (considerando vehículos aislados como líderes de cola de 1). En dos de cada tres casos, la conducción (distribución de velocidad) podía ser considerada diferente.

Se consideró relevante realizar un último test ANOVA para obtener una comparación entre vehículos aislados, colas de 2 ó 3, y colas de 4 ó más. Esto podría abrir la puerta a futuras caracterizaciones por familias de velocidades. De los 36 casos estudiados, sólo hubo tres que superaron el test, es decir, que solamente

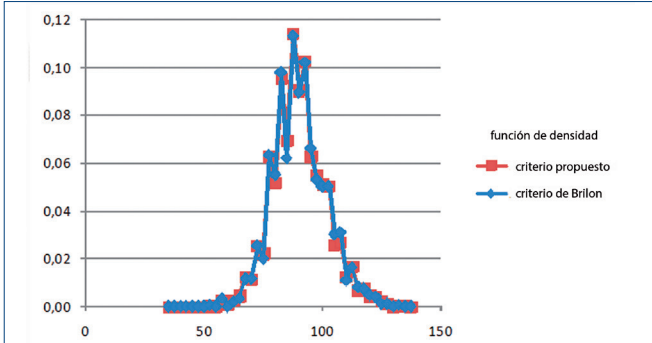


Figura 2. Comparación de las funciones de densidad entre el criterio propuesto y el criterio de Brilon. Estación 587 de la carretera M-501.

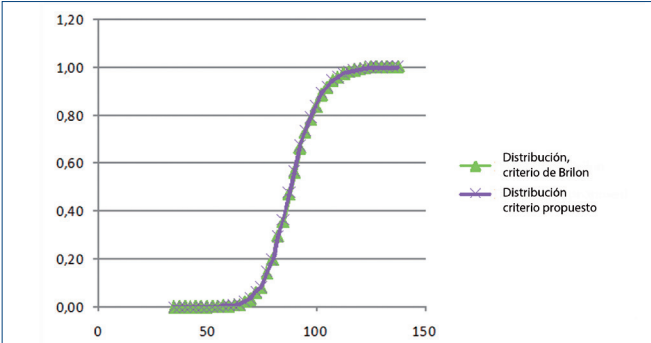


Figura 3. Comparación de las funciones de distribución entre el criterio propuesto y el criterio de Brilon. Estación 587 de la carretera M-501.

éstos pueden ser considerados pertenecientes a la misma población. El resumen de esta última comparativa se puede ver en la Tabla 6.

Finalmente, los resultados de V85 obtenidos para cada estación se agruparon para poder representarlos gráficamente de forma conjunta y obtener un valor numérico representativo para el caso español a partir de esa figura. El porcentaje de la media que suponía la desviación típica también fue representado. Esto se hizo para comprobar si la asunción generalizada de que la desviación típica es un 10 % del valor de la media es aplicable y correcto en el caso de carreteras convencionales españolas.

Los resultados obtenidos se resumen en las Figuras 4, 5, 6 y 7.

Se quiso realizar, a su vez, una comparativa de velocidades deseadas entre vehículos aislados y líderes de cola (que incluyen también a los aislados como líderes de cola de 1). Normalmente sólo se consideran los aislados cuando se trata de conseguir la V85 pero, como se dijo antes, no son los únicos que viajan a sus velocidades deseadas.

La Tabla 7 resume los resultados de las V85 medidas en cada una de las seis estaciones para aislados y líderes, incluyendo el error que se produce al considerar únicamente vehículos aislados en lugar de todos los líderes.

La Tabla 8 muestra las predicciones de V85 utilizando Castro et al. (2006) para las seis estaciones. La Tabla 9 muestra las diferencias en porcentaje entre las predicciones de Castro et al. (2006), considerando

Tabla 6. Comparación mediante test ANOVA de vehículos aislados, colas de 2 y 3, y colas de 4 ó más para conducción diurna de vehículos ligeros.

Código	Carretera	Estación	Dirección	Grupo	Resultado ANOVA	Rechazar	Aceptar
1	501	572	1	aislados - colas de 2 y 3	Rechazar HO	1	
1	501	572	1	colas de 2 y 3 - 4 ó más	Rechazar HO	1	
1	501	572	1	aislados - 4 ó más	Rechazar HO	1	
1	501	572	2	aislados - colas de 2 y 3	Aceptar HO		1
1	501	572	2	colas de 2 y 3 - 4 ó más	Aceptar HO		1
1	501	572	2	aislados - 4 ó más	Rechazar HO	1	
2	501	586	1	aislados - colas de 2 y 3	Rechazar HO	1	
2	501	586	1	colas de 2 y 3 - 4 ó más	Rechazar HO	1	
2	501	586	1	aislados - 4 ó más	Rechazar HO	1	
2	501	586	2	aislados - colas de 2 y 3	Rechazar HO	1	
2	501	586	2	colas de 2 y 3 - 4 ó más	Rechazar HO	1	
2	501	586	2	aislados - 4 ó más	Rechazar HO	1	
3	501	587	1	aislados - colas de 2 y 3	Rechazar HO	1	
3	501	587	1	colas de 2 y 3 - 4 ó más	Rechazar HO	1	
3	501	587	1	aislados - 4 ó más	Rechazar HO	1	
3	501	587	2	aislados - colas de 2 y 3	Rechazar HO	1	
3	501	587	2	colas de 2 y 3 - 4 ó más	Rechazar HO	1	
3	501	587	2	aislados - 4 ó más	Rechazar HO	1	
4	607	632	1	aislados - colas de 2 y 3	Rechazar HO	1	
4	607	632	1	colas de 2 y 3 - 4 ó más	Rechazar HO	1	
4	607	632	1	aislados - 4 ó más	Rechazar HO	1	
4	607	632	2	aislados - colas de 2 y 3	Rechazar HO	1	
4	607	632	2	colas de 2 y 3 - 4 ó más	Rechazar HO	1	
4	607	632	2	aislados - 4 ó más	Rechazar HO	1	
5	607	629	1	aislados - colas de 2 y 3	Rechazar HO	1	
5	607	629	1	colas de 2 y 3 - 4 ó más	Rechazar HO	1	
5	607	629	1	aislados - 4 ó más	Rechazar HO	1	
5	607	629	2	aislados - colas de 2 y 3	Rechazar HO	1	
5	607	629	2	colas de 2 y 3 - 4 ó más	Rechazar HO	1	
5	607	629	2	aislados - 4 ó más	Rechazar HO	1	
6	607	626	1	aislados - colas de 2 y 3	Aceptar HO		1
6	607	626	1	colas de 2 y 3 - 4 ó más	Rechazar HO	1	
6	607	626	1	aislados - 4 ó más	Rechazar HO	1	
6	607	626	2	aislados - colas de 2 y 3	Rechazar HO	1	
6	607	626	2	colas de 2 y 3 - 4 ó más	Rechazar HO	1	
6	607	626	2	aislados - 4 ó más	Rechazar HO	1	

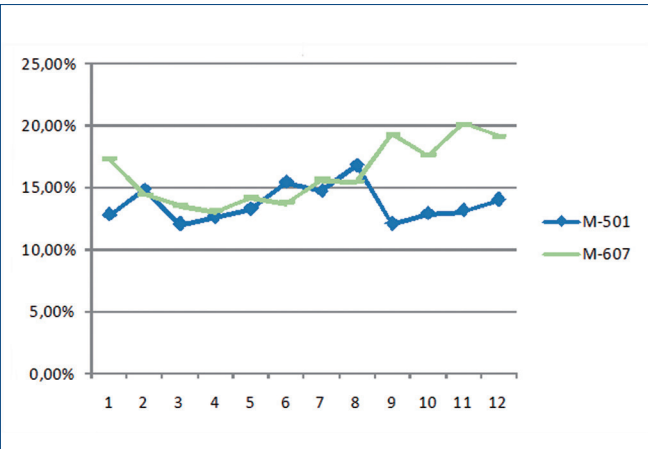


Figura 4. Porcentaje de la media que supone la desviación típica en cada estación. Los 12 puntos del eje de abscisas corresponden a vehículos ligeros, día-noche, sentido 1 - sentido 2, de las tres estaciones de cada carretera.

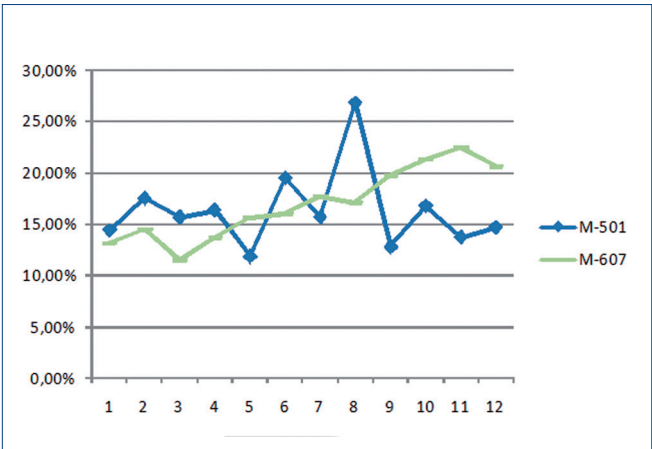


Figura 5. Porcentaje de la media que supone la desviación típica en cada estación. Los 12 puntos del eje de abscisas corresponden a vehículos pesados, día-noche, sentido 1 - sentido 2, de las tres estaciones de cada carretera.

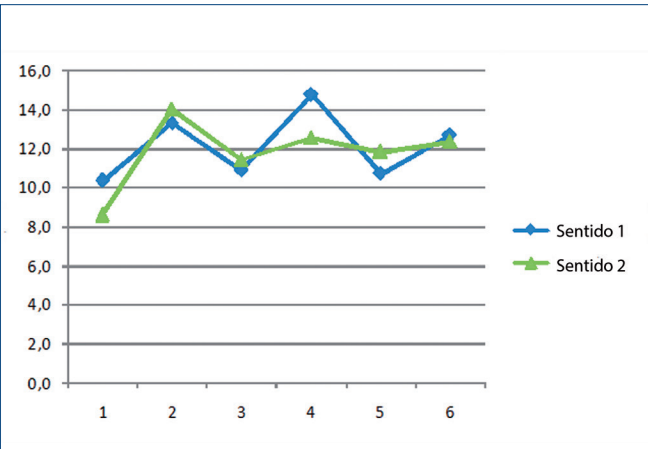


Figura 6. Valor de la desviación típica en conducción diurna para vehículos ligeros en las seis estaciones.

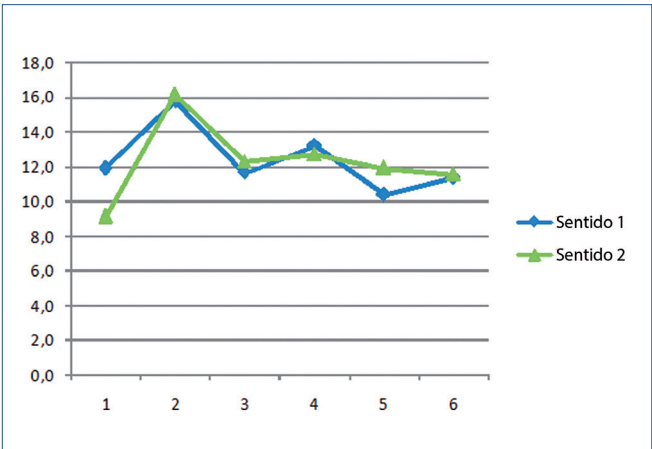


Figura 7. Valor de la desviación típica en conducción nocturna para vehículos ligeros en las seis estaciones.

solo las características geométricas de la vía, y los datos, tanto para líderes como para vehículos aislados. Se dan diferencias de hasta un 39 % entre la realidad y la estimación geométrica del modelo de Castro et al. (2006) siempre por encima de la realidad. Los rangos de las predicciones varían, siempre al alza, desde un 4 % hasta un máximo de un 39 %. Por otro lado, las diferencias que surgen de considerar líderes o aislados no son significativas.

6. Distribuciones de velocidades deseadas en tramos rectos para vehículos ligeros.

La mayor muestra homogénea de los datos de partida de este artículo es aquella formada por vehículos

ligeros en conducción diurna a lo largo de tramos rectos (n=16.328). La Tabla 10 contiene la distribución que puede ser utilizada para propósitos de microsimulación. Si se usa una distribución normal, como es habitual en los programas de simulación, el valor medio que ha de tomarse será de 91,93 km/h y la desviación típica de 13,55 km/h. Debe destacarse que, desde el punto de vista de los test estadísticos, los datos no cumplirán la hipótesis nula de los test de Kolmogorov- Smirnov, Shapiro- Wilks o Chi-cuadrado. Esto es debido a que, como es sabido, si los tamaños de muestra son muy grandes, como ocurre en este caso, los datos son ligeramente no-normales y los tamaños de muestra lo bastante grandes como para marcar claramente estas diferencias respecto a la normalidad. En particular

los datos muestran colas que abarcan más allá de tres desviaciones típicas desde la media. La Figura 8 contiene la representación gráfica de las funciones de densidad y distribución de los datos y del modelo normal. Las funciones de distribución encajan muy bien, pero en la función de densidad puede observarse claramente la no conformidad sobre todo en torno a la media.

7. Conclusiones

La velocidad de operación, V85 (como se define en el Manual de Capacidad) es el percentil 85 de la distribución de velocidades deseadas. Cuando se calcula este valor, normalmente solo se consideran los vehículos aislados, ya que sus velocidades se pueden determinar utilizando un aforador láser. Sin embargo,

Tabla 7. V85 para líderes y aislados en vehículos ligeros de conducción diurna.					
Dirección 1			Dirección 2		
V85 veh. aislados	V85 líderes de cola	Error	V85 veh. aislados	V85 líderes de cola	Error
94	91	3,30 %	81	80	1,25 %
115	113	1,77 %	112	109	2,75 %
104	101	2,97 %	100	98	2,04 %
104,7	99	5,76 %	106	105	0,95 %
88	86	2,33 %	90	87	3,45 %
77	77	0,00 %	74	73	1,37 %
		2,33 %	Error medio		
		5,76 %	Error máximo		

Tabla 8. V85 para líderes y aislados considerando conducción diurna de vehículos ligeros comparando los datos de estudio con Castro et al. (2006).								
Carretera	Estación	Radio de curvatura (m)	Longitud del tramo recto	V85 (Castro)	V85 dirección 1 (líderes) *	V85 dirección 1 (aislados) *	V85 dirección 2 (líderes) *	V85 dirección 2 (aislados) *
M-501	572	800	0	113	91	94	80	81
M-501	586	infinito	500	120	113	115	109	112
M-501	587	infinito	500	120	101	104	98	100
M-607	626	infinito	2.000	120	77	77	73	74
M-607	629	600	0	111	86	88	87	90
M-607	632	infinito	400	120	99	105	105	106

Tabla 9. Diferencias entre la predicción de Castro y las medidas reales de V85.								
		Castro - medida		Castro - medida		Castro - medida		Castro - medida
V85 predicha (Castro)	V85 Medida dirección 1 (líderes)	dirección 1 (líderes)	V85 Medida dirección 1 (aislados)	dirección 1 (aislados)	V85 Medida dirección 2 (líderes)	dirección 2 (líderes)	V85 Medida dirección 2 (aislados)	dirección 2 (aislados)
113	91	20 %	94	17 %	80	29 %	81	28 %
120	113	6 %	115	4 %	109	9 %	112	7 %
120	101	16 %	104	13 %	98	18 %	100	17 %
120	77	36 %	77	36 %	73	39 %	74	38 %
111	86	22 %	88	21 %	87	22 %	90	19 %
120	99	18 %	105	13 %	105	13 %	106	12 %

los vehículos aislados no son los únicos que viajan a sus velocidades deseadas, los líderes de cola también lo hacen. La comparación entre V85 de aislados y líderes de cola para vehículos ligeros durante conducción diurna para las seis estaciones muestra un error medio de 2,33 % y uno máximo del 5,75 %. Estos valores, particularmente el máximo, plantean una duda razonable sobre si es correcto utilizar solamente

vehículos aislados cuando se miden velocidades deseadas. Los errores son lo bastante bajos como para considerar el uso exclusivo de aislados como una adecuada primera aproximación. Los valores de V85 predichos utilizando el modelo de Castro et al. (2006) que considera únicamente la geometría del trazado, son significativamente mayores que los medidos de la realidad. Las medias de los resultados *in situ* rondan los 95 km/h,

frente a los 120 km/h que predice Castro. Incluso en estaciones en curva, donde las predicciones de velocidad son menores, las diferencias aún rondaban el 20 %. Así un modelo muy diferente surgiría de considerar los datos de campo frente a considerar únicamente la geometría de la vía. De los resultados, está claro que el criterio propuesto en este artículo supone una mejora respecto del de Brilon (1977), ya que para un mismo conjunto de datos se

Tabla 10. Distribución de velocidades deseadas en tramos rectos para vehículos ligeros en conducción diurna.

Velocidad (km/h)	Frecuencia	Función de densidad	Función de distribución
0	0	0,00 %	0,00 %
40	16	0,10 %	0,10 %
48	24	0,15 %	0,24 %
56	83	0,51 %	0,75 %
64	192	1,18 %	1,93 %
72	627	3,84 %	5,77 %
80	1961	12,01 %	17,78 %
88	3767	23,07 %	40,85 %
96	4116	25,21 %	66,06 %
104	2902	17,77 %	83,83 %
112	1556	9,53 %	93,36 %
120	666	4,08 %	97,44 %
128	263	1,61 %	99,05 %
136	106	0,65 %	99,70 %
144	33	0,20 %	99,90 %
152	12	0,07 %	99,98 %
160	2	0,01 %	99,99 %
168	2	0,01 %	100,00 %
176	0	0,00 %	100,00 %

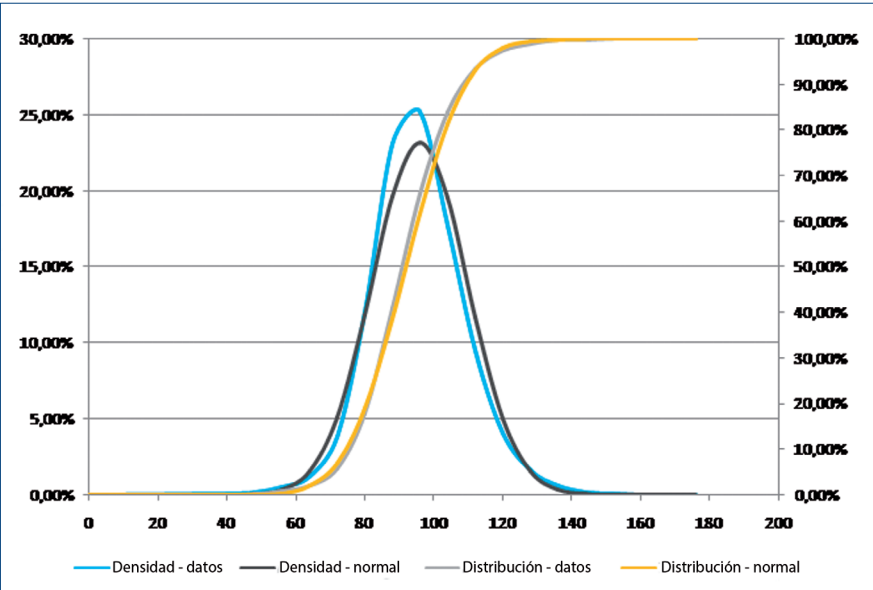


Figura 8. Funciones de densidad y distribución de los datos y el modelo normal.

obtienen muestras de tamaños mucho mayores. Los tamaños de muestra rondan el doble que los obtenidos usando el método de Brilon (1977) en todas las estaciones y sentidos. El criterio planteado es mucho menos restrictivo a la hora

de definir los parámetros y caracterizar los grupos: 15 segundos para predecesores y 5 segundos para seguidores siguiendo el criterio de Brilon (1977), comparado con los 5 y 3 segundos propuestos en este artículo. Con las velocidades medidas,

entorno a los 90 km/h, el criterio de Brilon implica unas distancias entre vehículos de 375 m, frente a los 125 m que surgen del criterio propuesto. Una separación de 125 m, es más que suficiente como para dejar pocas dudas de si el coche siguiente es seguidor o circula de forma aislada.

Los resultados de los test ANOVA para vehículos ligeros en conducción diurna muestran que vehículos aislados, colas de 2 y 3 vehículos y colas de 4 ó más vehículos, pertenecen a familias distintas. De los 36 test realizados solo en 3 casos las poblaciones eran iguales. Por lo tanto se puede decir que una cola de 4 ó más vehículos es considerada lenta. Se puede considerar que las colas de 2 y 3 vehículos se desplazan a velocidades moderadas, posiblemente conteniendo una proporción de vehículos rápidos y otra de vehículos lentos dentro de ellas.

Se descubrió que en carreteras convencionales con radios horizontales elevados no se debe utilizar el 10 % de la media de distribución de velocidades para estimar la desviación típica de dicha distribución. Los valores obtenidos en las seis estaciones sugieren que sería mejor tomar el 15 % como primera estimación, considerando un estimador puntual de la desviación típica el valor de 12 km/h para conducción tanto diurna como nocturna.

8. Relevancia práctica y aplicaciones potenciales

Este artículo busca divulgar distribuciones de velocidades deseadas basadas en grandes conjuntos de datos incluyendo tanto vehículos aislados como líderes de cola.

La diferencia en el percentil 85 en ambas distribuciones puede ser de hasta un 5,8 %. La distribución completa de velocidades deseadas para vehículos ligeros en tramos rectos puede ser consultada en la Tabla 10.

El criterio de descripción de aislados de Brilon (1977) se ha mejorado

en este estudio, permitiendo obtener muestras mucho mayores con resultados idénticos de un mismo conjunto de datos.

Los test ANOVA realizados muestran que los vehículos que se pueden caracterizar como lentos son aquellos que lideran colas de 4 ó más. Los líderes de colas menores podrían tener velocidades deseadas mayores (es decir, no podrá afirmarse que sean vehículos lentos aunque formen colas).

9. Referencias

[1] AASHTO (2011) "A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 6th Edition". AASHTO, Washington, DC.

[2] BOTMA, H. y FI, I. (1991). "Traffic Operation on 2-Lane roads in Hungary and The Netherlands", en "Highway Capacity and Level of Service". U. Brannolte, editor. A.A. Balkema, Rotterdam.

[3] BOTHA, J L. (1993). "Comparison of performance of TWO PASS and TRARR models when simulating traffic on two-lane highways with low design speeds". Transportation Research Record. Issue Number: 1398. ISSN: 0361-1981.

[4] BOYLES, S. (2010). "Quantifying Travel Time Variability in Transportation Networks". Research Report SWUTC/10/167275-1. University of Texas at Austin. Texas.

[5] BRILON, W. (1977). "Queueing Model of Two-Lane Rural Traffic". Transportation Research, Vol. 11, pp. 95-107.

[6] BRILON, W y WEISER, F. (2006). "Two-Lane Rural Highways-the German Experience". Journal: Transportation Research Record, vol. 1988, no. 1, pp. 38-47.

[7] BUCKLEY, DJ. (1968). "A Semi-Poisson Model of Traffic Flow". Transportation Science, Vol. 2, N° 2, mayo 1968. ORSA, EE.UU.

[8] CASTILLA, G. y ROMANA GARCIA, M. (2012). "Tipos de vehículos y

su caracterización para un modelo mesoscópico de carreteras de 2 carriles. Velocidades medias y percentiles en vehículos libres y en cola". Paper presented at X CIT (Congreso de Ingeniería de Transportes), Foro de Ingeniería de Transportes. Granada (Spain).

[9] CASTRO, M., et al (2006). "Desarrollo de un sistema para el análisis de la consistencia del trazado en carreteras". Informe del proyecto de investigación "Desarrollo de un sistema para el análisis de la consistencia del trazado en carreteras". Universidad Politécnica de Madrid.

[10] GARDETA OLIVEROS, J.G. (1983). "Estudio de modelos de tráfico vial para carreteras bidireccionales de dos carriles". Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de ingenieros de caminos, canales y puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

[11] GERLOUGH, D. y BARNES, F. (1977) "Poisson and Other Distributions in Traffic". Eno Foundation.

[12] KOOREY, G. (2003) "Assessment of Rural Road Simulation Modelling tools". Transfund New Zealand Research Report No. 245. ISBN 0-478-25355-9. ISSN 1174-0574.

[13] LAMM, R., et al. (1987). "Recommendations for evaluating horizontal design consistency based on investigations in the state of New York. Washington:Transportation Research Board". Transportation Research Record 1100.

[14] LAMM, R., et al. (1990). "Comparison of operating speed on dry and wet pavement of two lane rural highways". Washington: Transportation Research Board. Transportation Research Record 1280.

[15] MINISTERIO DE FOMENTO (2001) "Norma 3.1-ICTrazado, de la Instrucción de Carreteras". Dirección General de Carreteras. Serie Normativas

[16] NEZAMUDDIN, N. (2010) "Speed distribution profile of traffic data

and sample size estimation". TEC, APRIL 2010.

[17] OPPENLANDER, J.C. (1963) "Sample Size Determination for Spot-Speed Studies at Rural, Intermediate, and Urban Locations". In Highway Research Record: Journal of the Highway Research Board, No. 35, HRB, Washington, D.C., 1963, pp. 78-80.

[18] QUAUUM, R. (2010) "A comparison of vehicle speed at day and night at rural horizontal curves". Tesis doctoral, Texas A&M University

[19] RIFFKIN, M. (2008) "Variable speed limit signs effects on speed and speed variation in work zones". Utah Department of Transportation Research and Innovation Division

[20] ROMANA GARCIA, M. (1996). "Evaluación práctica de niveles de servicio de carreteras convencionales de dos carriles en España". CEDEX. ISBN: 84-498-0286-5.

[21] SÁNCHEZ, J. F. "Metodología para la evaluación de la consistencia del trazado de carreteras interurbanas de dos carriles". PhD Thesis. Universidad Politécnica de Madrid.

[22] SUÁREZ, L.A. (2007). "Análisis y evaluación operacional de intersecciones urbanas mediante microsimulación". MScThesis, Magíster en Ingeniería Infraestructura y Sistema de Transporte. Universidad Nacional de Colombia.

[23] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2010). "Highway Capacity Manual 2010". TRB, National Research Council, Washington, D.C.(current version)

[24] WASHBURN, S. S. & LI, J. (2010). "Development of a Simulation Program for Two-Lane Highway Analysis". CMS Project No. 2008-002. University of Florida, Gainesville.❖