

Análisis del adelantamiento en carreteras convencionales y propuesta de modelos para la mejora del diseño y de la señalización de las mismas

CARLOS LLORCA GARCÍA

**EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA DE DOCTORADO



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

**Análisis del adelantamiento en carreteras
convencionales y propuesta de modelos para la
mejora del diseño y de la señalización de las mismas**

Marzo de 2015

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

CARLOS LLORCA GARCÍA

Dirigida por:

Prof. Doctor ALFREDO GARCÍA GARCÍA

Colección Tesis Doctorales

© Carlos Llorca García

© 2015, de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València
Telf.: 963 877 012 / www.lalibreria.upv.es

ISBN: 978-84-9048-433-3 (versión impresa)

Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación, y en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por escrito de sus autores.

Note for English readers

De acuerdo con el Artículo 15 del RD 99/2011, esta Tesis reúne los requisitos para optar a la mención «Doctor internacional», al concurrir, entre otras, la siguiente circunstancia:

“parte de la tesis doctoral, al menos el resumen y las conclusiones, se haya redactado y sea presentado en una de las lenguas habituales para la comunicación científica en su campo de conocimiento, distinta a cualquiera de las lenguas oficiales en España”.

Con esta finalidad, se incluye las siguientes partes en inglés:

- Resumen.
- En el anexo II, la traducción de los capítulos 2. Introducción, 4. Objetivos, 5. Hipótesis, y 13. Conclusiones
- En el anexo III, un compendio de publicaciones en inglés que desarrollan las partes de la Tesis de la forma indicada en dicho anexo.

According to point 15 of RD 99/2011, this Thesis may opt to the mention «International Doctor», complying, among others, the following condition:

“part of the PhD thesis, at least the summary and conclusions, has been written in an accepted language for scientific communication, other than any of the official languages of Spain”

With this purpose, this Thesis includes the following parts in English

- Summary
- Annex II: translation of the sections 2. Introduction, 4. Objectives, 5. Hypotheses and 13. Conclusions.
- Annex III: compendium of papers developing part of the Thesis. The correspondence between the Thesis and the papers is explained in this annex.

Resumen

En carreteras convencionales, la maniobra de adelantamiento permite a los vehículos rápidos rebasar a los más lentos, de modo que se evitan interferencias y se mejora la calidad de la circulación. Sin embargo, al adelantar es necesario invadir el carril destinado al tráfico opuesto, lo que tiene importantes consecuencias en la seguridad vial y en la funcionalidad de la vía. El adelantamiento solo está permitido en determinadas zonas, donde de acuerdo a criterios de diseño y señalización, se dispone de suficiente distancia de visibilidad de adelantamiento. Esta distancia se define, de forma teórica, como la distancia de visibilidad necesaria para adelantar a un vehículo, cuando se está acercando otro en sentido opuesto. Ante la gran dispersión de criterios, modelos y estudios experimentales acerca de la maniobra de adelantamiento, esta tesis realizó un amplio estudio de campo grabando maniobras en diversos tramos de carretera convencional en los alrededores de Valencia. Se emplearon grabaciones desde puntos estáticos y grabaciones desde un vehículo instrumentalizado, equipado con cámaras de video, GPS y telémetros láser. El desarrollo de este método permitió caracterizar hasta 1179 maniobras de seguimiento y de adelantamiento, analizando una gran cantidad de variables, como el tipo y número de vehículos adelantados, la visibilidad disponible, las velocidades de los vehículos implicados, el sexo y la edad del conductor adelantante o las condiciones de iluminación. El efecto de todos estos factores fue estudiado de forma pormenorizada, llegando a formular modelos de decisión de adelantamiento, para estudiar como los conductores deciden o no comenzar la maniobra, y modelos de distancia de visibilidad, para determinar la distancia necesaria para llevarla a cabo. Estos modelos se plantearon de forma probabilística, lo que permitió estudiar la probabilidad de que se lleve a cabo una maniobra, y de que la distancia disponible para ella sea suficiente. De este modo, se evaluó la peligrosidad de la maniobra de adelantamiento, para compararla posteriormente con medidas objetivas de la seguridad, como es el caso del número de accidentes ocurridos. Estos resultados se emplearon para evaluar los criterios existentes en España para diseñar geométricamente y señalizar zonas de adelantamiento. Posteriormente, se formuló un criterio único a partir de los resultados del estudio, que minimiza el riesgo de colisión con vehículos en sentido opuesto y la probabilidad de rebasar las prohibiciones de adelantamiento. Otro de los resultados más significativos, fue el desarrollo de un modelo de microsimulación para carreteras convencionales, integrado en un software de simulación de tráfico.

Carlos Llorca García

Valencia, 23 de enero de 2015

Summary

“Analysis of passing on two-lane rural roads and proposal of models to improve geometric design and marking”

On two-lane rural roads, passing maneuvers allow faster vehicles to pass the slower ones, in order to reduce interferences and improve level of service. However, to pass a slower vehicle, it is necessary to occupy the opposing lane, which had a significant impact on road safety and road operations. For this reason, passing is only permitted at certain parts of the road, where, according to geometric design and marking guidelines, there is sufficient passing sight distance. Passing sight distance is defined as the distance required to pass a slower vehicle, when a third opposing vehicle is approaching at the same time. A huge dispersion in criteria, theoretical models and observations was found in the literature. This PhD Thesis carried out a wide field study of passing maneuvers on two-lane rural roads in the surrounding of Valencia (Spain). Video was recorded both from external static points and from an instrumented vehicle, which travelled at slightly slow speeds and was passed by others under normal traffic conditions. The vehicle was equipped with video cameras, GPS and laser rangefinders. These methods characterized up to 1179 passing maneuvers in a high number of variables, such as type and number of impeding vehicles, available sight distance, speed of vehicles, age and gender of the passing driver or lighting conditions. The effect of these factors was analyzed and passing models were formulated. Firstly, passing gap acceptance modeled drivers' decisions before passing; secondly, passing sight distance models quantified drivers' requirements when passing. A probabilistic approach was used to exploit these models, which facilitated the interpretation of the probability of passing and the probability of a passing gap to be sufficient for a driver. Therefore, the risk related to passing was analyzed, and compared with objectives safety measures, such as number of passing related crashes. These results were used to assess the risk of current Spanish geometric design and marking guidelines. Thereafter, a unique criterion was determined, minimizing the risks of head-on collisions and the probability of no-passing zone violations. Additionally, the PhD thesis includes the development of a passing model integrated in a microsimulation model for two-lane rural highways.

Resum

“Anàlisi de la maniobra d’avançament en carreteres convencionals i proposta de models per la millora del seu disseny i de la seua senyalització”

En carreteres convencionals, la maniobra d’avançament permet als vehicles ràpids passar als lents, evitant interferències i millorant d’aquesta forma la qualitat del tràfic. En canvi, per avançar a un vehicle lent, es precis ocupar el carril contrari, la qual cosa té importants conseqüències en la seguretat viaria i en la funcionalitat de les carreteres. L’avançament sols està permès en determinades zones de la carretera, quan, d’acord als criteris de disseny geomètric i de senyalització, es disposa de suficient distància de visibilitat d’avançament. Aquesta distància de visibilitat d’avançament es defineix com la distància necessària per passar a un vehicle lent quan un vehicle s’acosta en sentit contrari. Davant la gran dispersió trobada en criteris, models i estudis experimentals de l’avançament, aquesta tesi va realitzar un ampli estudi de camp gravant maniobres en diverses carreteres convencionals dels voltants de la ciutat de València. Es van emprar gravacions des de punts estàtics i des d’un vehicle instrumentalitzat equipat amb càmeres de vídeo, GPS i telèmetres làser. El desenvolupament d’aquest mètode va permetre caracteritzar fins un total de 1179 maniobres se seguiment i avançament. Es van analitzar un gran nombre de variables, com es el cas del nombre i tipus de vehicles passats, la visibilitat disponible, les velocitats dels vehicles implicats, el sexe i la edat dels conductors que van avançar o les condicions d’il·luminació. L’efecte de tots aquests factors es va analitzar de forma detallada. Allò va permetre formular models de decisió d’avançament, que indicaren com els conductors tomen les decisions abans d’avançar, i models de distància de visibilitat d’avançament, que mostren els requisits dels mateixos quan duen a terme la maniobra. Aquests models es van plantejar des d’un enfoc probabilístic, per tal d’estudiar la probabilitat de que una maniobra tinga lloc, i de que la distància disponible siga suficient. D’aquest mode, es van avaluar els riscos de la maniobra, la qual cosa va permetre després comparar-los amb mesures objectives de seguretat viaria, com va ser el cas del número d’accidents causats per maniobres d’avançament. Aquests resultats es van usar per tal d’avaluar els criteris espanyols de disseny geomètric i de senyalització. Posteriorment, es va formular un criteri únic, que minimitza el risc de col·lisió contra vehicles en sentit contrari, i el risc de incompliment de la prohibició d’avançament. Altre resultat significatiu va ser el desenvolupament d’un model d’avançament inclòs en un software de microsimulació de tràfic per carreteres convencionals.

Índice de contenidos

Índice de Tablas	6
Índice de Figuras	10
1. Antecedentes	18
2. Introducción	19
2.1. Descripción y fases.....	19
2.1.1. Deseo.....	19
2.1.2. Decisión.....	19
2.1.3. Ejecución.....	20
2.2. Factores del adelantamiento.....	21
2.3. Funcionalidad.....	23
2.4. Seguridad vial.....	23
2.5. Distancia de visibilidad de adelantamiento.....	24
3. Estado del arte	26
3.1. Observación experimental.....	26
3.1.1. Primeros estudios de campo.....	26
3.1.2. Polus et al. (2000).....	28
3.1.2.1. Localizaciones.....	28
3.1.2.2. Metodología.....	29
3.1.2.3. Resultados.....	29
3.1.3. Carlson et al. (2006).....	30
3.1.3.1. Localización del estudio.....	30
3.1.3.2. Metodología.....	30
3.1.3.3. Resultados.....	31
3.1.4. Harwood et al. (2008).....	32
3.1.4.1. Localización.....	33
3.1.4.2. Metodología.....	33
3.1.4.3. Resultados.....	34
3.1.5. Hegeman (2008).....	36
3.1.5.1. Localización.....	37
3.1.5.2. Metodología.....	37
3.1.5.3. Resultados.....	37
3.1.6. Otros estudios recientes.....	38
3.2. Modelización.....	38
3.2.1. Distancia de visibilidad.....	39
3.2.1.1. Tipos de modelos teóricos.....	39
3.2.1.2. Concepto de posición crítica.....	40
3.2.1.3. Estudio de modelos existentes.....	41
3.2.2. Decisión de adelantamiento.....	67
3.2.2.1. Lennung et al (2003).....	68
3.2.2.2. Bar-Ghera y Shinar (2005).....	68
3.2.2.3. Farah y Toledo (2010).....	68

3.2.2.4.	Vlahogianni y Golias (2012)	69
3.2.2.5.	Ghods y Saccomanno (2014)	70
3.3.	Simulación.....	71
3.3.1.	Simuladores de conducción	71
3.3.1.1.	STISIM	71
3.3.1.2.	Drive Safety	72
3.3.1.3.	SHERPA	73
3.3.1.4.	UBC	74
3.3.1.5.	Dr. Forest	74
3.3.1.6.	CRISS	74
3.3.2.	Microsimulación.....	75
3.3.2.1.	TWOPAS (IHSDM)	75
3.3.2.2.	CORSIM	76
3.3.2.3.	Otros modelos	76
3.4.	Seguridad vial.....	76
1.1.1.	Análisis de siniestralidad	77
1.1.2.	Técnicas de Conflictos de Tráfico	79
3.4.1.1.	Indicadores de conflicto de tráfico	80
3.4.1.2.	Aplicaciones a la maniobra de adelantamiento	82
3.5.	Normativas.....	85
3.5.1.	Criterios normativos aplicables en España	85
3.5.1.1.	Instrucción 3.1-IC: “Trazado”	85
3.5.1.2.	Instrucción 8.2-IC: “Señalización horizontal”	86
3.5.1.3.	Instrucción 8.1-IC: “Señalización vertical”	87
3.5.1.4.	Reglamento General de Circulación	87
3.5.2.	Criterios normativos aplicables en el extranjero	88
3.5.2.1.	Diseño geométrico	88
3.5.2.2.	Señalización de prohibiciones de adelantamiento.....	92
3.5.2.3.	Comparación entre alturas para la medida de la distancia de visibilidad.....	94
3.6.	Conclusiones del estado del arte	94
3.6.1.	Observaciones	95
3.6.2.	Modelos deterministas	96
3.6.3.	Modelos probabilísticos	102
3.6.4.	Aceptación de huecos	103
3.6.5.	Simulación	103
3.6.6.	Seguridad vial	103
3.6.7.	Normativas	104
3.6.8.	Resumen y necesidad de investigación.....	105
4.	Objetivos	106
5.	Hipótesis	107
6.	Alcance	109
7.	Metodología	110
7.1.	Diseño	110
7.1.1.	Metodología estática	110
7.1.1.1.	Descripción del equipo empleado	111

7.1.1.2. Condicionantes	114
7.1.2. Metodología dinámica	115
7.1.2.1. Descripción del equipamiento.....	116
7.1.2.2. Instalación	119
7.1.2.3. Condicionantes	121
7.1.3. Medidas de velocidad puntual	123
7.2. Selección de localizaciones	124
7.2.1. Análisis de la red de carreteras	125
7.2.1.1. Inventario de tramos	125
7.2.1.2. Intensidad de tráfico	125
7.2.1.3. Geometría y señalización	126
7.2.1.4. Resumen del inventario.....	126
7.2.2. Condicionantes estadísticos.....	127
7.2.3. Propuesta de localizaciones	127
7.3. Reducción de datos.....	129
7.3.1. Tramo de carretera	129
7.3.2. Zona de adelantamiento	130
7.3.3. Maniobra.....	130
7.3.3.1. Identificación	130
7.3.3.2. Clasificación	131
7.3.3.3. Conductor y ocupantes.....	132
7.3.3.4. Fase de seguimiento.....	132
7.3.3.5. Fase de adelantamiento	136
7.3.4. Resumen.....	139
8. Ejecución experimental	142
8.1. Metodología estática	142
8.2. Metodología dinámica	144
8.3. Medición de velocidades	147
9. Análisis de la maniobra	150
9.1. Análisis descriptivo	150
9.1.1. Metodología estática	150
9.1.2. Metodología dinámica	152
9.1.3. Medición de velocidades puntuales.....	154
9.2. Análisis estadístico.....	155
9.2.1. Fase de seguimiento	155
9.2.1.1. Variables fundamentales.....	155
9.2.1.2. Factores	157
9.2.1.3. Modelos de elección binaria	158
9.2.2. Fase de adelantamiento.....	164
9.2.2.1. Variables fundamentales.....	164
9.2.2.2. Factores	170
9.2.2.3. Modelos.....	178
9.3. Modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento.....	188
9.3.1. Posición crítica.....	189
9.3.2. Hueco residual crítico.....	189
9.3.3. Ecuaciones.....	190

9.3.4.	Análisis de sensibilidad.....	192
9.3.5.	Aplicación del modelo.....	194
9.3.6.	Resultados.....	196
9.3.7.	Distancia de visibilidad y hueco crítico	197
9.4.	Conclusiones del análisis de la maniobra	198
10.	Análisis de seguridad vial	200
10.1.	Análisis de fiabilidad	200
10.1.1.	Función objetivo.....	202
10.1.2.	Resultados.....	203
10.1.3.	Aplicación a zonas de adelantamiento	206
10.1.3.1.	Indicadores de riesgo de zonas de adelantamiento.....	207
10.2.	Estudio de siniestralidad.....	211
10.2.1.	Bases de datos.....	211
10.2.2.	Análisis descriptivo.....	212
10.2.2.1.	Características generales.....	212
10.2.2.2.	Gravedad	216
10.2.3.	Modelización	217
10.2.3.1.	Tramos.....	218
10.2.3.2.	Zonas de adelantamiento.....	221
10.3.	Conclusiones del análisis de seguridad vial	226
11.	Discusión	229
11.1.	Observaciones.....	229
11.2.	Análisis de factores	233
11.3.	Modelos de aceptación de huecos	235
11.4.	Modelos de adelantamiento y distancia de visibilidad	237
11.5.	Posición crítica	239
11.6.	Análisis de fiabilidad	240
11.7.	Conclusiones de la discusión	242
12.	Aplicaciones prácticas	244
12.1.	Desarrollo de un modelo de microsimulación.....	244
12.1.1.	Modelos previos.....	244
12.1.2.	Descripción del modelo.....	245
12.1.2.1.	Generación de la red	245
12.1.2.2.	Deseo de adelantamiento	245
12.1.2.3.	Decisión	246
12.1.2.4.	Ejecución.....	247
12.1.2.5.	Parámetros	248
12.1.3.	Calibración.....	249
12.1.3.1.	Nivel microscópico	249
12.1.3.2.	Nivel macroscópico.....	253
12.1.4.	Validación.....	256
12.1.5.	Conclusiones del desarrollo de un modelo de microsimulación	257
12.2.	Criterios de distancia de visibilidad	257
12.2.1.	Visibilidad necesaria.....	258
12.2.2.	Visibilidad disponible	259

12.2.3. Probabilidad de no-cumplimiento	261
12.2.4. Análisis de sensibilidad.....	265
12.2.4.1. Zona en recta.....	266
12.2.4.2. Zona en curva	268
12.2.5. Revisión de criterios en España.....	271
12.2.5.1. Instrucción 3.1 IC: “Trazado”	271
12.2.5.2. Instrucción 8.2 IC: “Señalización horizontal”.....	274
12.2.6. Propuesta de nuevos criterios	279
12.2.6.1. Zonas en recta	280
12.2.6.2. Zonas en curva.....	281
12.2.6.3. Zonas compuestas por tramos rectos y curvos.....	283
12.2.7. Conclusiones de la propuesta de criterios	283
13. Aplicaciones metodológicas	284
14. Conclusiones	286
15. Futuras líneas de investigación	292
16. Agradecimientos	295
17. Referencias	296

Anexos

I. Publicaciones propias relacionadas

II. Traducción al inglés – Translation to English

III. Compendio de publicaciones – Compendium of papers

IV. Inventario de tramos

V. Zonas de adelantamiento en los tramos del vehículo instrumentalizado

VI. Resumen del análisis estadístico

VII. Ecuaciones de los modelos de trayectoria del vehículo adelantante

VII. Resultados del modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento

IX. Resultados del análisis de fiabilidad

X. Listado de tramos para el análisis de seguridad vial

XI. Listado de zonas de adelantamiento para el análisis de seguridad vial

Índice de Tablas

Tabla 3-1. Variables descriptivas del adelantamiento en el estudio de Polus et al. (2000).....	30
Tabla 3-2. Tiempos de recorrido en el carril izquierdo, según Carlson et al. (2006)	32
Tabla 3-3. Velocidad del vehículo adelantante, según Carlson et al (2006)	32
Tabla 3-4. Valores de las variables estudiadas por Harwood et al. (2008)	36
Tabla 3-5. Distancia recorrida por el vehículo adelantante, Harwood at al. (2008)	36
Tabla 3-6. Tiempos de ocupación del carril izquierdo, por fases, según Hegeman (2008).....	38
Tabla 3-7. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Van Valkenberg y Michael (1971)	43
Tabla 3-8. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Weaver y Glennon (1972)	44
Tabla 3-9. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Harwood y Glennon (1976).....	45
Tabla 3-10. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Lieberman (1982).....	46
Tabla 3-11. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Saito (1984).....	47
Tabla 3-12. Distancias de adelantamiento según Glennon (1989)	49
Tabla 3-13. Distancias de adelantamiento según Harwood y Glennon (1989).....	49
Tabla 3-14. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Rilett et al (1990)	50
Tabla 3-15. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Rocci (1993) para una velocidad de 100 y 90 km/h respectivamente	53
Tabla 3-16. Relación entre velocidades en el modelo de la AASHTO	54
Tabla 3-17. Distancias de adelantamiento según la AASHTO (2004).....	55
Tabla 3-18. Distancias de adelantamiento según Hassan.....	56
Tabla 3-19. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Wang y Cartmell (1998)	60
Tabla 3-20. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Polus et al. (2000)	61
Tabla 3-21. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Harwood et al. (2008)	61
Tabla 3-22. Longitudes mínimas de zonas de adelantamiento, según Harwood et al. (2008) ...	62
Tabla 3-23. Valores de las variables en el modelo de Sparks et al. (1993)	63

Tabla 3-24. Distancias de visibilidad de adelantamiento ($v=80$ km/h) según El Khoury y Hobeika(2007).....	65
Tabla 3-25. Parámetros de entrada y distribución estadística de los mismos, según El-Bassiouni y Sayed, para $V=100$ km/h	66
Tabla 3-26. Frecuencia de accidentes asociados a adelantamientos en carreteras convencionales de EEUU.....	78
Tabla 3-27. Tipo de colisión en accidentes asociados a maniobras de adelantamiento en carreteras de EEUU	78
Tabla 3-28. Distancias de visibilidad de adelantamiento en la instrucción 3.1-IC.....	85
Tabla 3-29. Inicio prohibición de adelantamiento (y fin prohibición en vías existentes) en la instrucción 8.2-IC.....	86
Tabla 3-30. Fin prohibición de adelantamiento en vías de nuevo Trazado en la instrucción 8.2-IC	86
Tabla 3-31. Distancia entre marcas viales continuas (vías de nuevo trazado) en la instrucción 8.2-IC.....	86
Tabla 3-32. Visibilidad al comienzo de la zona de preaviso en Instrucción 8.2-IC.....	86
Tabla 3-33. Longitud mínima de la zona de preaviso en la instrucción 8.2-IC.....	87
Tabla 3-34. Distancias de visibilidad de adelantamiento en criterios de diseño (m).....	91
Tabla 3-35. Porcentajes de zonas con posibilidad de adelantamiento en distintas normativas	91
Tabla 3-36. Distancias de visibilidad (m) de adelantamiento en criterios de señalización.....	93
Tabla 3-37. Longitudes mínimas (m) de zonas de adelantamiento prohibido o permitido.....	93
Tabla 3-38. Alturas de conductor y objeto para el cálculo/medición de la visibilidad de adelantamiento	94
Tabla 3-39. Velocidades de los vehículos según distintos modelos teóricos.....	97
Tabla 3-40. Parámetros de los vehículos en distintos modelos	99
Tabla 3-41. Distancias y tiempos de seguridad entre vehículos en distintos modelos.....	99
Tabla 3-42. Tiempos de percepción y/o decisión en distintos modelos	100
Tabla 3-43. Resumen modelos teóricos de distancia de visibilidad de adelantamiento (m)....	100
Tabla 7-1. Zonas de adelantamiento propuestas en la metodología estática	128
Tabla 7-2. Tramos de carretera propuestos en la metodología dinámica	129
Tabla 7-3. Variables del estudio	141
Tabla 8-1. Resumen de las sesiones de toma de datos mediante la metodología estática.....	142
Tabla 8-2. Características de las localizaciones de la metodología estática	143
Tabla 8-3. Resumen de las sesiones de toma datos mediante la metodología dinámica	145

Tabla 8-4. Características de los tramos de la metodología dinámica (velocidad y tráfico).....	146
Tabla 8-5. Características de los tramos de la metodología dinámica (zonas de adelantamiento)	146
Tabla 8-6. Resumen de las sesiones de toma de datos de la medición de velocidades puntuales	148
Tabla 9-1. Análisis descriptivo de la muestra obtenida con la metodología estática	151
Tabla 9-2. Análisis descriptivo de la muestra obtenida con la metodología dinámica	153
Tabla 9-3. Factores de aceptación de huecos relativos al conductor (cualitativos)	157
Tabla 9-4. Factores de aceptación de huecos relativos al conductor (cuantitativos).....	157
Tabla 9-5. Factores de aceptación de huecos relativos al vehículo	157
Tabla 9-6. Factores de aceptación de huecos relativos a la carretera	158
Tabla 9-7. Modelos de decisión de adelantamiento planteados	160
Tabla 9-8. Bondad del ajuste de los modelos de decisión binaria	161
Tabla 9-9. Coeficientes de los modelos de aceptación de huecos.....	161
Tabla 9-10. Velocidades de operación en zonas de adelantamiento	170
Tabla 9-11. Tamaño de muestra para modelos de trayectoria del adelantante	179
Tabla 9-12. Resumen de las variables para modelos de trayectoria del adelantante	179
Tabla 9-13. Formulación de modelos de trayectoria del vehículo adelantante	180
Tabla 9-14. Resultados de la calibración de modelos de trayectoria del adelantante (en seguimiento)	182
Tabla 9-15. Resultados de la calibración del modelo de trayectoria del adelantante (lanzado)	185
Tabla 9-16. Distribuciones de las variables de entrada del modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento	196
Tabla 10-1. Variables de entrada de la función objetivo y rango de variación.....	204
Tabla 10-2. Campos de la base de datos de accidentes.....	212
Tabla 10-3. Causas detalladas de accidentes debidos a adelantamiento.....	215
Tabla 10-4. Características de los tramos estudiados	219
Tabla 10-5. Estimación de SPF para tramos de carretera convencional.....	219
Tabla 10-6. Características de las zonas de adelantamiento estudiadas.....	222
Tabla 10-7. Coeficientes de SPF para accidentes con víctimas en zonas de adelantamiento ..	223
Tabla 10-8. Coeficientes de SPF para accidentes con víctimas en zonas de adelantamiento, debidos a adelantamientos y no relacionados con intersecciones	223

Tabla 10-9. Ajuste de las SPF en función de las distintas variables características de la geometría de las zonas	224
Tabla 12-1. Parámetros del modelo de microsimulación	249
Tabla 12-2. Valores por defecto de la aceleración máxima	250
Tabla 12-3. Parámetros de calibración de la velocidad deseada	250
Tabla 12-4. Escenarios de calibración	253
Tabla 12-5. Errores máximos obtenidos en las muestras observadas	254
Tabla 12-6. Número mínimo de replicaciones para alcanzar el error objetivo	254
Tabla 12-7. Escenarios de validación	256
Tabla 12-8. Resultados de la validación	257
Tabla 12-9. Relación entre radio, velocidad de operación y velocidad de diseño	269
Tabla 12-10. Valores de distancia de visibilidad de adelantamiento empleados en el estudio de la 3.1 IC.....	271
Tabla 12-11. Valores de distancia de visibilidad de adelantamiento y de longitud mínima empleados en el estudio de la 8.2 IC	275
Tabla 12-12. Criterio de zonas de adelantamiento en recta.....	281
Tabla 12-13. Criterio de zonas de adelantamiento en curva	282

Índice de Figuras

Figura 2-1. Esquema de la maniobra y vehículos implicados.....	20
Figura 2-2. Diagramas espacio-tiempo de maniobras completadas.....	21
Figura 2-3. Diagramas espacio-tiempo de maniobras abortadas	21
Figura 2-4. Concepto de distancia de Visibilidad de adelantamiento.....	24
Figura 3-1. Esquema y fases de la maniobra de adelantamiento según Polus et al. (2006).....	30
Figura 3-2. Esquema y fotografías del vehículo flotante empleado por Carlson et al. (2006)....	31
Figura 3-3. Fases de la maniobra según Carlson et al. (2006).....	32
Figura 3-4. Equipamiento instalado en las localizaciones del estudio de campo de Harwood et al. (2008)	33
Figura 3-5. Captura de la cámara de video, Harwood et al. (2008)	34
Figura 3-6. Equipamiento instalado, Harwood et al. (2008)	34
Figura 3-7. Esquema y fases de la maniobra de adelantamiento según Harwood et al (2008) .	35
Figura 3-8. Instantes de la maniobra según Hegeman (2008)	38
Figura 3-9. Concepto de posición crítica	41
Figura 3-10. Esquema de la maniobra y definición de variables en los modelos de Glennon (1988), Harwood y Glennon (1989) y Hassan (1996)	47
Figura 3-11. Esquema de la maniobra y definición de variables en el modelo de la AASHTO (2004)	53
Figura 3-12. Parámetros del modelo de la AASHTO en función de la velocidad del vehículo adelantado	55
Figura 3-13. Perfil de visibilidad de un adelantamiento único según Hassan et al. (1996)	57
Figura 3-14. Aplicación del perfil de visibilidad a la determinación del inicio y fin de prohibición de adelantamiento, según Hassan et al. (1996).....	58
Figura 3-15. Trayectoria curvilínea y aproximación OABC del recorrido del vehículo adelantante en un cambio de carril, según Wang y Cartmell (1998)	59
Figura 3-16. Curva distancia de visibilidad de adelantamiento-Probabilidad para velocidad de diseño de 80 km/h, según Sparks et al.(1993)	63

Figura 3-17. Curva distancia de visibilidad de adelantamiento-Probabilidad para velocidad de diseño de 100km/h, según Sparks et al. (1993)	64
Figura 3-18. Índice de Riesgo en función de la distancia de visibilidad de adelantamiento a 80 km/h según El Khoury y Hobeika (2007)	65
Figura 3-19. Distribución de frecuencias de distancia de visibilidad de adelantamiento según El-Bassiouni y Sayed (2010).....	66
Figura 3-20. Modelo de duración de la ocupación del carril izquierdo según Vlahoguanni y Golias (2012)	67
Figura 3-21. Porcentaje de vehículos que adelantan (a), desean adelantar y no lo hacen (b) y no desean adelantar (c), en función de la diferencia de su velocidad con la del vehículo que les precede (Bar-Ghera y Shinar, 2005).....	68
Figura 3-22. Probabilidad de adelantar en función de la distancia hasta el adelantado, según Vlahogianni y Golias (2012).....	70
Figura 3-23. Probabilidad de adelantar en función de la distancia hasta el opuesto, según Vlahogianni y Golias (2012).....	70
Figura 3-24. Captura de imagen del simulador STISIM	72
Figura 3-25. Escenario del experimento de Jenkins y Rillet (2004) y capturas de imagen del simulador Drive Safety	73
Figura 3-26. Simulador de conducción SHERPA	74
Figura 3-27. Gravedad de los accidentes en función del tipo de maniobra	78
Figura 3-28. Concepto de técnicas de conflicto de tráfico.....	79
Figura 3-29. Distribución de frecuencias de Time to Collision (Farah et al. 2009a).....	83
Figura 3-30. TTC mínimo, TET y TIT para distintos umbrales del sistema de ayuda a la conducción (Hegeman at al., 2009).....	84
Figura 3-31. R305	87
Figura 3-32. R306	87
Figura 3-33. R502	87
Figura 3-34. R503	87
Figura 3-35. Señalización vertical y horizontal de adelantamiento según la normativa española	87
Figura 3-36. Fases de la maniobra de adelantamiento para la comparación de normativas internacionales.....	89
Figura 3-37. Comparación de criterios de diseño geométrico a 100 km/h.....	91
Figura 3-38. Comparación de longitudes mínimas de la zona de adelantamiento permitido....	94
Figura 3-39. Velocidad a lo largo del tiempo de los vehículos adelantante, adelantado y opuesto en distintos modelos.....	98

Figura 3-40. Distancia de visibilidad de adelantamiento en función de la velocidad. Distancia para adelantamiento completo.....	101
Figura 3-41. Distancia de visibilidad de adelantamiento en función de la velocidad. Distancia desde la posición crítica	102
Figura 7-1. Ejemplos de utilización del laboratorio móvil de tráfico	112
Figura 7-2. Plataforma elevadora articulada.....	113
Figura 7-3. Cámaras de video instaladas en la cesta del laboratorio móvil de tráfico.....	113
Figura 7-4. Captura de video grabado por el laboratorio móvil de tráfico	114
Figura 7-5. Visibilidad de la plataforma elevadora desde la carretera	115
Figura 7-6. Cámaras de video del sistema VBOX en el turismo instrumentalizado	117
Figura 7-7. Cámara de video lateral y trasera (de alta definición) del camión instrumentalizado	117
Figura 7-8. Antena del receptor GPS del sistema VBOX, instalada en el techo del vehículo....	118
Figura 7-9. Distanciómetro láser y pistola láser delantera	119
Figura 7-10. Unidad de grabación del sistema VBOX.....	119
Figura 7-11. Esquemas de los vehículos instrumentalizados	120
Figura 7-12. Ventana del software VBOX Setup, para la configuración del equipo VBOX.....	121
Figura 7-13. Vista delantera del vehículo instrumentalizado	122
Figura 7-14. Vista trasera del vehículo instrumentalizado.....	122
Figura 7-15. Esquema del sistema de medición de velocidades puntuales.....	123
Figura 7-16. Medición de velocidades puntuales	124
Figura 7-17. Huecos con vehículos opuestos visibles y huecos limitados por la visibilidad disponible	133
Figura 7-18. Definiciones alternativas de hueco.....	134
Figura 7-19. Hueco residual	136
Figura 7-20. Instantes temporales en la maniobra de adelantamiento.....	137
Figura 7-21. Intervalos de tiempo de la maniobra de adelantamiento	137
Figura 7-22. Variables en unidades de distancia en la maniobra de adelantamiento	137
Figura 7-23. Medición del distanciómetro trasero (antes de la maniobra) y delantero (después de la maniobra)	139
Figura 8-1. Mapa de localización de las zonas de adelantamiento observadas con la metodología estática	144
Figura 8-2. Mapa de localización de los tramos observados mediante la metodología dinámica	147

Figura 8-3. Mapa de localizaciones de mediciones de velocidad puntual.....	149
Figura 9-1. Análisis descriptivo de la muestra obtenida con la metodología estática.....	152
Figura 9-2. Análisis descriptivo de la muestra obtenida con la metodología dinámica.....	154
Figura 9-3. Distribuciones de frecuencia acumulada de huecos.....	156
Figura 9-4. Distribuciones de frecuencia acumulada de huecos residuales	157
Figura 9-5. Capacidad de predicción de los modelos en función de la probabilidad de corte .	162
Figura 9-6. Efecto del tamaño de hueco (dGAP) y de la visibilidad del vehículo opuesto en la aceptación (modelo 1)	162
Figura 9-7. Efecto del tamaño del hueco (dGAP) y del sexo del conductor adelantante (Modelo 3, Opuesto = 0.63) en la aceptación de huecos	163
Figura 9-8. Efecto del tamaño de hueco residual (TTC) y la visibilidad de vehículos opuestos en la aceptación de huecos.....	163
Figura 9-9. Distribuciones de frecuencia de los tiempos t_3-t_1 en distintas sub-muestras.....	165
Figura 9-10. Distribuciones de frecuencia de los tiempos t_1-t_0 y t_2-t_1	166
Figura 9-11. Distribución de frecuencias de t_4-t_3	167
Figura 9-12. Distribuciones de frecuencia de las variables h_1 y h_3	167
Figura 9-13. Distribuciones de frecuencia de las velocidades del vehículo adelantado, en función de la metodología empleada	168
Figura 9-14. Distribuciones de frecuencia de la velocidad relativa media del vehículo adelantante	169
Figura 9-15. Distribuciones de frecuencia de las velocidades relativas dV_1 y dV_3	169
Figura 9-16. Efecto de N_i en t_3-t_1 (vehículo adelantado ligero).....	170
Figura 9-17. Efecto del tipo de vehículo adelantado (maniobras simples).....	171
Figura 9-18. Efecto de la categoría del vehículo adelantado en t_3-t_1 y en dV (maniobras simples)	172
Figura 9-19. Efecto del sexo y de la edad del conductor adelantante en t_3-t_1 y en V_p (maniobras simples)	173
Figura 9-20. Efecto de la demora en t_3-t_1 y en V_p (maniobras simples).....	174
Figura 9-21. Efecto de la velocidad de diseño en t_3-t_1 y en V_p (maniobras simples)	174
Figura 9-22. Relación entre las velocidades del vehículo adelantado, velocidades en flujo libre y velocidad de diseño.....	175
Figura 9-23. Efecto del tiempo t_4-t_3 en t_3-t_1	176
Figura 9-24. Efecto de la sección transversal	176
Figura 9-25. Efecto de las condiciones de iluminación en el tiempo t_3-t_1	177

Figura 9-26. Variables del adelantamiento	179
Figura 9-27. Error cuadrático medio	183
Figura 9-28. Tasas de aceleración obtenidas con los modelos planteados	184
Figura 9-29. Numero de soluciones no válidas para los modelos planteados.....	184
Figura 9-30. Modelos de aceleración calibrados. Percentil 15 y 85.....	186
Figura 9-31. Valores de aceleración extremos, media y variación en la muestra de maniobras en seguimiento.....	187
Figura 9-32. Efecto de la velocidad del opuesto en el cálculo de la distancia recorrida por el mismo en t_3-t_1 , para distintas velocidades de operación en curva (km/h)	188
Figura 9-33. Posiciones críticas para el cálculo del modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento.....	189
Figura 9-34. Distribución de huecos residuales críticos para el modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento	190
Figura 9-35. Distancia de visibilidad de adelantamiento	192
Figura 9-36. Efecto del tipo de vehículo adelantado y del modo de inicio en la distancia de visibilidad.....	193
Figura 9-37. Efecto del tipo de vehículo adelantado y del modo de inicio en la distancia recorrida en el carril izquierdo.....	193
Figura 9-38. Efecto de la velocidad en la distancia de visibilidad y en la distancia recorrida...	194
Figura 9-39. Distribución de longitudes de vehículos	195
Figura 9-40. Resultados del modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento para vehículos ligeros.....	197
Figura 9-41. Comparación de hueco crítico y modelo de distancia de visibilidad	198
Figura 10-1. Funciones de distribución de la oferta y la demanda del sistema.....	200
Figura 10-2. Probabilidad de no-cumplimiento	202
Figura 10-3. Posiciones de evaluación de la probabilidad de no-cumplimiento	204
Figura 10-4. Comparación entre la solución numérica y la analítica (Caso $V_d = 100$ km/h, vehículo adelantado ligero)	205
Figura 10-5. Resultados del análisis de fiabilidad para $V_d = 100$ km/h.....	206
Figura 10-6. Perfil de visibilidad en una zona de adelantamiento	207
Figura 10-7. Probabilidad de aceptación media.....	208
Figura 10-8. Integral de la probabilidad de aceptación	208
Figura 10-9. Probabilidad de no-cumplimiento media	209
Figura 10-10. Integral de la probabilidad de no-cumplimiento	209

Figura 10-11. Producto de probabilidades medio.....	210
Figura 10-12. Integral del producto de probabilidades	211
Figura 10-13. Efecto de las condiciones de iluminación en la siniestralidad	213
Figura 10-14. Efecto de la meteorología en la siniestralidad.....	213
Figura 10-15. Características del trazado de la carretera en el punto del accidente	214
Figura 10-16. Causas de accidentes	214
Figura 10-17. Resumen de causas detalladas de accidentes debidos a adelantamiento	215
Figura 10-18. Tipologías de accidente.....	216
Figura 10-19. Gravedad de accidentes.....	217
Figura 10-20. Gravedad de accidentes según causas concretas asociadas a adelantamiento .	217
Figura 10-21. Frecuencia de accidentes esperada en el tramo (L = 20 km) (Periodo 1 año)....	220
Figura 10-22. Porcentaje de accidentes esperado (debido a adelantamiento y debido a adelantamiento excluyendo los asociados a intersecciones o accesos).....	221
Figura 10-23. Influencia de la longitud del tramo (en km) en la frecuencia esperada de accidentes debidos a adelantamiento	221
Figura 10-24. AIC en las distintas SPF para zonas de adelantamiento.....	224
Figura 10-25. Porcentaje de desviación explicada por cada una de las SPF para zonas de adelantamiento.....	225
Figura 10-26. Visibilidad disponible en distintas geometrías de zona de adelantamiento	226
Figura 10-27. Estimación del número de accidentes debidos a adelantamiento en zona de adelantamiento.....	226
Figura 11-1. Comparación de tiempos de ocupación del carril izquierdo en estudios experimentales.....	230
Figura 11-2. Comparación de distancias recorridas en el carril izquierdo en estudios experimentales.....	231
Figura 11-3. Comparación de la velocidad relativa media en estudios experimentales	232
Figura 11-4. Comparación en la evolución de la velocidad durante la maniobra, entre Carlson et al. (2006) y el presente estudio.....	232
Figura 11-5. Distribuciones de frecuencia del tiempo de ocupación del carril izquierdo en adelantamientos a pesados	233
Figura 11-6. Tiempos de ocupación del carril izquierdo medios, por grupos de edad y de sexo	234
Figura 11-7. Hueco crítico medio, por grupos de sexo y de edad.....	235
Figura 11-8. Comparación de modelos de aceptación de hueco residual	236

Figura 11-9. Comparación de modelos de aceptación de huecos	237
Figura 11-10. Comparación de modelos de distancia de visibilidad de adelantamiento	238
Figura 11-11. Comparación de modelos de distancia de visibilidad de adelantamiento en la posición crítica	239
Figura 11-12. Análisis de fiabilidad según El Khoury y Hobeika (2007) y el presente estudio..	240
Figura 11-13. Análisis de fiabilidad según El Bassiouni y Sayed (2010) y el presente estudio..	241
Figura 12-1. Captura de pantalla del software Aimsun.....	245
Figura 12-2. Factores del deseo de adelantar.....	246
Figura 12-3. Diagrama de flujo.....	248
Figura 12-4. Velocidades deseadas simuladas y observadas	251
Figura 12-5. Tiempos de adelantamiento simulados y observados.....	252
Figura 12-6. Calibración de los parámetros del deseo de adelantar	256
Figura 12-7. Distancia de visibilidad para completar el adelantamiento.....	258
Figura 12-8. Distancia de visibilidad desde la posición crítica “head to tail” $PSD(t1')$, en paralelo $PSD(t2)$ y “tail to head” $PSD(t2')$	259
Figura 12-9. Perfil de visibilidad en zona de adelantamiento en recta.....	260
Figura 12-10. Perfil de visibilidad en zona de adelantamiento en curva	261
Figura 12-11. Zona de adelantamiento mínima en recta.....	262
Figura 12-12. Integral de la probabilidad de no-cumplimiento, en función de la longitud de zona y de la visibilidad al inicio	263
Figura 12-13. Integral del producto de la probabilidad de no-cumplimiento y la probabilidad de aceptar un hueco, en función de la longitud de zona y de la visibilidad al inicio	264
Figura 12-14. Descomposición de $paxpf$, en el caso de una zona recta.....	265
Figura 12-15. Indicadores de riesgo de zonas de adelantamiento rectas.....	267
Figura 12-16. Efecto del tipo de vehículo adelantado en la integral del producto de probabilidades (ASD al final de la zona igual a 250 m)	268
Figura 12-17. Efecto de la velocidad de diseño (en km/h) en la integral del producto de probabilidades (ASD al final de la zona igual a 250 m)	268
Figura 12-18. Indicadores de riesgo en zonas de adelantamiento curvas.....	270
Figura 12-19. Interpretación del criterio de la Instrucción 3.1 IC	272
Figura 12-20. Indicadores de riesgo en zonas de adelantamiento que cumplen el criterio de la Instrucción 3.1 IC.....	273
Figura 12-21. Producto de la probabilidad de no-cumplimiento y la de aceptación de huecos media ($pamxpfm$) y criterio de la Instrucción 3.1 IC	274

Figura 12-22. Interpretación del criterio de la Instrucción 8.2 IC	275
Figura 12-23. Indicadores de riesgo en zonas de adelantamiento que cumplen el criterio de la Instrucción 8.2 IC para vías existentes (Velocidad máxima = 100 km/h).....	277
Figura 12-24. Producto de la probabilidad de no-cumplimiento y la de aceptación de huecos media (pamxpfm) y criterio de la Instrucción 8.2 IC	278
Figura 12-25. Indicadores de riesgo en zonas de adelantamiento que cumplen el criterio de la Instrucción 8.2 IC para vías de nuevo trazado (Velocidad máxima = 100 km/h)	279
Figura 12-26. Producto de probabilidades medio en zonas rectas (Vd = 100 km/h).....	281
Figura 12-27. Selección de la visibilidad óptima en zonas en curva (Vd = 100 km/h)	282

1. Antecedentes

En la presente tesis doctoral se desarrolla una investigación acerca de la maniobra de adelantamiento en carreteras convencionales, cuyo objeto es la revisión de los criterios existentes para el diseño y la señalización de zonas de adelantamiento y la formulación, en su caso, de nuevos criterios basados en observaciones experimentales.

El director de la tesis es el Dr. Alfredo García, catedrático de la Universitat Politècnica de València (UPV).

Esta investigación se llevó a cabo de forma paralela al proyecto de investigación “Desarrollo de modelos de distancias de visibilidad de adelantamiento”, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, con referencia TRA 2010-21736. Entre los objetivos del proyecto se encontraban la revisión de los criterios técnicos de diseño y señalización de zonas de adelantamiento. El proyecto se llevó a cabo en el Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC) de la UPV entre el año 2011 y 2013, siendo la presente tesis complementaria a dicho proyecto.

Por su parte, el autor de la tesis participó activamente en el citado proyecto, trabajando en el GIIC a tiempo completo gracias a una ayuda del Programa de Formación de Profesorado Universitario (FPU) del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, entre diciembre de 2011 y septiembre de 2015. Este programa concede, de forma competitiva a nivel nacional, becas para un periodo de dos años, renovables como contratos para dos años más, con el objetivo de la elaboración de la tesis doctoral. Anteriormente, disfrutó de una Beca de Excelencia convocada por la Universitat Politècnica de Valencia (entre enero de 2011 y noviembre de 2011) y de una Beca de Colaboración del Ministerio de Educación (entre enero de 2010 y julio de 2010).

Durante el transcurso de la investigación, el doctorando realizó una estancia de seis meses en la Universidad de British Columbia, en Vancouver (Canadá). Esta estancia fue financiada a través del programa Transatlantic Partnership for Excellence in Engineering (TEE) en el marco del programa Erasmus Mundus Action 2. En ella se realizó el análisis de seguridad vial planteado en este documento.

Por otra parte, el autor inició la investigación en el mismo ámbito a través de la presentación de los trabajos académicos de final de titulación, tanto para la obtención del título de Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, en 2010, como para el de Máster Universitario en Transporte, Territorio y Urbanismo, en 2011. En dichos trabajos académicos se desarrollaron las bases metodológicas que posteriormente permitieron realizar la investigación.

2. Introducción

El adelantamiento se define como la maniobra en la que un vehículo rebasa a otro que circula a menor velocidad. Es preciso distinguir entre los adelantamientos ocurridos en vías con un solo carril por sentido, y los ocurridos en vías con más de un carril para cada sentido de circulación.

Su efecto en el tráfico de ambos tipos de vías es el de reducir las interferencias entre vehículos que circulan a distintas velocidades y en el mismo sentido, permitiendo que un mayor número de ellos circulen libremente, mejorando así la calidad de la circulación.

Sin embargo, en vías de calzada única y un único carril por sentido, como son la mayoría de carreteras convencionales, el adelantamiento se realiza invadiendo el carril destinado al sentido contrario, siendo este el hecho más característico de la maniobra. El presente trabajo se centrará, únicamente, en el estudio de las maniobras de adelantamiento en este tipo de vías.

2.1. Descripción y fases

El adelantamiento es una maniobra compleja, en la que se distinguen varias etapas, desde el momento en el que un vehículo rápido se acerca a uno lento hasta que finalmente la maniobra se ejecuta. El vehículo lento recibe el nombre de vehículo adelantado (o vehículo líder mientras se realiza el proceso de seguimiento), mientras que el vehículo rápido se denomina vehículo seguidor (antes de que se ejecute el adelantamiento) y adelantante (durante el adelantamiento).

En general, se distinguen las siguientes tres etapas: deseo, decisión y ejecución.

2.1.1. Deseo

La primera etapa se refiere al deseo de adelantar, o demanda de adelantamiento. El deseo (positivo o negativo) del conductor del vehículo seguidor depende, principalmente, de la diferencia entre su velocidad deseada y la velocidad del vehículo líder.

Sin embargo, otros factores pueden tener influencia en el deseo de adelantar, como es el caso de la impaciencia debida a demoras largas, o el tiempo restante hasta el final del viaje o del tramo de carretera convencional.

En caso de que el deseo sea afirmativo, en la siguiente etapa el conductor decide adelantar o no en función de las características y condiciones del tráfico, de la vía, del vehículo, etc. En caso contrario, el vehículo seguidor continúa detrás del vehículo líder.

2.1.2. Decisión

Una vez el conductor del vehículo seguidor desea adelantar, la siguiente etapa consiste en la aceptación o rechazo de huecos en el sentido contrario. En general, un hueco se define como el intervalo de tiempo (o distancia) entre dos vehículos que circulan en el sentido opuesto. A lo largo del proceso de seguimiento, el conductor del vehículo seguidor decide aceptar o rechazar

los huecos en función de su tamaño y de su estimación de distancia de adelantamiento necesaria.

2.1.3. Ejecución

Una vez se ha aceptado un hueco, el vehículo seguidor (ahora adelantante) inicia la maniobra invadiendo el carril opuesto y acelerando, si lo necesita.

El vehículo adelantante circula ahora a mayor velocidad que el adelantado, por el carril destinado al tráfico en dirección opuesta, hasta rebasarlo. Cuando dispone del espacio suficiente por delante del vehículo adelantado regresa al carril propio, donde recupera la velocidad que desea mantener libremente.

Si durante la maniobra de adelantamiento el conductor del vehículo adelantante observa alguna dificultad para concluir el adelantamiento, como suele ser la aparición de un vehículo en sentido opuesto, reacciona y puede optar por abortar el adelantamiento, regresando al carril propio detrás del vehículo que pretendía adelantar. A partir de cierto punto, que muchos autores coinciden en llamar posición crítica, es más seguro y rápido completar la maniobra que abortarla.

Por otra parte, existen dos modos distintos de iniciar la maniobra de adelantamiento. En algunos casos, el vehículo impedido no necesita decelerar y realiza el adelantamiento inmediatamente después de acercarse al vehículo lento. En este caso, se trata de una maniobra lanzada, y las fases de deseo, decisión y ejecución se producen en un intervalo muy corto de tiempo. Por el contrario, si el vehículo impedido reduce su velocidad y se mantiene en cola detrás del vehículo lento, se habla de adelantamientos en seguimiento. Estos requieren siempre de una aceleración del vehículo adelantante.

A modo de resumen, existen dos modos de iniciación distintos: lanzado y con seguimiento del vehículo adelantado, y dos tipos de finalización de la maniobra: adelantamiento completado y abortado. Puede observarse la evolución de los vehículos implicados sobre la carretera en la Figura 2-1, distinguiendo entre los dos modos de finalización posibles.

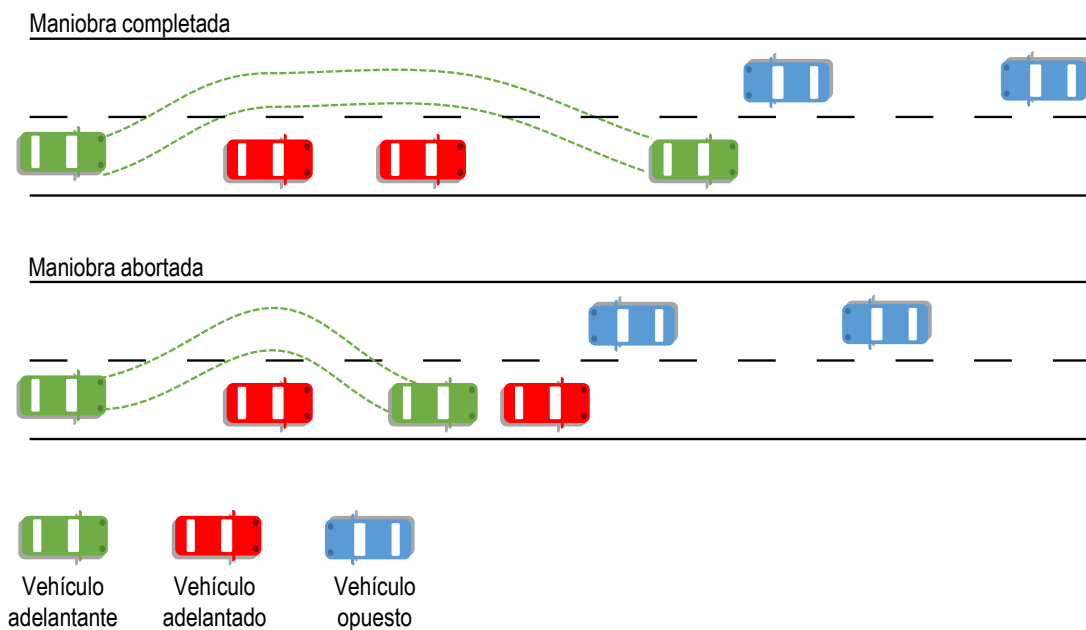


Figura 2-1. Esquema de la maniobra y vehículos implicados

En este gráfico se representa el vehículo adelantado en color rojo, el adelantante en color verde y el vehículo opuesto en azul. Las trayectorias de los tres vehículos implicados en una maniobra

de adelantamiento pueden representarse, también, por medio de un gráfico de la posición longitudinal a lo largo del tiempo (llamados diagramas espacio-tiempo). En la Figura 2-2 se muestra para el caso de maniobra completada y en la Figura 2-3, para el caso de abortada.

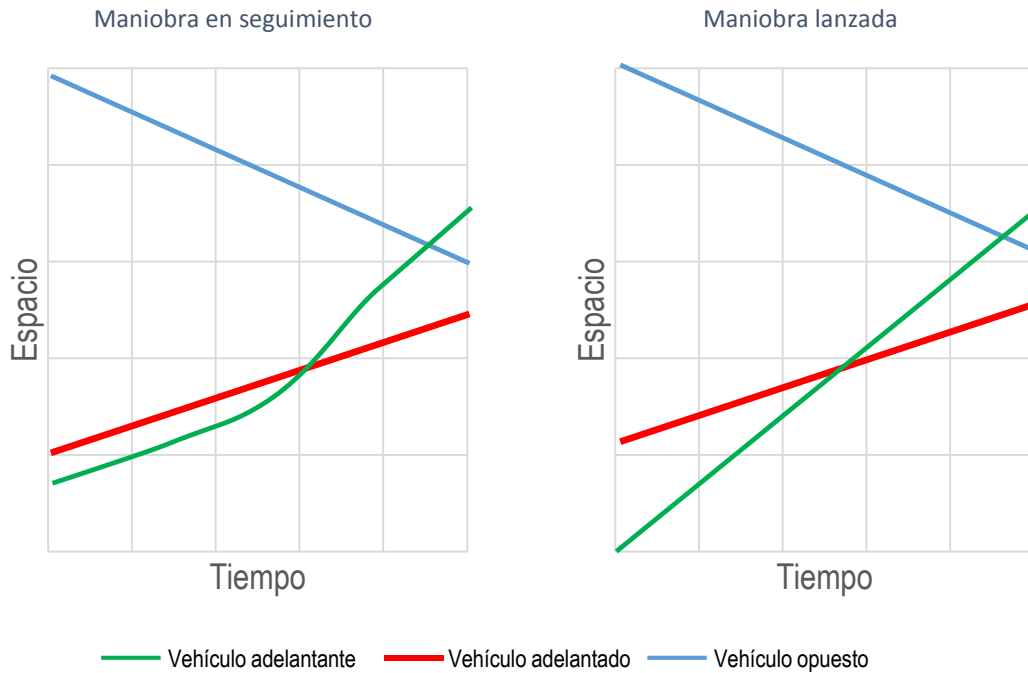


Figura 2-2. Diagramas espacio-tiempo de maniobras completadas

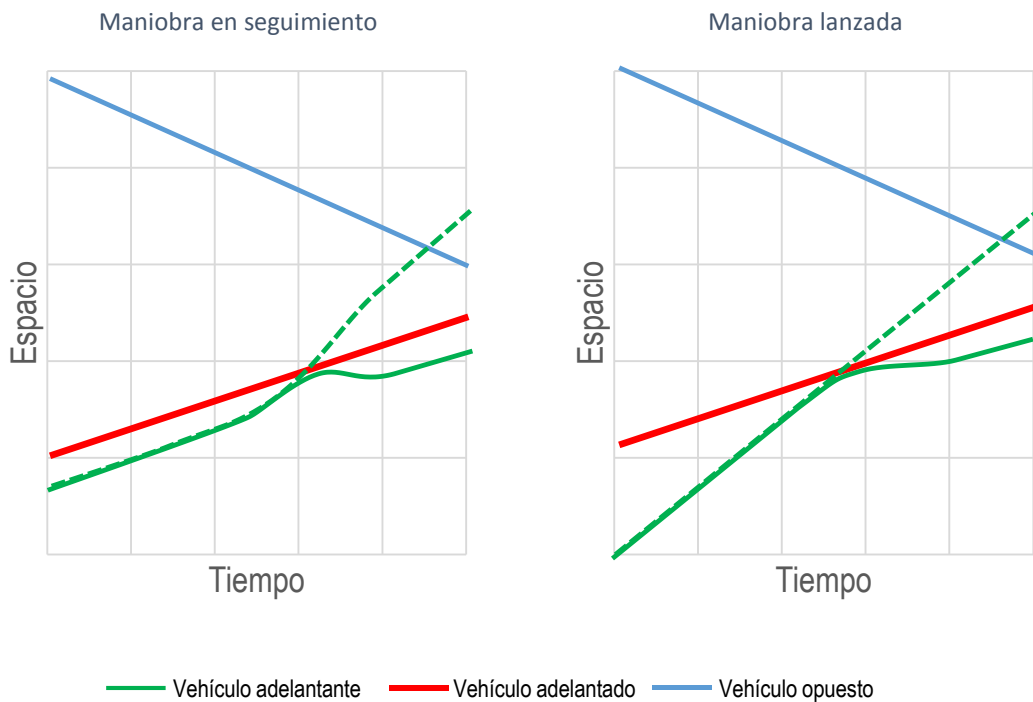


Figura 2-3. Diagramas espacio-tiempo de maniobras abortadas

2.2. Factores del adelantamiento

Dada la complejidad de esta maniobra, existe un número muy elevado de factores que tienen una influencia en la misma. En primer lugar se encuentran aquellos factores dependientes de las características y condiciones de la vía.

La configuración geométrica de la carretera, junto a distintos tipos de obstáculos exteriores o interiores a la vía (como vegetación, taludes, edificios o vehículos) afectan a la visibilidad disponible en cada punto de la misma.

Además, el trazado en alzado condiciona la forma en que se desarrollan las maniobras de adelantamiento, en la medida que modifica la capacidad de reducir, mantener o aumentar las velocidades de los vehículos, por efecto de las pendientes longitudinales.

Otros aspectos del diseño geométrico, ya sea del propio trazado o de la sección transversal modifican la percepción de la vía por parte de los conductores y pueden tener influencia en cualquier maniobra que en ella tenga lugar.

Además del diseño geométrico, el tráfico de la carretera ejerce una clara influencia en el adelantamiento. Algunos factores relacionados con el tráfico son el volumen y composición del mismo, y las velocidades de operación.

El volumen de tráfico, definido por la intensidad del mismo, así como su composición, especialmente de vehículos pesados, genera la necesidad de adelantamiento. Las carreteras de mayor tráfico tienen una mayor demanda de maniobras de adelantamiento. Sin embargo, la presencia de un volumen de tráfico muy elevado en vías de doble sentido y calzada única dificulta el desarrollo de las maniobras, puesto que para ellas es preciso invadir el carril destinado al tráfico en sentido opuesto.

La distribución de velocidades de operación en la vía también influye en la demanda de adelantamientos. Si las velocidades en una sección presentan una gran variabilidad, existirán muchos vehículos que deseen adelantar a otros porque circulan más lento.

Las dimensiones de los vehículos adelantado y adelantante, especialmente su longitud, influyen en las distancias necesarias para llevar a cabo los adelantamientos. Además, otras dimensiones, como el ancho y la altura de muchos vehículos pesados, suponen importantes limitaciones a la visibilidad que pueden tener un claro impacto en la percepción y decisión de adelantar.

Además, y aunque suelen guardar relación con las dimensiones, las prestaciones de los vehículos, sobretodo sus capacidades de aceleración y frenada, son aspectos muy importantes en la ejecución de maniobras de adelantamiento.

Por otra parte, los factores relacionados con el conductor tienen un claro impacto en el adelantamiento, dado que la maniobra depende de varios procesos de percepción y decisión.

Dentro de este grupo de factores se encuentra el carácter más agresivo o más conservador de los conductores, la mayor o menor destreza en la conducción, la capacidad de decisión, la percepción, el conocimiento de la vía de un usuario habitual o los tiempos de demora causados por el seguimiento a un vehículo más lento mientras no existe un lugar habilitado y un hueco en el sentido contrario que permitan realizar el adelantamiento.

Por último, se puede identificar un conjunto de factores externos a la vía, al vehículo y a los conductores y entre los que se encuentran las condiciones de luminosidad (diurna y nocturna) o las condiciones meteorológicas. Todos estos factores tienen repercusión en los otros que ya se han comentado anteriormente.

2.3. Funcionalidad

Como ya se ha mencionado, la finalidad de la maniobra de adelantamiento es la de reducir las interferencias entre vehículos que circulan a velocidades diferentes a lo largo de una carretera de calzada única y doble sentido. La variabilidad en velocidades de circulación por la vía origina una necesidad o demanda de adelantamientos, puesto que los conductores que circulan más rápido desean seguir haciéndolo de forma libre, sin que vehículos más lentos les impongan una nueva velocidad de circulación inferior.

El adelantamiento, por lo tanto, tiene un importante efecto en las condiciones del tráfico, de manera que en aquellos tramos donde existan demanda y oportunidad de adelantamiento la calidad de la circulación será mayor que en aquellos donde la demanda de adelantamientos no pueda ser satisfecha, y se ocasionen demoras a los conductores de los vehículos más rápidos.

La calidad de la circulación en un determinado elemento de la infraestructura viaria se puede caracterizar mediante el concepto de niveles de servicio existente en el Manual de Capacidad de Carreteras, (Highway Capacity Manual) (Transportation Research Board, 2010).

Los niveles de servicio evalúan la calidad de la circulación en un determinado elemento del sistema vial, en este caso una carretera, por medio de indicadores que engloban y resumen distintos parámetros de la circulación y características de la infraestructura.

En el caso de carreteras de calzada única, el nivel de servicio se calcula a partir de las variables de velocidad media y de porcentaje de tiempo en cola. Un vehículo se encuentra demorado, o en cola, si tiene que mantenerse detrás de otro más lento. El porcentaje de tiempo en cola se estima a partir de la intensidad de tráfico, su reparto en sentidos, y la proporción de tramos con prohibición de adelantamiento.

Existe, por tanto, una relación directa entre el nivel de servicio, la fluidez o calidad de la circulación, y las posibilidades de adelantamiento que una carretera ofrece. De este modo, si a lo largo de una carretera existe un número reducido de oportunidades de adelantamiento, ya sea por el volumen de tráfico opuesto elevado o por la ausencia de zonas de adelantamiento permitido, la calidad de la circulación será peor que en el caso de existir mayores oportunidades de adelantamiento.

2.4. Seguridad vial

La maniobra de adelantamiento es, desde el punto de vista de la seguridad vial, una de las más peligrosas de las que tienen lugar en carreteras de calzada única y doble sentido. La peligrosidad se debe a que la maniobra implica a dos o más vehículos cuyas trayectorias se aproximan y se cruzan (adelantados y adelantantes) y en ocasiones, a un vehículo opuesto que se acerca a ellos a gran velocidad.

No es fácil identificar las causas de los accidentes relacionados con las maniobras de adelantamiento. Además de choques frontales, pueden producirse accidentes por otras causas, como alcances, salidas de vía, etc. existiendo por tanto distintas situaciones. Pese a que la frecuencia de los accidentes asociados a maniobras de adelantamiento sea inferior a la de otros tipos de maniobra, la gravedad de los mismos es muy alta, siendo habitual que las consecuencias sean fatales.

2.5. Distancia de visibilidad de adelantamiento

La distancia de visibilidad de adelantamiento se define como la distancia de visibilidad necesaria para que un vehículo pueda adelantar a otro en presencia de un tercero que se acerca en sentido opuesto.

Para adelantar a un vehículo se necesita disponer visible y libre de obstáculos de una distancia mayor a la que el vehículo adelantante recorre mientras se rebasa al adelantado. Ello se debe a que, al mismo tiempo, un vehículo que circula en sentido opuesto puede estar acercándose.

Si se representa la evolución de los vehículos en la dirección del eje de la vía, a lo largo del tiempo, es posible identificar la distancia de visibilidad de adelantamiento. Se muestra en la Figura 2-4.

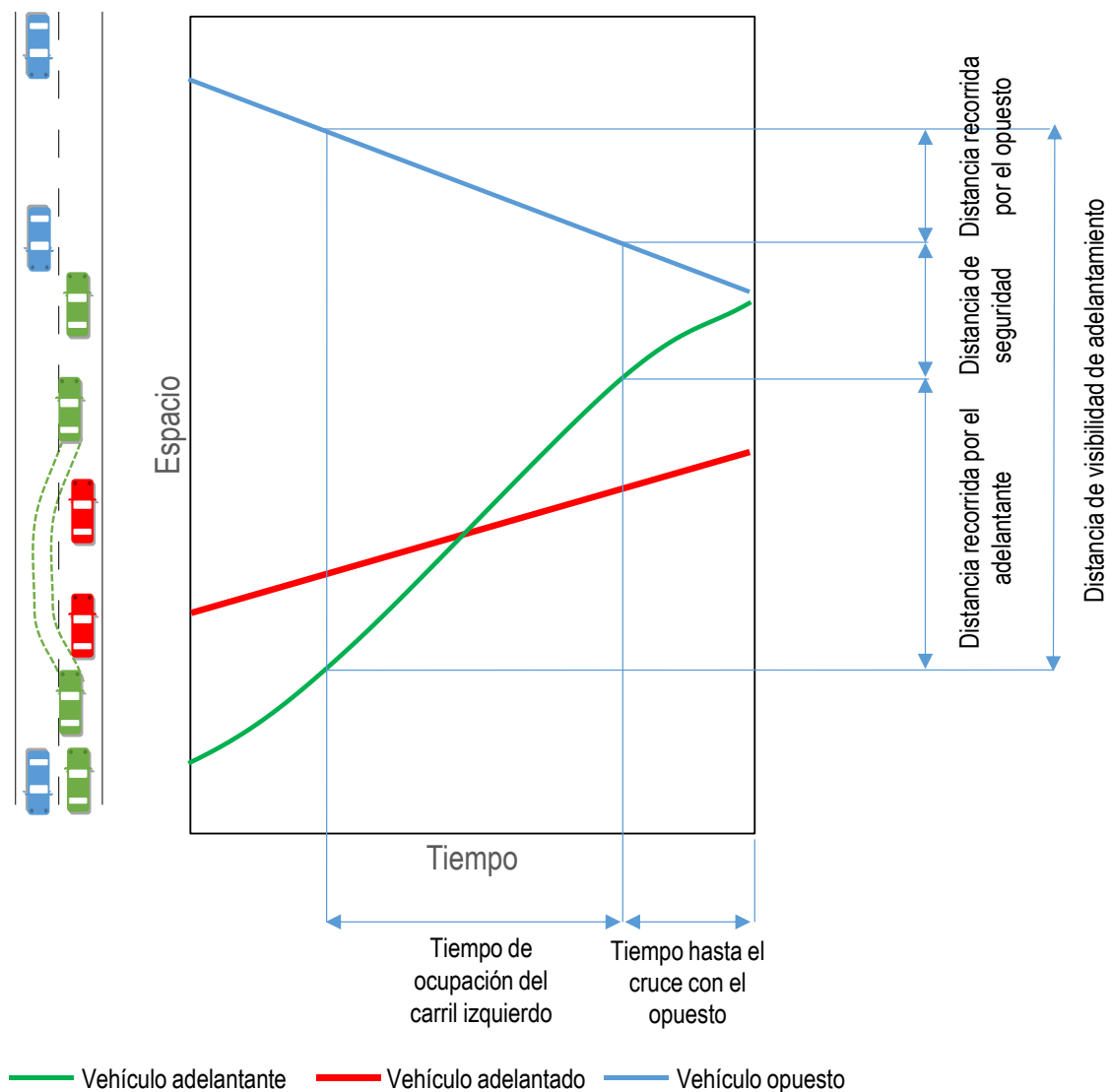


Figura 2-4. Concepto de distancia de Visibilidad de adelantamiento

Por lo tanto, la distancia de visibilidad necesaria se compone de la distancia recorrida por el adelantante al efectuar la maniobra, más la recorrida por un vehículo opuesto durante el mismo tiempo. Además, entre ambas distancias, se suele incluir un margen de seguridad o hueco residual crítico entre el vehículo que acaba de adelantar y el opuesto.

Por lo tanto, la distancia de visibilidad de adelantamiento es la distancia que el conductor del vehículo adelantante debe ser capaz de observar a lo largo del carril opuesto. Al observar esta distancia libre de vehículos en sentido contrario, es posible llevar a cabo la maniobra de forma segura.

La distancia de visibilidad de adelantamiento, dada su importancia, es el concepto empleado en los criterios de diseño geométrico y de señalización que permiten llevar a cabo la maniobra de forma legal, cómoda y segura. Desde el punto de vista del diseño geométrico, se trata de garantizar que la visibilidad disponible a lo largo de la carretera es superior a la de adelantamiento, al menos en ciertas partes del trazado. Los criterios de señalización establecen el lugar donde inician y acaban las prohibiciones de adelantamiento a partir de umbrales fijados para la visibilidad disponible a lo largo de la vía. De esta forma se delimitan las zonas de adelantamiento, como segmentos de carretera en los que el adelantamiento está permitido. En España, se emplea el criterio de la Instrucción 3.1 IC para diseño geométrico (Ministerio de Fomento, 2000) y el de la 8.2 IC (Ministerio de Fomento, 1987) para la señalización de zonas de adelantamiento.

3. Estado del arte

El estado del arte supone una recopilación y revisión de los conocimientos existentes en el ámbito de la maniobra de adelantamiento que se disponen hasta la fecha. Este capítulo contiene una revisión de la bibliografía existente, desde artículos de investigación y libros hasta normativas nacionales y extranjeras. El objetivo de esta revisión fue determinar el nivel de conocimientos existente sobre la maniobra de adelantamiento, profundizar en las conclusiones más significativas y explorar carencias y necesidades de investigaciones anteriores.

3.1. Observación experimental

En este apartado se revisaron distintas metodologías experimentales empleadas para el estudio de la maniobra de adelantamiento. Para estudiarla, la mayor parte de investigadores coincidieron en la necesidad de realizar observaciones, ya que los modelos teóricos no son suficientemente detallados y las técnicas de simulación todavía son insuficientes.

Desde los años treinta del siglo pasado se han realizado, por este motivo, algunos estudios de campo sobre la maniobra de adelantamiento. Se trató inicialmente de mediciones en la propia carretera de adelantamientos reales, con el objeto de obtener una descripción lo más exacta posible de la maniobra. Se utilizaron técnicas muy diversas, desde mediciones manuales con cronómetros hasta algunas grabaciones de video con posterior tratamiento de imágenes. Se aplicaron distintas metodologías, con una mayor o menor influencia en el tráfico por parte de los investigadores.

A continuación se resume la mayor parte de estudios de campo sobre la maniobra de adelantamiento que se han realizado hasta la fecha, desarrollando en profundidad los más relevantes en cada una de las siguientes sub-secciones.

3.1.1. Primeros estudios de campo

Desde los años 30 del siglo XX el interés por la maniobra de adelantamiento en carreteras convencionales estuvo presente en los investigadores. Las primeras mediciones se realizaron con técnicas manuales.

En los años 1939 y 1941 se realizaron dos de los primeros estudios de campo en Estados Unidos. Son los estudios que Normann (1939) y Prisk (1941), que llevaron a cabo en tramos con tráfico regular y sin ninguna intervención por parte de los investigadores en las maniobras. Los estudios de Normann y Prisk sirvieron de base para calibrar el modelo de distancia de adelantamiento publicado en la normativa americana de diseño, así como posteriores revisiones del mismo, hasta llegar a su quinta edición (AASHTO, 2004).

El estudio de Normann se realizó caracterizando 1635 adelantamientos en carreteras de Estados Unidos. La intensidad horaria media fue de 375 veh/h. Se reconoció la importancia de estudiar los adelantamientos múltiples, que representan el 33%.

El estudio de Prisk, por su parte, clasificó los adelantamientos simples según la forma en que afectan al tráfico, como sigue:

- Adelantamientos con seguimiento.
- Adelantamientos con regreso forzado.
- Adelantamientos con seguimiento y con regreso forzado.
- Adelantamientos libres sin tráfico opuesto.

La distancia de adelantamiento media para cada uno de estos cuatro casos es 183 m, 183 m, 159 m y 214 m, respectivamente. En la mayoría de los casos la diferencia de velocidades entre vehículo adelantado y adelantante fue de aproximadamente 16 km/h, y la mayoría de maniobras partían del seguimiento del vehículo adelantado.

Hasta 1958 no se realizó ningún otro estudio a gran escala. Es en este año cuando Normann realizó de nuevo en Estados Unidos una serie de mediciones, para comprobar la validez y actualidad de las distancias de adelantamiento de la normativa, puesto se advirtió una mejora en las prestaciones de los vehículos. Normann (1958) comparó los resultados de 1958 con los de 1939, observando un aumento de velocidades y de distancias, así como una disminución en la altura del punto de vista del conductor.

En el año 1971 Van Valkenberg y Michael (1971) publicaron un nuevo modelo para distancias de adelantamiento, basado por primera vez en el concepto de la posición crítica. Este modelo estaba basado en datos empíricos que se obtuvieron en un estudio de campo.

En el estudio de Van Valkenberg y Michael se midió la distancia recorrida desde la posición crítica hasta regresar al carril propio, así como el tiempo transcurrido en esa maniobra, para tres niveles de velocidad del vehículo adelantado diferentes. Las medidas se clasificaron en cuatro tipos de adelantamiento: por una parte, según fuera “lanzado” o “con seguimiento” del vehículo adelantante al adelantado y por otra, según el regreso al carril propio fuera “voluntario” o “forzado” por las circunstancias del tráfico.

En el año 1984 se presentó otro modelo de distancias de adelantamiento, que se verificó mediante observaciones. Se trató del modelo de Saito (1984). En él, se realizaron diversas mediciones en tramos de carretera de montaña y con adelantamientos a velocidades bajas, de entre 25 y 70 km/h. Se realizaron grabaciones de video y posteriormente se analizaron los datos de forma manual.

Durante los años 90, tras el estudio de Saito, se publicaron algunos nuevos estudios de campo similares: Kaub (1990), en Estados Unidos; Hunt y Mahdi (1991) en el Reino Unido, y Carlsson (1991) en Suecia.

Kaub (1990) estudió un tramo de carretera de calzada única de 21 millas de longitud. En la tercera parte del mismo estaba permitido el adelantamiento. En 5 zonas de adelantamiento se recogieron datos por medio de observadores, detectores de velocidad y cámaras de video. Las intensidades horarias se situaron entre los 225 veh/h en el sentido más cargado y los 140 veh/h en el de menor intensidad. Se registraron cerca de 20 adelantamientos por hora. Con volúmenes de tráfico algo superior (a partir de 500 veh/h en ambos sentidos) se observó que decrecía la tasa de adelantamientos. Según el autor, en el 30% de los casos los adelantamientos se produjeron en presencia de vehículos en sentido opuesto y las maniobras abortadas representan cerca del 7% del total.

Hunt y Mahdi (1991), por su parte, analizaron más de 1100 maniobras mediante videos grabados con tres cámaras a lo largo de un tramo de 1 km de longitud. Ajustaron las distribuciones estadísticas de los distintos parámetros del adelantamiento y formularon un modelo para obtener la distancia de adelantamiento en función de la velocidad y del tipo de adelantamiento, entre otros factores.

Romana (1999) estudió el fenómeno del adelantamiento en carreteras de calzada única de la Comunidad de Madrid, en España. Realizó grabaciones de video de una duración de 3 horas, en carreteras cuya IMD se encuentra entre 8000 y 9000 veh/día. El porcentaje de vehículos pesados se sitúa entre el 5 y el 10%.

El estudio de Romana (1999) analizó las diferencias en el orden de los vehículos antes y después del tramo a estudiar. Para ello, se grabaron videos en ambos puntos. El estudio no se centró en el análisis de la propia maniobra de adelantamiento, sino en la frecuencia en que se desarrollaba la misma, con el objeto de estudiar las características del tráfico en vías convencionales. Como resultado, Romana concluyó que la situación más efectiva para que se produzcan adelantamientos se da con tráfico equilibrado entre sentidos y de entre 500 y 700 veh/h.

Valencia-Alaix y García (2010) realizaron, una serie de grabaciones de video en un tramo de carretera en Colombia. El estudio se centró en un tramo con pendiente del 5,3%, y se realizó con la ayuda de una cámara de video dispuesta de forma perpendicular a la vía, a cierta distancia de la misma. Mediante un levantamiento topográfico se determinaron las coordenadas exactas de un conjunto de puntos del tramo visible, de manera que posteriormente, tras la observación directa del video, y a partir de las referencias medidas, se calcularan la velocidad y distancias recorridas por los vehículos que realizaban maniobras de adelantamiento.

La finalidad del estudio fue la calibración de un modelo de microsimulación, que se describirá más adelante, así como el establecimiento de criterios de para mejorar la calidad de circulación en tramos de pendiente prolongada, como es el caso de carriles de vehículos lentos.

Se revisaron, además de los comentados, otros estudios en los que se introdujo algún elemento de intervención externa, por parte de los autores de la investigación. Algunos de estos estudios fueron los de Troutbeck (1981), Weaver y Glennon (1972) o Morall y Werner (1982). En algunos casos la intervención consistió en que el vehículo adelantado se desplazara a velocidad constante, controlado por el equipo investigador, y en otros es el propio investigador el que condujo el vehículo adelantante.

3.1.2. Polus et al. (2000)

Los autores (Polus et al., 2000) de este estudio plantearon la necesidad de realizar una investigación extensa de la maniobra de adelantamiento. La necesidad de obtener valores actuales para poder calibrar los parámetros de los modelos de distancia de adelantamiento ya existentes, así como la gran variabilidad de los datos obtenidos cuando se emplean distintos métodos de medición en distintos países, centraron la motivación de este estudio.

3.1.2.1. Localizaciones

Las observaciones de Polus et al. (2000) se llevaron a cabo en carreteras de calzada única y dos sentidos, de tráfico medio y buenas condiciones de visibilidad y adherencia, ubicadas en Israel. La calzada de las carreteras objeto del estudio tenía un ancho medio de unos 7 m y los arcenes de entre 1,5 y 2,5 m cada uno. La intensidad de tráfico se situó entre 300 y 1000 veh/h, lo cual garantizaba, según los autores, entre 10 y 20 adelantamientos cada hora.

El límite de velocidad permitida fue de 80 o 90 km/h. Los tramos en los que se realizó el estudio eran principalmente rectos, tanto en planta como en alzado, y libres de cualquier intersección, o acceso. La longitud de todos ellos superaba los 800 metros, distancia más que suficiente para realizar un adelantamiento a las velocidades observadas en los tramos. La visibilidad era muy elevada. Por estos motivos, el adelantamiento estaba únicamente condicionado por el conductor y su vehículo y por el tráfico opuesto de la vía, eliminando otros factores.

3.1.2.2. Metodología

Se realizaron grabaciones de video sobre los tramos del estudio. Las cámaras se situaron en puntos fijos o incluso a bordo de un helicóptero que sobrevoló el tramo de carretera.

Los datos obtenidos fueron tiempos, distancias y velocidades. Para el caso de los tiempos, se midieron manualmente, con ayuda del reloj superpuesto en las propias imágenes del video. Las distancias se midieron también manualmente, a partir de marcas situadas en la calzada, cuya posición y distancia se conocía previamente.

3.1.2.3. Resultados

En total se registraron 1500 maniobras de adelantamiento distintas. No obstante, sólo algunas de ellas (entre 200 y 500 adelantamientos) fueron analizadas como se describe a continuación.

Se distinguieron 3 tipos de adelantamiento, según el tipo de vehículos implicados:

- Adelantamiento simple, cuando un vehículo adelanta a otro.
- Adelantamiento múltiple, cuando un vehículo adelanta a dos o más.
- Adelantamiento compuesto, cuando dos o más vehículos adelantan a uno o más.

El adelantamiento simple corresponde al 73% de los casos, y es el que se analizó en profundidad, mediante la medición detallada de tiempos y distancias recorridas de los 3 vehículos implicados.

Además, según el comportamiento del vehículo adelantante, se distinguieron dos tipos de adelantamiento: el que parte del seguimiento tras el vehículo adelantado, a su misma velocidad, y el lanzado, en el que el vehículo adelantante no reduce su velocidad de forma significativa.

Para ello se definieron los siguientes puntos:

- De cruce con el anterior vehículo que circula en sentido opuesto.
- De inicio del adelantamiento, cuando la rueda delantera izquierda cruza la línea central.
- De final del adelantamiento, cuando la rueda trasera izquierda vuelve a cruzar la línea central.
- De cruce con el vehículo que circula en dirección opuesta.

También se midieron las distancias entre vehículo adelantado y adelantante, tanto antes como después del adelantamiento y la distancia de seguridad entre el vehículo adelantante y el opuesto en el punto final del adelantamiento.

La Figura 3-1 muestra cada una de las 3 etapas, delimitadas por los cuatro puntos descritos, en que se descompone el adelantamiento.

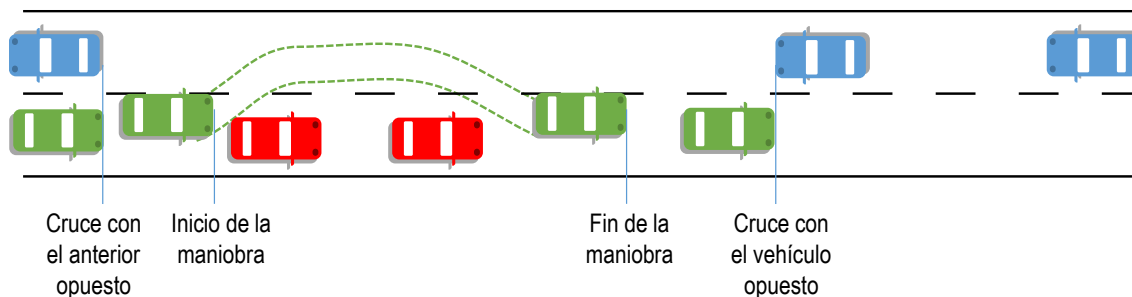


Figura 3-1. Esquema y fases de la maniobra de adelantamiento según Polus et al. (2006)

El estudio se empleó para plantear una calibración alternativa del modelo de la AASHTO (2004), que se desarrollará más adelante. Además, se caracterizaron las diferencias existentes en las distancias recorridas cuando el vehículo adelantado es un vehículo ligero y cuando es uno pesado. Los valores obtenidos se resumen en la Tabla 3-1.

Tipo de vehículo adelantado	Tiempo en carril izquierdo (s)			Distancia en carril izquierdo (m)			Diferencia de velocidades (km/h)
	Media	SD	Recuento	Media	SD	Recuento	Media
Ligero	9.9	2.7	252	240.7	72.2	249	13.0
Pesado	11.2	3.1	181	255.4	76.5	182	14.0
Articulado	10.9	3.4	513	273.4	86.0	32	-

Tabla 3-1. Variables descriptivas del adelantamiento en el estudio de Polus et al. (2000)

Según los autores, el modelo de la AASHTO (2004) era aceptable, para el caso de adelantamientos de turismo a turismo. Para el caso de adelantamientos a vehículos pesados, las distancias de adelantamiento podían ser insuficientes. Los adelantamientos a vehículos pesados representaron, en las carreteras objeto del estudio, casi la mitad de los adelantamientos registrados.

3.1.3. Carlson et al. (2006)

Los autores (Carlson et al. 2006) realizaron un estudio de campo empleando una metodología muy diferente.

3.1.3.1. Localización del estudio

Para el estudio, se escogió un único tramo de carretera de 24 km situado en el estado de Texas (Estados Unidos), realizando las mediciones en ambos sentidos. La limitación de velocidad se situaba en 110 km/h, estando el percentil 85 de la velocidad de operación entre 101 y 112 km/h, según sentidos y periodos de medición. La sección transversal de la carretera se componía de 2 carriles de 3,60 m y arcenes de 1,60 m. La IMD era de 4122 veh/día, repartidos por sentidos en proporción 50/50. En más del 75 % del tramo estaba permitido el adelantamiento.

3.1.3.2. Metodología

Carlson et al. (2006) plantearon también un método de seguimiento con video de la maniobra de adelantamiento. En este caso decidieron no emplear un sistema de grabación desde puntos fijos, puesto que no se dispone de la perspectiva necesaria y consideraban que no tiene la precisión suficiente para los objetivos de su estudio. En este estudio, las grabaciones de video se obtuvieron desde el vehículo adelantado.

El vehículo contaba con 3 cámaras situadas en el exterior del coche, sobre el techo del mismo y en el interior de un portaequipajes. Las tres cámaras tomaban imágenes de la parte trasera,

lateral y frontal del vehículo. Las cámaras se encontraban camufladas y permitían, gracias a sus ángulos de visión, tomar imágenes de todo el adelantamiento. Una cuarta cámara se situó en el interior del vehículo, tomando imágenes de un reloj y cuentakilómetros preciso, a la vez que las otras tres cámaras registraban el adelantamiento.

Las grabaciones se realizaron cuando el vehículo circulaba a lo largo del tramo objeto de estudio a una velocidad de 5, 10 y 15 mph por debajo de la velocidad máxima permitida, es decir, 104, 96 y 89 km/h.

En la Figura 3-2 se puede observar el vehículo flotante con el equipamiento ya instalado.



Figura 3-2. Esquema y fotografías del vehículo flotante empleado por Carlson et al. (2006)

3.1.3.3. Resultados

Mediante esta técnica se observaron 255 maniobras de adelantamiento. De ellas, únicamente se analizaron 105, al eliminar aquellas maniobras que no fueron aisladas, simples, o realizadas por un vehículo ligero cuya marca y modelo fuera identificable.

El análisis de estas maniobras se centró en el tiempo de recorrido en carril contrario, así como en la evolución de velocidades a lo largo de dicho recorrido. Los autores compararon los resultados con el modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento de la AASHTO (2004), que se desarrollará más adelante.

V (km/h)	V (mph)	Tiempo de ocupación del carril izquierdo (s)		
		Percentil 15	Percentil 50	Percentil 85
88	55	7,8	9,3	11,5
96	60	7,9	10,1	12,1
104	65	8,8	10,5	11,0

Tabla 3-2. Tiempos de recorrido en el carril izquierdo, según Carlson et al. (2006)

Velocidad adelantado (km/h)		Velocidad (km/h)		
		88,0	96,0	104,0
Velocidad del adelantante	Etapa A	102,4	107,2	116,8
	Etapa B	105,6	110,4	120,0
	Etapa C	112,0	116,8	124,8
	Etapa D	110,4	115,2	120,0
	Etapa E	107,2	110,4 <td 115,2	
Velocidad relativa media		21,3	18,2	17,6

Tabla 3-3. Velocidad del vehículo adelantante, según Carlson et al (2006)

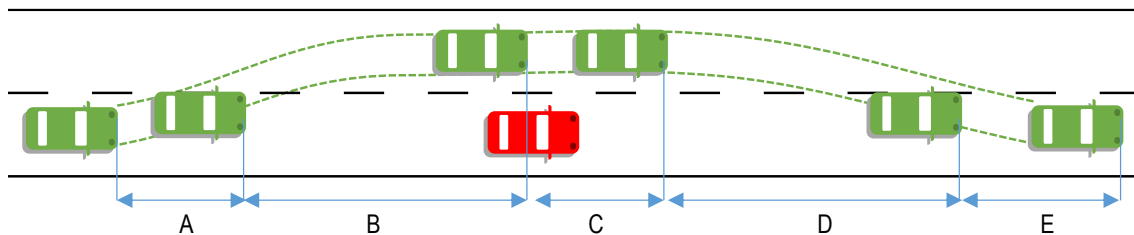


Figura 3-3. Fases de la maniobra según Carlson et al. (2006)

La Tabla 3-2 y la Tabla 3-3 resumen los datos relativos a la ocupación del carril izquierdo por parte del vehículo adelantante. En la Figura 3-3 se muestran las etapas de la maniobra que describieron Carlson et al. (2006). Los tiempos de ocupación del carril izquierdo crecían ligeramente al aumentar la velocidad del vehículo adelantado, mientras que la velocidad relativa del adelantante decrecía. En este estudio se detectó que la velocidad del vehículo adelantante era máxima cerca de la posición en la que se sitúa en paralelo, con respecto al vehículo adelantado y que disminuía una vez rebasado el vehículo adelantado.

3.1.4. Harwood et al. (2008)

Este estudio formó parte de un proyecto de investigación sobre distancias de visibilidad de adelantamiento (Harwood et al, 2008; Harwood et al, 2010). En él se repasaron los modelos y normativas existentes hasta la fecha y se realizó un estudio de campo con los siguientes objetivos:

- Determinar los parámetros que describen la maniobra de adelantamiento.
- Estudiar las zonas de adelantamiento cortas (120 a 240 m de longitud) y de qué manera contribuyen o no a mejorar la funcionalidad de la carretera.

3.1.4.1. Localización

Los datos fueron tomados en 7 tramos en Missouri y 8 en Pennsylvania (EEUU). El total de los tramos estudiados contó con 28 zonas de adelantamiento. De ellas, 9 se consideraron, por los autores, zonas cortas, de entre 120 y 240 m y las otras 19, como zonas largas de adelantamiento de más de 300 m de longitud. El estudio se realizó en 2005.

Las intensidades de tráfico registradas oscilaron entre 36 y 476 veh/h por sentido, con una mayor frecuencia para las que se sitúan entre 100 y 250 veh/h por sentido, que eran las que, según los investigadores, proporcionaban una mayor frecuencia de adelantamientos.

En cuanto a los límites de velocidad en los tramos, en los de Missouri se situaba en 60 mph (97km/h) y en los de Pennsylvania, en 55 mph (89 km/h). Las velocidades medias oscilaron entre 55 y 60 mph y el percentil 85 de la velocidad de operación entre 60 y 65 mph.

3.1.4.2. Metodología

La tecnología empleada para este estudio se basó en la grabación y tratamiento de videos unida al empleo de detectores de tráfico.

En cada zona de adelantamiento se colocaron dos detectores de tráfico para cada sentido a estudiar. Uno de ellos antes del comienzo de la zona de adelantamiento y el segundo en el punto medio de la misma.

Por medio de los detectores neumáticos se obtuvo, para cada vehículo, los siguientes parámetros: tiempo de paso del vehículo, separación con el vehículo anterior, velocidad, número de ejes y espacio entre ejes.

Además, se instaló una única cámara de video sobre un mástil alto, para observar toda la zona de adelantamiento. El sistema empleado, montado sobre un vehículo, fue el llamado Portable Overhead Surveillance Trailer (POST), de la University of Missouri–Columbia (UMC).

En la Figura 3-4, la Figura 3-5 y la Figura 3-6 se muestra el esquema del emplazamiento del equipo y dos imágenes tomadas en una localización concreta.

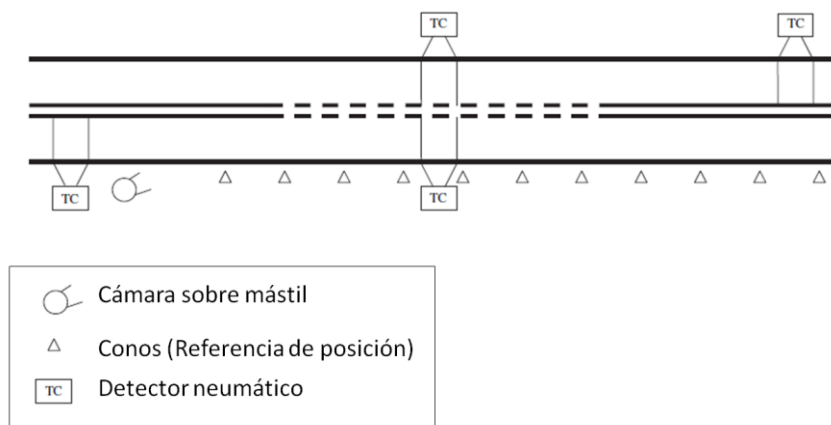


Figura 3-4. Equipamiento instalado en las localizaciones del estudio de campo de Harwood et al. (2008)



Figura 3-5. Captura de la cámara de video, Harwood et al. (2008)



Figura 3-6. Equipamiento instalado, Harwood et al. (2008)

El equipo de grabación se colocó en el lateral de la calzada, fuera del arcén, y en el punto desde el que se obtenía una mejor visión de la zona de adelantamiento.

A continuación se colocaron conos a lo largo de la zona grabada, con una separación constante y conocida. Los conos se emplearon para poder determinar las distancias de los vehículos a lo largo de la calzada. Se grababa inicialmente un video con los conos en el lateral de la calzada con el fin de calibrar el sistema de video, pero posteriormente se retiraban, para que el estudio no interfiera en el comportamiento de los conductores. El análisis de las grabaciones se realizó por medio del software AutoScope, sistema de procesamiento de imagen empleado para obtener datos de tráfico.

No obstante, los autores no demostraron si la presencia del mástil afectaba o no al comportamiento habitual de los conductores.

3.1.4.3. Resultados

Se analizaron 187 horas de grabaciones. En todos los tramos se agregaron las características del tráfico a intervalos de 15 min. En el caso de zonas cortas, se obtuvo una frecuencia media de 1

adelantamiento por hora, mientras que en las zonas largas, la media se elevó hasta 6 adelantamientos.

Para cada adelantamiento, se han tomado datos en los siguientes puntos (representados en la Figura 3-7)

- Instante A: 4 segundos antes del inicio de la maniobra, definido por el punto B.
- Instante B: Momento en el que el vehículo adelantante empieza a invadir el carril contrario.
- Instante C: Momento en el que los vehículos adelantado y adelantante se encuentran aproximadamente en paralelo.
- Instante D: Momento en el que el vehículo adelantante regresa totalmente al carril propio.

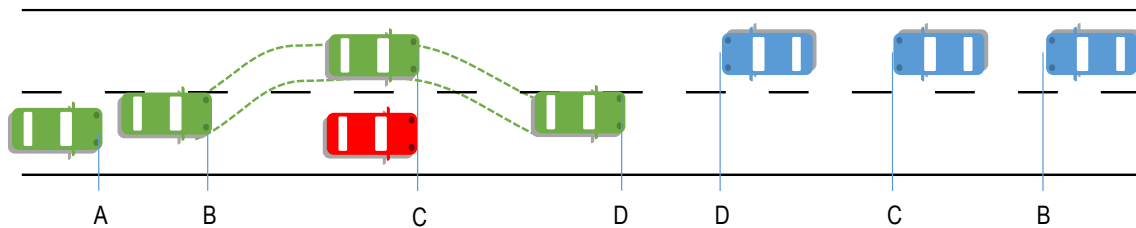


Figura 3-7. Esquema y fases de la maniobra de adelantamiento según Harwood et al (2008)

A partir del video, teniendo en cuenta las referencias determinadas mediante la instalación de conos, se obtuvieron las distancias recorridas en cada punto. Las velocidades instantáneas en estos puntos, se obtuvieron a partir de las distancias recorridas en el intervalo de 2 s centrado en el punto.

A lo largo del estudio, se detectaron algunos problemas: en algunas ocasiones no fue posible grabar la maniobra completa, en otros casos la curvatura de la carretera no permitió una medición exacta de las distancias.

Un estudio completo de las evoluciones de los vehículos, como el descrito, se llevó a cabo tan solo en 60 maniobras de adelantamiento en Missouri, en zonas de adelantamiento largas. En estos casos se midieron las distancias, tiempos y velocidades en toda la trayectoria adelantante.

Los datos de este estudio de campo, para su posterior análisis, fueron combinados con los de 105 adelantamientos del anterior estudio de campo de Carlson et al. (2006), realizado por el Texas Transportation Institute. En profundidad se analizaron, por tanto, 165 adelantamientos.

Se estudiaron con detalle las siguientes variables, para su comparación con el modelo vigente de la AASHTO de distancia de visibilidad de adelantamiento:

- Velocidad del vehículo adelantante en la posición en la que ambos están en paralelo.
- Velocidad del vehículo adelantado en la posición en la que ambos están en paralelo.
- Diferencia de velocidades entre ambos vehículos, y su posible correlación con las dos anteriores velocidades.
- Tiempo de recorrido por el carril contrario, y su relación con la velocidad de ambos vehículos en la posición en la que están en paralelo.
- Distancia recorrida por el carril izquierdo, y su relación con las velocidades.
- Localización de la posición en que ambos vehículos están en paralelo, dentro de la distancia de adelantamiento.

- Intervalo de tiempo entre el vehículo adelantante y el opuesto, en el momento de completar el adelantamiento.

La Tabla 3-4 y la Tabla 3-5 resumen los resultados del estudio.

Variable	Harwood et al.	Carlson et al.	Combinación	
	Media	Media	Media	Rango
Número de maniobras analizadas	60	105	165	
Velocidad del vehículo adelantante en la posición en paralelo (km/h)	106	114	110	75 a 156
Velocidad del vehículo adelantado en la posición en paralelo (km/h)	82	94	89	52 a 112
Diferencia de velocidades en la posición en paralelo (km/h)	24	20	21	1 a 53
Tiempo de recorrido por el carril contrario (s)	10,0	9,8	9,9	5,0 a 19,0
Distancia recorrida por el carril contrario (m)	308	341	329	134 a 583

Tabla 3-4. Valores de las variables estudiadas por Harwood et al. (2008)

Velocidad del vehículo adelantante (km/h)	Tiempo recorrido en carril contrario (s) (percentil 85)	Distancia recorrida en carril contrario (m) (percentil 85)
70	9,9	192,5
80	9,9	220,0
90	9,9	247,5
100	9,9	275,0
110	9,9	302,5
120	9,9	330,0

Tabla 3-5. Distancia recorrida por el vehículo adelantante, Harwood et al. (2008)

Más allá del estudio en profundidad de esos 60 adelantamientos, se realizó un análisis global del total de maniobras detectadas, ascendiendo en este caso a 367 maniobras. En este caso el análisis se redujo a la frecuencia y características generales de la maniobra, y no a la trayectoria del vehículo adelantante. Sólo se observaron 7 maniobras de adelantamiento desistidas.

Tal como se ha comentado, se definieron las zonas de adelantamiento cortas, como aquellas cuya longitud estaba entre 120 y 240 m. Se estudió la frecuencia de adelantamientos en estas zonas, comparándola con la de zonas largas. Además, en el caso de las zonas cortas se detectó que era frecuente que no se respetasen las prohibiciones de adelantamiento para acabar la maniobra.

Con todo ello, este estudio planteó una evaluación y revisión de los criterios de distancia de adelantamiento vigentes. Se propone al final del mismo un modelo, calibrado a partir de los datos de este estudio de campo, que se desarrollará más adelante.

3.1.5. Hegeman (2008)

Hegeman (2008) realizó un estudio de campo empleando un vehículo instrumentalizado, en el marco de una investigación destinada a estudiar la utilidad y el efecto de los sistemas de ayuda o asistencia a la conducción aplicados a la maniobra de adelantamiento.

El estudio de campo pretendía caracterizar las maniobras de adelantamiento y calibrar el sistema de asistencia al conductor, basándose, principalmente, en la definición de umbrales de hueco aceptado en el tráfico en sentido contrario.

3.1.5.1. Localización

Mediante un vehículo instrumentalizado, se realizó una sesión de grabaciones en un tramo de la carretera N305, en Holanda, cuya IMD es de 12000 vehículos (siendo las intensidades horarias direccionales cercanas a 500 veh/h). Se trataba de una carretera principalmente recta y sin obstáculos o intersecciones. Se conocía, sin embargo, la existencia de problemas de siniestralidad en el segmento considerado. La velocidad máxima permitida era de 100 km/h en todo el tramo. La grabación se realizó entre las 11:00 y las 16:00 de un único día, en condiciones meteorológicas variables.

3.1.5.2. Metodología

Para el estudio de maniobras de adelantamiento se utilizó un vehículo instrumentalizado equipado con dos cámaras de video, una de ellas en la parte delantera y otra en la parte posterior. Según el autor, las cámaras permitieron la grabación de videos con resolución adecuada hasta una distancia de 100 m. Además, el vehículo disponía de un receptor GPS, que proporcionaba la posición y la velocidad instantánea.

El vehículo recorrió la carretera a velocidades previamente establecidas, de 70, 80 y 90 km/h, entre 10 y 30 km/h por debajo del límite de velocidad. La realización del experimento permitió obtener el valor de las siguientes variables o parámetros:

- Tipo de adelantamiento: lanzado, con seguimiento, múltiple, etc.
- Velocidad de los vehículos implicados.
- Hueco aceptado en el tráfico opuesto.
- Tiempo de percepción y reacción, definido como el tiempo desde el cruce con el anterior vehículo opuesto y el inicio de la maniobra.
- Duración de la maniobra.
- Huecos entre vehículo adelantado y adelantante, al iniciar y al finalizar la maniobra.
- Time to Collision, definido aquí, como el tiempo existente entre el final de la maniobra, o momento en el que se completa el regreso al carril derecho, y el cruce con el vehículo opuesto.

La obtención de medidas de distancia a partir del video se realizó basándose en la proporción de dimensiones de la carretera y los vehículos respecto de las matrículas de los mismos, cuyo ancho y alto son conocidos.

3.1.5.3. Resultados

En total se registraron 48 maniobras de adelantamiento, siempre a las velocidades de 70, 80 y 90 km/h. El análisis de los datos ha proporcionado al autor los siguientes resultados:

- El tiempo de percepción y reacción, definido como el tiempo desde que se inicia y un hueco y el tiempo desde el que se adelanta, se situó entre 0 y 0,5 s, siendo en la mayoría de los casos inferior a 1 s.
- El hueco medio entre el vehículo adelantado y el adelantante al inicio de la maniobra fue de 17,8 m, siendo significativamente mayor en el caso de maniobras lanzadas.
- La duración media del recorrido sobre el carril opuesto (desde el inicio de la invasión hasta la finalización completa del regreso) fue de 7,8 s, siendo los tiempos menores para

el caso de maniobras lanzadas (medias de 6,8 frente a 7,9 s). No se observaron diferencias significativas en función de la velocidad del vehículo adelantado.

- Las fases de la maniobra se caracterizaron como se indica en la Tabla 3-6. En la Tabla 3-6 “ml” representa el cambio al carril izquierdo, “passing” la maniobra de rebase en el carril izquierdo, “pass-mr”, el inicio del regreso al carril derecho y “mr” el regreso al carril derecho. “Flying” corresponde a un adelantamiento lanzado y “accelerative” a uno partiendo del seguimiento (“piggybacking” representa un caso particular de maniobra, en la que el adelantante sigue a otro adelantante anterior que ya ha empezado a ejecutar la maniobra) (Ver Figura 3-8).

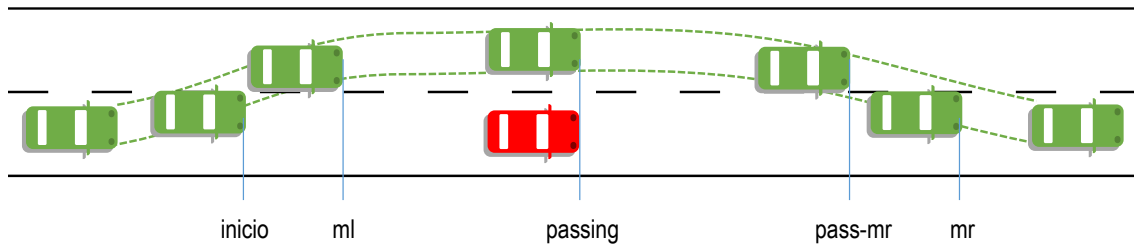


Figura 3-8. Instantes de la maniobra según Hegeman (2008)

Fase	Tiempo hasta la posición señalada (s)		
	Maniobras en seguimiento	Maniobras lanzada	Maniobras seguidas (piggybacking)
ml	1,8	1,8	1,8
passing	4,7	4,7	5,5
pass mr	4,0	4,0	6,0
mr	8,0	8,0	8,0

Tabla 3-6. Tiempos de ocupación del carril izquierdo, por fases, según Hegeman (2008)

Otros resultados obtenidos fueron:

- El hueco medio entre el vehículo adelantante y el adelantado, al finalizar la maniobra, fue de 32,5 m.
- Las medidas de TTC mostraron que en el 10 % de los casos el tiempo desde el final del adelantamiento hasta que el vehículo adelantante se cruza con el vehículo opuesto es inferior a 3 s, siendo el valor mínimo registrado de 1,2 s.

3.1.6. Otros estudios recientes

En este apartado se incluye un estudio de menor escala, realizado en los últimos años. Todavía se encuentran en fase de análisis, y no se han presentado las conclusiones finales.

Recientemente, Ghods y Saccomanno (2014) han realizado grabaciones en video para caracterizar el comportamiento de los conductores adelantantes en única zona de aproximadamente 1 km de longitud, en Italia. Se trata de una zona de adelantamiento recta. A partir de 171 observaciones de huecos aceptados y rechazados, tomadas por 97 conductores, han calibrado un modelo de aceptación de huecos, que se explicará en la sección 3.2.2.5.

3.2. Modelización

Una vez revisados los estudios experimentales más relevantes, en este apartado se analizan los modelos de maniobras de adelantamiento formulados con anterioridad. Un modelo científico

es, de forma general, una representación abstracta (matemática, visual o conceptual) de un fenómeno real observado. Los modelos matemáticos son un caso particular de ellos, en los que la representación del fenómeno se explica mediante relaciones matemáticas, que definen las ecuaciones o fórmulas del modelo.

Todo modelo supone una representación simplificada del fenómeno real, cuya explicación exacta se desconoce o es inaplicable. La simplificación que introducen los modelos se apoya en una serie de hipótesis o supuestos.

En primer lugar se revisarán los modelos de distancia de visibilidad de adelantamiento basados en la descripción de la maniobra, para posteriormente considerar los modelos basados en las decisiones de adelantar.

3.2.1. Distancia de visibilidad

Los modelos teóricos de distancia de visibilidad de adelantamiento son distintas formulaciones o descripciones de la maniobra de adelantamiento, que la explican mediante representaciones matemáticas de la misma. Su objetivo es proporcionar un valor o una ecuación para el cálculo de la citada distancia (o de otros parámetros adicionales) en función de distintas variables de entrada, que caracterizan a los distintos factores que anteriormente se han comentado.

La complejidad de la maniobra radica en la gran cantidad de factores que influyen en ella, y en el carácter aleatorio de muchos de ellos. Destacan especialmente los que se refieren a los conductores, como son los distintos tiempos de percepción y reacción, o las distintas actitudes al volante, por la gran dificultad (incluso imposibilidad) que tienen para ser medidos. Por este motivo se introducen distintas hipótesis de partida en los modelos.

El objeto final de los modelos es proporcionar valores fiables de distancias de visibilidad de adelantamiento necesarias, de manera que puedan aplicarse posteriormente para diseñar o explotar las carreteras, previa incorporación en manuales o normativas, tras un necesario proceso de validación.

Desde aproximadamente la mitad del siglo pasado se ha formulado una gran cantidad y variedad de modelos de distancia de adelantamiento, que irán desarrollándose a continuación.

3.2.1.1. Tipos de modelos teóricos

La gran variedad de modelos de distancia de visibilidad de adelantamiento permite plantear una clasificación de los mismos. Los modelos matemáticos, en general y en el caso particular de la distancia de visibilidad de adelantamiento, se pueden clasificar en modelos deterministas y modelos probabilistas.

Los modelos deterministas plantean un resultado puntual y conocido. Además, las variables que alimentan estos modelos son también conocidas y determinadas. En el caso de las distancias de visibilidad de adelantamiento, los modelos proporcionan valores que, bajo los supuestos e hipótesis planteadas, son ciertos. Para llegar a estos resultados se ha partido también de unos datos de entrada que se suponen perfectamente determinados, partiendo de, por ejemplo, los valores medios que estos toman en la realidad.

El carácter aleatorio de la realidad de muchas variables hace que se planteen los modelos estocásticos o probabilistas. Los modelos probabilistas proporcionan resultados asociados a un determinado nivel de probabilidad. Además, están alimentados por variables caracterizadas por sus distribuciones estadísticas, si de esta forma se presentan en la realidad. El resultado obtenido no es único ni totalmente cierto, sino que lleva siempre asociado un nivel de probabilidad.

Puesto que en la realidad las variables de entrada y los resultados presentan cierta variabilidad, los modelos probabilistas pueden explicar mejor los fenómenos. Sin embargo, su formulación y desarrollo es más complejo, resultando por lo tanto, más difíciles de interpretar y de aplicar.

Para el caso de la maniobra de adelantamiento, se han formulado modelos tanto deterministas como probabilistas. Las variables de entrada de los modelos son los factores más significativos que influyen en el adelantamiento. Los factores o variables incluidos en cada modelo pueden variar, si bien siempre se incluyen los más significativos, destacando, por encima de todos ellos la velocidad. El resultado o salida del modelo es, normalmente, la distancia de visibilidad de adelantamiento en función, por lo tanto, de la velocidad de alguno de los vehículos implicados, la de diseño o la de operación de la vía.

Por otra parte, existe otro criterio para clasificar los modelos, según el cual se distingue entre modelos empíricos y modelos analíticos. Según este criterio, se hablará de modelos empíricos, o basados en datos reales, o modelos analíticos, basados en ecuaciones del movimiento. Los primeros pueden proporcionar resultados más fiables, pero para ello es preciso que los datos se hayan tomado, tratado y analizado de forma adecuada. Los modelos analíticos, aunque utilicen parámetros basados también en datos medidos, como las aceleraciones o longitudes de vehículos, establecen relaciones entre los mismos por medio de las ecuaciones del movimiento. Cuentan, por lo tanto, con un gran número de suposiciones y simplificaciones.

3.2.1.2. Concepto de posición crítica

Muchos de los modelos de distancia de adelantamiento se basan en el concepto de la “posición crítica”. Algunos autores coinciden en llamarla “posición crítica” aunque otros la denominan “punto de no retorno” o “situación de decisión”.

De forma general, la posición crítica se define como el punto (en espacio y tiempo) del recorrido del vehículo adelantante, a partir del cual es mejor completar la maniobra de adelantamiento que abortarla.

No obstante, y al igual que existen diversos términos para referirse a la posición crítica, la forma de determinar dónde y cuándo se produce difiere entre los autores de distintos modelos: igualando tiempos para completar o desistir el adelantamiento, igualando distancias, con los vehículos en paralelo, con la parte delantera del vehículo adelantante en paralelo a la trasera del adelantado, etc.

La definición teórica más aceptada en la actualidad, tal como se desarrolló a continuación, es la de aquél punto en el que se igualan las distancias de visibilidad necesarias para desistir de la maniobra y para completarla. La Figura 3-9 muestra la distancia de visibilidad, de forma esquemática, necesaria para ambos supuestos, a lo largo de la posición donde se sitúa el vehículo adelantante.

Antes de la posición crítica, se requiere menos distancia para desistir del adelantamiento que para completarlo. Por este motivo, si apareciera un vehículo en sentido opuesto sería más seguro y rápido el regreso al carril propio sin llevar a cabo la maniobra. Después de ella, se necesita una distancia inferior para completar el adelantamiento que para desistir.

La posición crítica se define en el punto en que ambas coinciden, y es, por lo tanto, el punto donde la visibilidad necesaria es máxima. Por lo tanto, la posición crítica sería una de las determinantes para un diseño geométrico o una señalización de las carreteras compatible con el adelantamiento.

Los modelos que emplean el concepto de posición crítica pueden tener una formulación distinta que los que no, por lo que las distancias obtenidas no serán directamente comparables sin tener en cuenta esta diferencia. Usar o no este concepto proporciona un criterio de clasificación adicional de los modelos de distancia de adelantamiento.

Normalmente, la diferencia se debe a que los modelos que utilizan este concepto calculan la distancia de visibilidad de adelantamiento necesaria para completar o desistir de la maniobra desde la posición crítica, y no desde el inicio real de la maniobra.

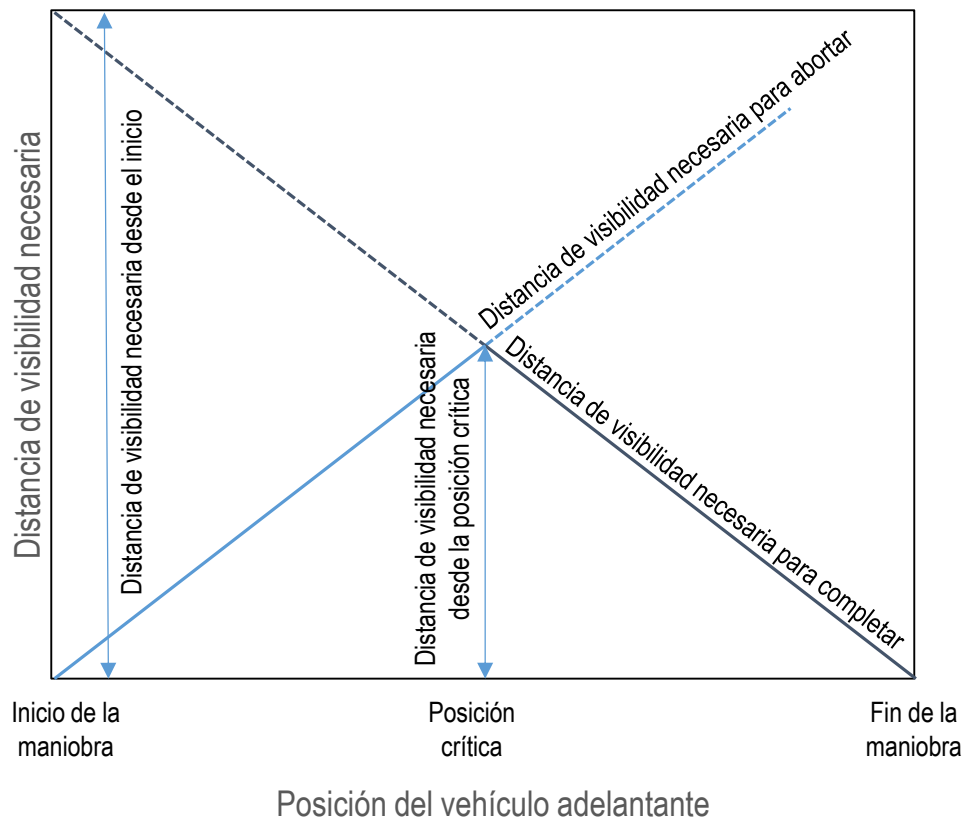


Figura 3-9. Concepto de posición crítica

La fase inicial del adelantamiento, en la que el vehículo adelantante parte de su carril y alcanza la posición crítica, sólo se considera, en algunos modelos, para obtener la longitud mínima de la zona de adelantamiento permitido. Sólo de esta forma se garantiza la posibilidad de llevar a cabo un adelantamiento completo en esta zona.

3.2.1.3. Estudio de modelos existentes

Para estudiar de forma más unificada los distintos modelos que hasta la fecha se han desarrollado, se siguió para todos ellos una metodología común, centrándose en los siguientes aspectos: componentes de la distancia de visibilidad, tipo de maniobra representada, parámetros de entrada y resultados del modelo.

Los modelos emplean un número distinto de parámetros, en función de los cuáles se calculan o estiman las distancias de adelantamiento. Para un estudio lo más uniforme posible, se empleó en todos los casos la siguiente nomenclatura:

- Distancia de visibilidad de adelantamiento: D_{va} .
- Componentes de la distancia de adelantamiento: d_j para $j= 1, 2, \dots$

- Tiempos transcurridos en las distintas fases del adelantamiento: t_j para $j= 1, 2, \dots$
- Velocidad (normalmente máxima) del vehículo adelantante: v_p (del inglés "passing").
- Velocidad (normalmente constante) del vehículo adelantado: v_i (del inglés "impeding").
- Velocidad (normalmente constante) del vehículo opuesto: v_o .
- Velocidad de diseño: v_d .
- Diferencia entre velocidades del vehículo adelantante y adelantado: $\Delta v = v_p - v_i$.
- Percentil "n" de la velocidad: v_n .
- Longitud del vehículo adelantante: l_p .
- Longitud del vehículo adelantado: l_i .
- Tiempo de percepción y reacción para iniciar la maniobra: p_i .
- Tiempo de percepción y reacción para desistir de la maniobra: p_a (del inglés "abort") .
- Intervalo de tiempo o espacio vacío entre vehículos: h .
- Espaciamiento entre vehículos: e .
- Distancia de seguridad entre vehículos: d .
- Aceleración del vehículo adelantante en el inicio de la maniobra: a .
- Deceleración del vehículo adelantante en caso de desistir la maniobra: d_a .
- Posición relativa de los vehículos en el momento de la situación crítica: Δc .

3.2.1.3.1. Modelos deterministas

Van Valkenberg y Michael (1971)

Modelo de tipo determinista que empleó por primera vez el concepto de posición crítica. El modelo es empírico, cuantificando todas las componentes de la distancia de visibilidad a partir de observaciones.

Definición de distancia de adelantamiento y fases: partiendo desde la posición crítica, se compone de:

- d_1 recorrida por el vehículo adelantante desde la posición crítica hasta regresar al carril propio.
- d_2 recorrida por el vehículo opuesto en el tiempo en que el adelantante recorre d_1 .
- $d_3 = d_{p-o}$ de seguridad, entre el vehículo adelantante y el opuesto al completar el adelantamiento.

Tipo de adelantamiento y modo de iniciación: utiliza 4 tipos de maniobra:

- lanzado y con regreso al carril propio de forma voluntaria.
- lanzado y con regreso al carril propio de forma forzada.
- con seguimiento del adelantado y con regreso al carril propio de forma voluntaria.
- con seguimiento del adelantado y con regreso al carril propio de forma forzada.

Se define el regreso libre como aquella situación en la que el vehículo adelantante regresa al carril propio sin estar afectado por el vehículo opuesto. En caso de que sí exista tal afección se habla de regreso forzado.

Parámetros y suposiciones del modelo:

- Velocidades de los vehículos:
 - Adelantado: v_i .
 - Adelantante: $v_p = v_i + \Delta v$ (siendo Δv constante e igual a 16 km/h).
 - Opuesto: $v_o = v_i + 11,2$ km/h.
- d_3 toma un valor de 6,1 m.

- Δc : la posición crítica se encuentra con la parte delantera del vehículo adelantante en paralelo a la mitad del vehículo adelantado. No se justifica porqué se sitúa en este punto.

Formulación: la distancia de visibilidad de adelantamiento se obtiene sumando las tres componentes (Ecuación 3-1).

$$D_{va} = d_1 + d_2 + d_3$$

Ecuación 3-1

donde:

- d_1 se obtiene a partir de los datos del estudio de campo.
- d_2 se calcula como la distancia que recorre un vehículo opuesto durante el tiempo t_1 en que el adelantante recorre d_1 , a la velocidad v_o .

Resultados:

Velocidad del adelantante (km/h)	50	60	70	80	90	100	110
D_{va} (con seguimiento y con regreso voluntario) (m)	-	-	-	355	415	480	540
D_{va} (con seguimiento y con regreso forzoso) (m)	-	-	-	250	300	350	400

Tabla 3-7. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Van Valkenberg y Michael (1971)

Weaver y Glennon (1972)

Modelo de tipo determinista y basado en el concepto de posición crítica. Basado en datos experimentales, se plantea como alternativa al modelo de la AASHTO, vigente en la normativa americana, y cuyas últimas revisiones se desarrollarán en esta sección, más adelante.

Definición de distancia de adelantamiento y fases: se definen dos distancias distintas:

D_{va} necesaria para iniciar un adelantamiento, disponible al comienzo de la zona de adelantamiento permitido y D_{va} necesaria para completar un adelantamiento, partiendo desde la posición crítica, y disponible al final de la zona de adelantamiento permitido.

Ambas distancias se obtienen a partir de sus componentes:

- d_1 de percepción, análisis y aceleración inicial por el carril propio, empleando un tiempo t_1 .
- d_2 recorrida por el carril opuesto, empleando un tiempo t_2 .
- $d_3 = d_{p-o}$ de seguridad entre adelantante y opuesto al acabar la maniobra.

Tipo de adelantamiento y modo de iniciación: parte del seguimiento al vehículo adelantado.

Parámetros de entrada y valores propuestos:

- Tiempos t_1 y t_2 , que se obtendrán de datos empíricos.
- Velocidades de los vehículos:
 - Adelantante y opuesto: $v_p = v_o = v_d$.
 - Adelantado: $v_i = v_d - \Delta v$.
 - $\Delta v = 13$ a 19 km/h, decreciente con la velocidad del vehículo adelantado.
- Aceleración del vehículo adelantante: a .
- Δc : la posición crítica se encuentra en aquél punto en que los tiempos necesarios para completar la maniobra y para desistir de ella son iguales. No obstante no se calcula analíticamente y los autores la sitúan en un punto en que los vehículos se encuentran “aproximadamente” en paralelo.

Formulación: Está basada en la formulación del modelo de la AASHO (después llamada AASHTO), expuesto más adelante. Incorpora el concepto de posición crítica.

La primera de las distancias, la necesaria al comienzo de la zona de adelantamiento permitido se calcula según la Ecuación 3-2.

$$D_{va} = d_1 + 2,33 \cdot d_2 + d_3 \quad \text{Ecuación 3-2}$$

La segunda distancia, necesaria para completar la maniobra de adelantamiento se calcula con la Ecuación 3-3.

$$D_{va} = 1,33 \cdot d_2 + d_3 \quad \text{Ecuación 3-3}$$

En ambos casos, las componentes d_1 y d_2 se calculan como indica la Ecuación 3-4 y la Ecuación 3-5.

$$d_1 = t_1 \cdot \left(v - \Delta v + \frac{a \cdot t_1}{2} \right) \quad \text{Ecuación 3-4}$$

$$d_2 = v \cdot t_2 \quad \text{Ecuación 3-5}$$

Y para la distancia de seguridad entre vehículo adelantante y opuesto (d_3) se toma la recomendada por la AASHTO (entre 30 y 90 m, dependiendo de la velocidad).

Resultados:

Velocidad adelantante o v_d (km/h)	50	60	70	80	90	100	110
D_{va} para completar (m)	-	-	-	346	-	474	539

Tabla 3-8. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Weaver y Glennon (1972)

Harwood y Glennon (1976)

Modelo de tipo determinista y basado en el concepto de posición crítica. La formulación es idéntica a la del anterior, excepto por considerar la posibilidad de desistir de la maniobra antes de haber alcanzado la posición crítica. Por ello, elimina de la distancia de visibilidad esta fase inicial del adelantamiento

Definición de distancia de adelantamiento y fases: la necesaria para completar un adelantamiento partiendo desde la posición crítica. Se compone de:

- d_2 recorrida por el carril opuesto, empleando un tiempo t_2 .
- $d_3 = d_{p-o}$ de seguridad entre adelantante y opuesto al acabar la maniobra.
- d_4 : distancia recorrida por el vehículo opuesto en $2/3$ de t_2 .

Tipo de adelantamiento y modo de iniciación: analiza un adelantamiento que parte del seguimiento al vehículo adelantado.

Parámetros de entrada y valores propuestos:

- Velocidades de los vehículos:
 - Adelantante y opuesto: $v_p = v_o = v_d$.
 - Adelantado $v_i = v_d - \Delta v$.
 - $\Delta v = 16$ km/h constante.
- Δc : la posición crítica se encuentra en aquél punto en que se igualan las distancias de visibilidad necesarias para poder completar la maniobra y para poder abortarla. A pesar

de ello no se calcula de forma analítica, simplemente los autores la sitúan a 1/3 del recorrido del vehículo adelantante por el carril destinado al tráfico en sentido opuesto.

Formulación: la formulación de este modelo, así como el resto de parámetros no indicados, es idéntica a la del anterior modelo de Weaver y Glennon, y por tanto, al de la AASHTO. La distancia que ahora aparece como d_4 se calcula directamente como 2/3 de d_2 .

Por lo tanto, la distancia de adelantamiento necesaria para completar el mismo desde la posición crítica se obtiene según la Ecuación 3-6.

$$D_{va} = 0,66 \cdot d_2 + d_3 + d_4 = 1,33 \cdot d_2 + d_3 \quad \text{Ecuación 3-6}$$

Resultados:

Velocidad adelantante o v_d (km/h)	50	60	70	80	90	100	110
D_{va} (m)	201	255	313	377	439	508	580

Tabla 3-9. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Harwood y Glennon (1976)

Lieberman (1982)

Modelo de tipo determinista y con uso de la posición crítica, cuya ubicación exacta se puede calcular. Introduce parámetros que caracterizan individualmente a los vehículos, como su longitud o los intervalos existentes entre los mismos.

Definición de distancia de adelantamiento y fases: la necesaria para realizar la maniobra de adelantamiento completa. Se compone de:

- d_1 , distancia hasta alcanzar la posición crítica
- d_2 , distancia para completar la maniobra, desde la posición crítica.

Tipo de adelantamiento y modo de iniciación: parte del seguimiento del vehículo adelantado

Parámetros de entrada y valores propuestos:

- Velocidades de los vehículos:
 - Adelantado: $v_i = v_d \text{ O } v_{85}$.
 - Adelantante: $v_p = v_i + \Delta v$.
 - $\Delta v = 16$ km/h constante.
 - V_{max} del vehículo adelantante, cuando su aceleración tiende a 0.
 - Opuesto $v_o = v_i$, si bien no se incluye de forma explícita.
- t_1 hasta alcanzar la posición crítica.
- $e_{p-i,1}$ espaciamiento entre vehículo adelantante y adelantado al iniciar la maniobra.
- $e_{p-i,2}$ espaciamiento entre vehículo adelantante y adelantado al desistir de la maniobra.
- d_{p-o} de seguridad entre adelantante y adelantado al completar la maniobra.
- Δc : la posición crítica se encuentra en aquél punto en que se igualan las distancias de visibilidad necesarias para poder completar la maniobra y para poder abortarla. Se calcula de forma analítica. Si Δc es mayor que 0, el vehículo adelantante en la posición crítica ya ha rebasado al adelantado.

Formulación: Se calcula la distancia para alcanzar la posición crítica y la necesaria para completar la maniobra partiendo desde la posición crítica (Ecuación 3-7).

$$D_{va} = d_1 + d_2 \quad \text{Ecuación 3-7}$$

La distancia necesaria para alcanzar la posición crítica es d_1 .

$$d_1 = e_{p-i,1} + v_i \cdot t_1 + \Delta c$$

Ecuación 3-8

La posición de la situación crítica se calcula analíticamente, de acuerdo con su definición, como indica la Ecuación 3-9.

$$\Delta c = e_{p-i,2} + \Delta v \cdot t_2$$

Ecuación 3-9

Siendo t_2 el tiempo para completar o desistir un adelantamiento (Ecuación 3-10):

$$t_2 = \frac{e_{p-i,2} + \Delta c}{\Delta v} + \frac{\Delta v}{2a}$$

Ecuación 3-10

Y la aceleración (Ecuación 3-11)

$$a = a_{\max} \left(1 - \frac{v_i + \frac{\Delta v}{2}}{v_{\max}} \right)$$

Ecuación 3-11

Con todo ello, la distancia necesaria para completar (o desistir) el adelantamiento se calcula con la Ecuación 3-12.

$$d_2 = (2 \cdot v_i + \Delta v) \cdot t_2 + d_{p-o}$$

Ecuación 3-12

Resultados:

Velocidad de diseño v_d (km/h)	50	60	70	80	90	100	110
D_{va} (regreso voluntario) (m)	277	363	455	557	656	-	-

Tabla 3-10. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Lieberman (1982)

Saito (1984)

Modelo de tipo determinista y con uso de la posición crítica, ubicada en dos posibles puntos alternativos.

Definición de distancia de adelantamiento: la necesaria para realizar la maniobra de adelantamiento desde la posición crítica.

Tipo de adelantamiento y modo de iniciación: no se especifica el modo de iniciación. La distancia de adelantamiento se calcula como la necesaria para completar o desistir de él desde la posición crítica.

Parámetros de entrada y valores propuestos:

- Velocidades de los vehículos:
 - Adelantante y opuesto: $v_p = v_o = v_{85}$.
 - Adelantado $v_i = v_p - \Delta v$, sin proporcionar valores.
- Δc : se definen dos posibles posiciones críticas:
 - “abreast” cuando la parte delantera de ambos vehículos se encuentra en paralelo.
 - “head to tail”, cuando la parte delantera del adelantante coincide con la trasera del adelantado.
- $d_a = 3 \text{ m/s}^2$.

- $d_{p-i(a)}$ de seguridad, en el momento de regresar al carril propio tras desistir del adelantamiento.
- $e_{p-i(a)}$ espacio entre vehículo adelantado y adelantante, al desistir de la maniobra, incluye de forma implícita la longitud del vehículo adelantado.

Formulación: se define el tiempo de deceleración, para cada una de las posibles posiciones críticas (Ecuación 3-13 para la maniobra abortada desde la posición “head to tail” y Ecuación 3-14 para la maniobra abortada desde la posición “abreast”).

$$t_d = \frac{2\Delta v + \sqrt{(2\Delta v)^2 - 8d_a \cdot d_{p-i(a)}}}{2d_a} \quad \text{Ecuación 3-13}$$

$$t_d = \frac{\Delta v + \sqrt{(2\Delta v)^2 - 8 \cdot e_{p-i(a)}}}{2d_a} \quad \text{Ecuación 3-14}$$

Y mediante este parámetro, la distancia necesaria para el adelantamiento, desde la posición crítica, se calcula con la Ecuación 3-15.

$$D_{va} = V_{85} \cdot t_d + d_{p-o} - \frac{d_a \cdot t_d^2}{2} \quad \text{Ecuación 3-15}$$

Resultados:

Velocidad de diseño v_d (km/h)	50	60	70	80	90	100	110
D_{va} (posición “head to tail”) (m)	146	195	247	302	360	420	-
D_{va} (posición “abreast”) (m)	102	139	178	220	263	308	-

Tabla 3-11. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Saito (1984)

Glennon (1988)

Modelo determinista que utiliza el concepto de posición crítica.

Definición de distancia de adelantamiento y fases: distancia necesaria para completar la maniobra desde la posición crítica. La fase inicial de aceleración no se considera en la distancia de visibilidad de adelantamiento.

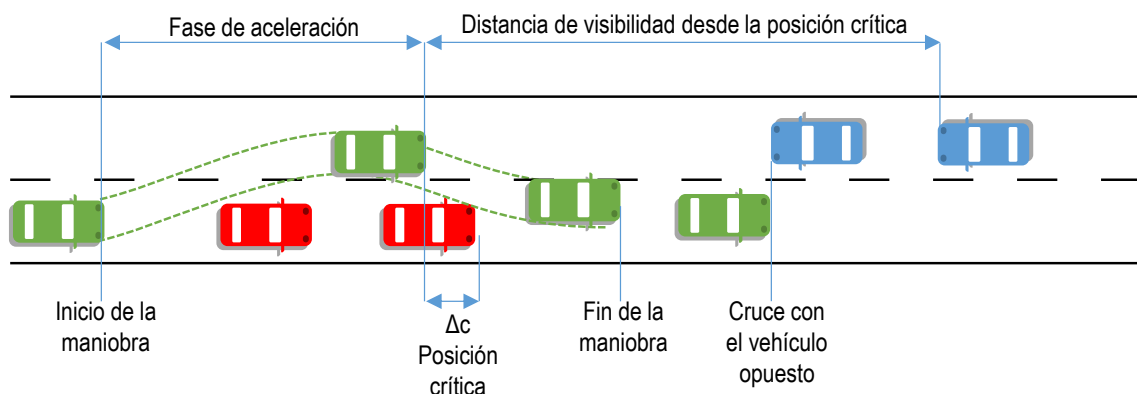


Figura 3-10. Esquema de la maniobra y definición de variables en los modelos de Glennon (1988), Harwood y Glennon (1989) y Hassan (1996)

Tipo de adelantamiento y modo de iniciación: parte del seguimiento del vehículo adelantado, y se describen el adelantamiento completado y el desistido.

Parámetros y suposiciones del modelo:

- Velocidades de los vehículos:
 - Adelantante $v_p = v_d$, constante si se completa la maniobra; si se desiste, decelera uniformemente.
 - Adelantado: $v_i = v_p - \Delta v$, constante.
 - Δv decrece con v_p , y se sitúa entre 13 y 19 km/h.
 - Opuesto $v_o = v_d$, constante.
- Δc : la posición crítica se encuentra en aquél punto en que se igualan las distancias de visibilidad necesarias para poder completar la maniobra y para poder abortarla. Se calcula de forma analítica.
- Deceleración $d_a = 2,4 \text{ m/s}^2$ constante.
- Longitud de los vehículos $l_p = 4,9 \text{ m}$, $l_i = 4,9 \text{ m}$ y $l_o = 33,5 \text{ m}$ (vehículo ligero y pesado).
- Tiempo de percepción antes de desistir de la maniobra $p_a = 1 \text{ s}$.
- Distancias de seguridad $h_{p-i} = \Delta v$, resultado de considerar un hueco de 1 s, tanto al desistir como al completar la maniobra.
- Distancia de seguridad $d_{p-o} = 2 \cdot v$, resultado de considerar t_{p-o} igual a 1 s.

Formulación: la formulación del modelo se obtiene a partir de las ecuaciones del movimiento para el caso de maniobra completada y desistida:

- Para la maniobra completada se asume un movimiento uniforme a la velocidad v_p desde la posición crítica, donde ya se ha alcanzado, hasta rebasar completamente al adelantado y regresar al carril propio.
- Para la maniobra desistida, se supone un tiempo de percepción, y posteriormente un movimiento uniformemente decelerado, hasta situarse detrás del vehículo que se pretendía adelantar, guardando una distancia de seguridad determinada.

De esta forma, se igualan ambas distancias, pues en la posición crítica son por su definición idénticas, y se obtiene la posición relativa de la situación crítica y la distancia necesaria para completar o desistir del adelantamiento desde ella.

La posición crítica se sitúa en el punto determinado por la Ecuación 3-16.

$$\Delta c = l_p + \Delta v \cdot \left[\frac{2 \cdot \Delta v + l_i + l_p}{2 \cdot v - \Delta v} - \sqrt{\frac{4 \cdot v \cdot (2 \cdot \Delta v + l_i + l_p)}{d_a \cdot (2 \cdot v - \Delta v)}} \right] \quad \text{Ecuación 3-16}$$

donde $v = v_p = v_d$

Y, una vez conocida, es posible calcular la distancia de visibilidad de adelantamiento (Ecuación 3-17).

$$D_{va} = 2 \cdot v \cdot \left(2 + \frac{l_p - \Delta c}{\Delta v} \right) \quad \text{Ecuación 3-17}$$

Resultados:

Velocidad adelantante o v_d (km/h)	50	60	70	80	90	100	110
Δv (km/h)	19	18	17	16	15	14	13
D_{va} (vehículo ligero) (m)	159	190	222	253	283	312	341
D_{va} (vehículo pesado) (m)	192	239	285	330	374	418	462

Tabla 3-12. Distancias de adelantamiento según Glennon (1989)

Harwood y Glennon (1989)

Formulación idéntica a la de Glennon (1988). El campo de aplicación se extiende a vehículos pesados.

Parámetros y suposiciones del modelo: Los que no fueron considerados en Glennon (1988):

- Velocidades de los vehículos.
 - Δv decrece con v_p , y se sitúa entre 13 y 19 km/h para vehículos adelantantes ligeros; para pesados, se toman menores diferencias
- Deceleración $d_a = 2,4 \text{ m/s}^2$ para vehículos ligeros, inferior para pesados.
- Longitud de los vehículos $l_p = 4,9 \text{ m}$ y $l_p = 22,9 \text{ m}$, $l_i = 4,9 \text{ m}$ y $l_i = 22,9 \text{ m}$ (vehículos ligero y pesado)

Resultados:

Velocidad adelantante o v_d (km/h)	50	60	70	80	90	100	110
D_{va} (ligero a ligero) (m)	161	194	227	260	291	322	352
D_{va} (ligero a pesado) (m)	184	226	268	309	350	390	429
D_{va} (pesado a ligero) (m)	204	251	297	342	388	434	479
D_{va} (pesado a pesado) (m)	233	289	344	400	455	510	564

Tabla 3-13. Distancias de adelantamiento según Harwood y Glennon (1989)

Rilett at al. (1990)

Modelo de tipo determinista y con uso de la posición crítica.

Definición de distancia de adelantamiento y fases: distancia necesaria para completar la maniobra desde el inicio de la maniobra.

Tipo de adelantamiento y modo de iniciación: parte del seguimiento del vehículo adelantado.

Parámetros de entrada y valores propuestos:

- Velocidades de los vehículos
 - Adelantante y opuesto: $v_p = v_o = v_d$, si bien el adelantante parte de v_i .
 - Adelantado $v_i = v_p - \Delta v$.
 - $\Delta v = 16 \text{ km/h}$ constante.
 - v_{min} : es la velocidad mínima hasta la que el vehículo adelantante decelerará en caso de desistir de la maniobra. Se define como $v_d - 2 \cdot \Delta v$.
 - v_{crit} : velocidad del adelantante en la posición crítica.
- t_1 desde inicio hasta posición crítica.
- t_2 desde posición crítica hasta completar la maniobra.
- t_3 de deceleración hasta alcanzar la v_{min} , en caso de desistir del adelantamiento.
- t_4 durante el cual se circula a la v_{min} hasta regresar al carril propio, en caso de desistir del adelantamiento.

- Δc : la posición crítica se encuentra en aquél punto en que se igualan las distancias de visibilidad necesarias para poder completar la maniobra y para poder abortarla. Se calcula de forma analítica.
- Longitudes de los vehículos $l_p = 4,9\text{m}$, $l_i = 4,9\text{ m}$ y vehículos pesados de 20 m.
- Distancia de seguridad $h_{p-i} = v_d - \Delta v$, resultado de considerar un hueco de 1 s, tanto al completar como al desistir del adelantamiento.

Formulación: se definen, por separado, las distancias de visibilidad necesarias para completar o desistir de una maniobra de adelantamiento (Ecuación 3-18 para completar la maniobra, desde el inicio de la misma y Ecuación 3-19 para desistir de la maniobra, desde la posición crítica).

$$D_{va} = v_{crit} \cdot t_1 + \frac{a \cdot t_1^2}{2} + v_d \cdot t_2 + d_{p-o} + v_d \cdot (t_1 + t_2) \quad \text{Ecuación 3-18}$$

$$D_{va} = v_{crit} \cdot p_a + v_{crit} \cdot t_3 - \frac{d \cdot t_3^2}{2} + v_{min} \cdot t_4 + d_{p-o} + v_d \cdot (p_a + t_3 + t_4) \quad \text{Ecuación 3-19}$$

Resultados:

Velocidad adelantante o v_d (km/h)	50	60	70	80	90	100	110
D_{va} completa (ligero a ligero) (m)	-	247	339	432	546	656	-
D_{va} completa (ligero a pesado) (m)	-	349	448	547	655	758	-

Tabla 3-14. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Rilett et al (1990)

Rocci (1993)

Modelo de tipo determinista y utiliza el concepto de la posición crítica (llamada aquí “situación de decisión”).

Definición de distancia de adelantamiento y fases: la necesaria para realizar la maniobra de adelantamiento completa. Se distinguen las siguientes fases:

- d_1 recorrida hasta la situación de decisión.
- d_2 recorrida desde la situación de decisión hasta regresar al carril propio, en caso de completar el adelantamiento y d_{2a} , en caso de desistir de la maniobra.
- d_3 recorrida por el vehículo contrario mientras se efectúa el adelantamiento.

Tipo de adelantamiento y modo de iniciación: se contemplan los siguientes 4 casos:

- adelantamiento lanzado completado.
- adelantamiento lanzado desistido.
- adelantamiento partiendo del seguimiento del vehículo adelantado y completado.
- adelantamiento partiendo del seguimiento del vehículo adelantado y desistido.

Parámetros de entrada y valores propuestos:

- Velocidades de los vehículos:
 - Adelantado: $v_i = v_{50}$.
 - Adelantante: v_p parte de la v_{50} en maniobras que parten del seguimiento y de la v_{85} en maniobras lanzadas. Va evolucionando a lo largo de la maniobra hasta v_f .
 - Opuesto $v_o = v_{99}$ hasta 3 segundos después de la situación crítica, momento en el que comienza a decelerar.

- Δc : la posición crítica se encuentra en aquél punto en el que en caso de desistir de la maniobra, la parte delantera del vehículo adelantante llegara a ponerse en paralelo con la trasera del vehículo adelantado.
- Aceleración a : se asume un percentil 85 de la aceleración, con lo que $a = 0,53 \text{ m/s}^2$ (1,9 km/h/s).
- Deceleración $d_a = 3,9 \text{ m/s}^2$ (14 km/h/s).
- Longitud de los vehículos $l_i = 10 \text{ m}$ y $l_p = 5 \text{ m}$, representando un vehículo pesado y uno ligero.
- Tiempo de percepción para iniciar el adelantamiento de 3 s.
- Distancias de seguridad entre adelantado y adelantante $d_{p-i} = 6 \text{ m}$, tanto al iniciar como al acabar la maniobra.

Formulación: la formulación del modelo se va desarrollando para cada una de las fases en que se descompone la maniobra de adelantamiento (en todas las expresiones se emplean velocidades en km/h, siendo obtenidos los tiempos en segundos y las distancias en metros; el resto de variables ya están sustituidas)

Fase inicial: desde el inicio de la maniobra hasta la situación de decisión

En adelantamientos lanzados, el vehículo adelantante parte de la v_{85} . No existe la distancia d_1 , únicamente la posición de la situación de decisión, de acuerdo a la Ecuación 3-20.

$$\Delta c = \frac{(v_{85} - v_{50})^2}{101} \quad \text{Ecuación 3-20}$$

En maniobras que parten del seguimiento, se parte de la velocidad del vehículo adelantado, es decir, v_{50} , y se acelera hasta la velocidad v_1 , en la situación de decisión, de manera, que si se decelera en este momento, la parte delantera del vehículo alcanzaría la trasera del adelantado, cada uno en su carril (Ecuación 3-21, Ecuación 3-22 y Ecuación 3-23).

$$t_1 = 4,47s \quad \text{Ecuación 3-21}$$

$$d_1 = 5,28 + 1,24 v_{50}m \quad \text{Ecuación 3-22}$$

$$\Delta c = 0,72m \quad \text{Ecuación 3-23}$$

Fase final: desde la situación de decisión hasta el retorno al carril propio.

Se distinguen en esta fase, los cuatro casos posibles, para cada uno de los cuales se define un valor distinto de la distancia d_2 .

En las maniobras completadas, el vehículo adelantante acelera hasta una v_2 , en el momento en que regresa al carril propio guardando una distancia de seguridad de 6 m (Ecuación 3-24)

$$v_2 = v_{50} + 1,07 \cdot \sqrt{(v_1 - v_{50})^2 + 253} \quad \text{Ecuación 3-24}$$

Adelantamiento lanzado y completado:

$$t_2 = \frac{v_2 - v_{85}}{6,84} \quad \text{Ecuación 3-25}$$

$$d_2 = 21 + \left(\frac{v_{85}}{10}\right)^2 + \left(\frac{v_{50}}{2,53}\right)^2 - \frac{v_{85} \cdot v_{50}}{6,02} + \frac{v_{50}}{6,42} \sqrt{(v_{85} - v_{50})^2 + 253}m \quad \text{Ecuación 3-26}$$

Adelantamiento con seguimiento y completado: $t_2 = 5,64$ s, constante.

$$d_2 = 21,7 + 1,57 \cdot v_{50} m \quad \text{Ecuación 3-27}$$

Si el adelantamiento es desistido, el vehículo adelantante frena hasta disponer, detrás del adelantado, de la distancia de seguridad de 6 m, momento a partir del cual regresa al carril propio tras él, empleando un tiempo de 2,5 s. La velocidad final alcanzada durante la frenada es v_{2a} (Ecuación 3-28).

$$v_{2a} = v_{50} - 24,6 \quad \text{Ecuación 3-28}$$

Adelantamiento lanzado y desistido:

$$t_{2a} = 4,26 + \frac{v_{85} - v_{50}}{14} \quad \text{Ecuación 3-29}$$

$$d_{2a} = \frac{v_{85}^2 - v_{50}^2}{101} + 1,18 \cdot v_{50} - 23,1 \quad \text{Ecuación 3-30}$$

Adelantamiento con seguimiento y desistido: $t_{2a} = 4,86$ s, constante.

$$d_{2a} = 1,35 \cdot v_{50} + 22,4 \quad \text{Ecuación 3-31}$$

Recorrido del vehículo opuesto:

Se define, igualmente, para cada uno de los cuatro casos de maniobra. El vehículo opuesto empieza a tenerse en cuenta en el momento en que se alcanza la posición crítica.

La velocidad final v_3 que alcanza el vehículo opuesto se calcula como indica la Ecuación 3-32 y la Ecuación 3-33.

$$v_3 = v_{99} - 14 \cdot (t_2 - 3) \quad \text{Ecuación 3-32}$$

La distancia recorrida por el vehículo opuesto, será, por tanto:

$$d_3 = \frac{v_{99}}{1,2} + \frac{v_{99}^2 - v_3^2}{101} \quad \text{Ecuación 3-33}$$

La distancia necesaria para que se lleve a cabo una maniobra, según el autor, y que determina la longitud mínima de la zona de adelantamiento, es la distancia d_1+d_2 que se obtiene para una maniobra con seguimiento.

Para iniciar la zona de adelantamiento prohibido, se deberá considerar la distancia d_2+d_3 . La zona de preaviso (definida según la normativa de España) deberá comenzar a la mayor distancia d_2 del inicio de la prohibición (de las 4 posibles distancias a calcular).

Para iniciar la zona de adelantamiento permitido, es necesario disponer de la distancia, para el caso de maniobras con seguimiento, igual a la suma de d_1 , d_2 y d_3 .

Resultados: se obtuvieron las distancias de visibilidad de adelantamiento $d_1+d_2+d_3$ para dos tipos de vías, a partir de las velocidades de operación de las mismas, y para cada uno de los cuatro casos de adelantamiento que se han descrito.

Carretera convencional con arcenes > 1,5m

		$d_1+d_2+d_3$ (m)
Completado	Lanzado	230,0
	Con seguimiento	491,3
Desistido	Lanzado	335,6
	Con seguimiento	447,7

Carretera convencional con arcenes < 1,5m

		$d_1+d_2+d_3$ (m)
Completado	Lanzado	195,7
	Con seguimiento	408,8
Desistido	Lanzado	277,5
	Con seguimiento	373,2

Tabla 3-15. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Rocci (1993) para una velocidad de 100 y 90 km/h respectivamente

AASHTO (2004)

Modelo determinista y que utiliza el concepto de posición crítica, si bien también considera la fase inicial de la maniobra. Basado en datos experimentales.

Es el modelo en que se basa la normativa de diseño geométrico que estaba vigente en Estados Unidos hasta la última edición de 2011, recogida en el manual de diseño de carreteras (AASHTO, 2004)

Definición de distancia de adelantamiento y fases: distancia de visibilidad necesaria para realizar la maniobra de adelantamiento completa. Se compone de las siguientes distancias:

- d_1 recorrida por el vehículo adelantante durante el tiempo de percepción y reacción, y hasta el momento en que se invade el carril contrario, en el tiempo t_1 .
- d_2 recorrida por el vehículo adelantante por el carril izquierdo y hasta el momento de regresar al carril derecho, en el tiempo t_2 .
- $d_3 = d_{p-o}$ de seguridad.
- d_4 recorrida por el vehículo opuesto en $2/3$ de t_2 , o bien $2/3$ de d_2 .

La maniobra se descompone, en las dos fases siguientes:

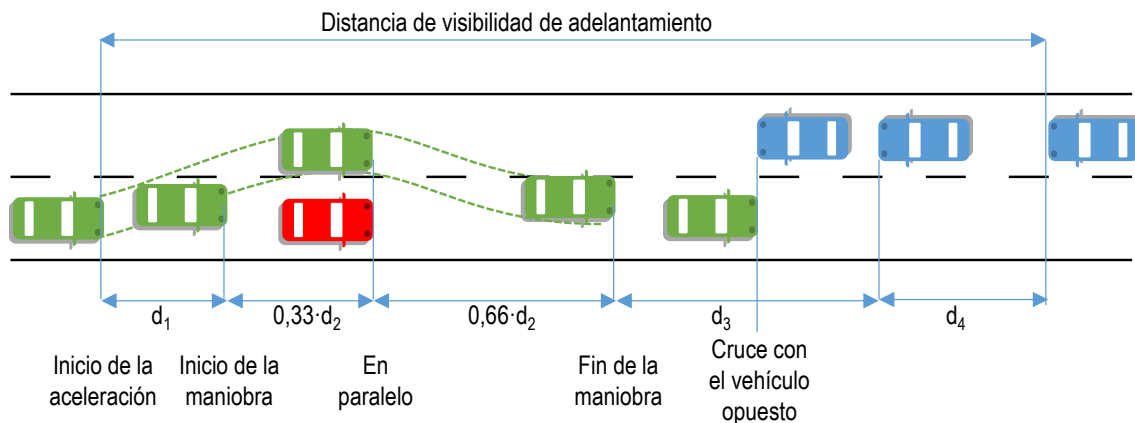


Figura 3-11. Esquema de la maniobra y definición de variables en el modelo de la AASHTO (2004)

Tipo de adelantamiento y modo de iniciación: parte del seguimiento del vehículo adelantado. Se describe un adelantamiento completado. La posibilidad de desistir de él sólo se contempla en fases iniciales (de t_0 a $1/3$ de d_2).

Parámetros y suposiciones del modelo:

- Velocidades de los vehículos:
 - Adelantante v_p , no es constante, pero se asume un valor medio.
 - Adelantado $v_i = v_p - \Delta v$, constante.

- $\Delta v = 15 \text{ km/h}$, constante para cualquier nivel de velocidades.
- Opuesto $v_o = v_p$ constante.
- Las velocidades v_p , v_i y v_o se relacionan con la velocidad de diseño v_d , que sirve de referencia para el modelo. A bajas velocidades v_p supera a v_d , mientras que a altas velocidades v_p es inferior a v_d .

v_d (km/h)	v_i (km/h)	$v_p = v_o$ (km/h)
30	29	44
40	36	51
50	44	59
60	51	66
70	59	74
80	65	80
90	73	88
100	79	94
110	85	100
120	90	105
130	94	109

Tabla 3-16. Relación entre velocidades en el modelo de la AASHTO

- Aceleración a , la distancia d_3 y los tiempos t_1 y t_2 se obtienen a partir de los datos de campo, y en función de la velocidad.

Formulación: los estudios de campo en que se basa la AASHTO son los realizados por Norman y Prisk (Norman, 1939 y Prisk, 1941).

La distancia de adelantamiento se obtiene sumando las distintas componentes.

$$D_{va} = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 \quad \text{Ecuación 3-34}$$

donde:

- d_1 y d_2 se calculan con las fórmulas correspondientes, en función de los tiempos t_1 y t_2 , la aceleración y la velocidad media del vehículo adelantante

$$d_1 = t_1 \cdot \left(v - \Delta v + \frac{a \cdot t_1}{2} \right) \quad \text{Ecuación 3-35}$$

$$d_2 = v \cdot t_2 \quad \text{Ecuación 3-36}$$

La distancia d_3 se obtiene también de los datos del estudio de campo y la distancia se calcula como $2/3 d$. Ello implica que el vehículo opuesto aparece en el momento en el que adelantante y opuesto se encuentran en paralelo, lo que ocurre, según los autores, a $1/3$ de la distancia d_2 .

Los valores de la aceleración a oscilan entre $0,625 \text{ m/s}^2$ cuando el adelantado circula a 40 km/h y $0,670 \text{ m/s}^2$ si lo hace a 80 km/h . La distancia d_3 aumenta desde 30 m , si el adelantado circula a 40 km/h hasta 90 m si circula a 80 km/h . Los tiempos t_1 y t_2 son los mostrados en la Figura 3-12.

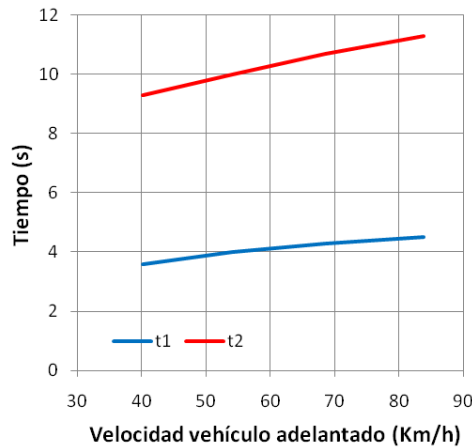


Figura 3-12. Parámetros del modelo de la AASHTO en función de la velocidad del vehículo adelantado

Resultados:

Velocidad de diseño (km/h)	50	60	70	80	90	100	110	120	130
D_{va} (m)	345	410	485	540	615	670	730	775	815

Tabla 3-17. Distancias de adelantamiento según la AASHTO (2004)

Hassan et al. (1996)

Modelo de tipo determinista que utiliza el concepto de posición crítica. Desarrollado a partir del modelo de Glennon pero modificando algunos de los supuestos del mismo. .

Definición de distancia de adelantamiento y fases: distancia de visibilidad necesaria para completar la maniobra de adelantamiento desde la posición crítica. La fase inicial de aceleración no influye en el cálculo de la distancia de visibilidad de adelantamiento, pero sí en el cálculo de la longitud de las zonas de adelantamiento permitido.

Tipo de adelantamiento y modo de iniciación: parte del seguimiento del vehículo adelantado y se describen el adelantamiento completado y el desistido.

Parámetros y suposiciones del modelo:

- Velocidades de los vehículos:
 - Adelantante: $v_p = v_d$ constante si se completa el adelantamiento; si se desiste, el vehículo decelera de forma uniforme.
 - Adelantado: $v_i = v_p - \Delta v$, constante.
 - Δv decrece con la velocidad en función de la expresión: $\Delta v = 24 - \frac{v_p}{10}$.
 - Opuesto: $v_o = v_p$ constante.
- Deceleración: $d_a = 2,4 \text{ m/s}^2$ constante.
- Longitudes de los vehículos $l_p = 5 \text{ m}$ y $l_i = 5 \text{ m}$ y $l_j = 25 \text{ m}$ (vehículo ligero y pesado).
- Δc : la posición crítica se encuentra en aquél punto en que se igualan las distancias de visibilidad necesarias para poder completar la maniobra y para poder acabarla o en el punto en que ambos vehículos se encuentran en paralelo; lo que antes ocurra. Se calcula de forma analítica.
- Percepción antes de desistir del adelantamiento $p_a = 1 \text{ s}$.
- Intervalos de tiempo vacío entre vehículos $h = 1 \text{ s}$, en todos los casos.

Formulación: el planteamiento es similar al modelo de Glennon (1988) si bien la formulación cambia en algunos aspectos.

Se estudian las ecuaciones de los mismos tipos de movimiento:

- Para la maniobra completada se asume un movimiento uniforme a la velocidad v_p desde la posición crítica, donde ya se ha alcanzado, hasta rebasar completamente al adelantado y regresar al carril propio.
- Para la maniobra desistida, se supone un tiempo de percepción, y posteriormente un movimiento uniformemente decelerado, hasta situarse detrás del vehículo que se pretendía adelantar, guardando una distancia de seguridad determinada.

Las distancias de seguridad entre vehículos adelantante, adelantado y opuesto se definen de nuevo y el concepto de posición crítica se revisa. De este modo, la posición crítica se encuentra en el punto en que se igualan las distancias necesarias para completar y desistir de la maniobra, siempre que esto ocurra antes de que los vehículos lleguen a la posición paralela. En caso contrario, la posición de ambos vehículos en paralelo será la propia posición crítica.

El tiempo t_1 necesario para completar el adelantamiento desde la posición crítica (Ecuación 3-37 y Ecuación 3-38).

$$t_1 = p_a + t_2 - \frac{d \cdot t_2}{4v} \cdot (t_2 + 2h) \quad \text{Ecuación 3-37}$$

$$t_1^* = \frac{(v - \Delta v) \cdot h + l_p}{\Delta v} \quad \text{para } \Delta c > 0 \quad \text{Ecuación 3-38}$$

Tiempo t_2 necesario para desistir del adelantamiento desde la posición crítica, una vez ha transcurrido el tiempo de percepción (Ecuación 3-39).

$$t_2 = -h + \sqrt{h^2 + \frac{4v \cdot (l_p + l_i + (2v - \Delta v)h)}{2v \cdot d \cdot \Delta v}} \quad \text{Ecuación 3-39}$$

Posición relativa de la situación crítica Δc (Ecuación 3-40)

$$\Delta c = l_p + (v - \Delta v)h - \Delta v \cdot t_1 = \frac{d \cdot t_2^2}{2} - \Delta v \cdot (p_a + t_2) - l_i - (v - d \cdot t_2)h \quad \text{Ecuación 3-40}$$

Distancia de visibilidad de adelantamiento (Ecuación 3-41).

$$D_{va} \begin{cases} 2v \cdot (t_1 + h) & \text{si } \Delta c \leq 0 \\ 2v \cdot (t_1^* + h) & \text{si } \Delta c > 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3-41}$$

Resultados:

Velocidad adelantante o v_a (km/h)	50	60	70	80	90	100	110
Δv (km/h)	19	18	17	16	15	14	13
D_{va} (vehículo ligero) (m)	150	195	243	294	360	468	601
D_{va} (vehículo pesado) (m)	168	218	271	327	385	468	601

Tabla 3-18. Distancias de adelantamiento según Hassan

Según los autores, esta distancia es la que debe disponerse cuando el conductor del adelantante se sitúa justo en la posición crítica. Pero la visibilidad necesaria no es constante a lo largo de toda la maniobra.

Para poder aplicar el modelo a la definición y señalización de prohibiciones de adelantamiento, los autores estudian a continuación la longitud mínima que estas deben tener (Hassan et al. 1996). Para ello, analizan las trayectorias de los vehículos hasta alcanzar la posición crítica.

La distancia necesaria para alcanzar la posición crítica se define como d_1 , siendo el tiempo necesario para alcanzarla igual al tiempo de percepción y análisis p , más el tiempo t_0 . Durante esta fase se asumen un movimiento uniforme para el vehículo adelantado, y para el adelantante, una etapa de aceleración constante (a) hasta alcanzar la velocidad objetivo v de duración $t_a = \frac{\Delta v}{a}$, a partir de la cual continúa con velocidad constante.

Según esto, y asumiendo que el vehículo adelantante alcanza la velocidad v antes de llegar a la posición crítica, como ya asumía el cálculo de la distancia de visibilidad, la Ecuación 3-42 y Ecuación 3-43 permiten calcular el tiempo y la distancia necesaria hasta alcanzar dicha posición.

$$t_0 = \frac{\Delta v}{2a} + \frac{\Delta c + l_i + v \cdot h}{\Delta v} - h \quad \text{Ecuación 3-42}$$

$$d_0 = \Delta c + (v - \Delta v)(p + t_1 + h) + l_i \quad \text{Ecuación 3-43}$$

Conocidas la distancia de visibilidad de adelantamiento y la distancia d_1 , así como la evolución temporal del vehículo adelantante a lo largo de toda la maniobra, se definen unos perfiles de visibilidad necesaria. Estos perfiles proporcionan la visibilidad necesaria, en cada momento a lo largo del adelantamiento, para llevarlo a cabo de forma segura, ya sea completándolo o desistiendo de él, si el vehículo adelantante aún no ha alcanzado la situación crítica.

Como ya se ha comentado cuando se definió el concepto de posición crítica, el máximo de visibilidad requerida se sitúa precisamente en este punto. La señalización de zonas de adelantamiento se elaborará comparando la visibilidad disponible en la carretera, en cada uno de los sentidos, con el perfil de visibilidad requerido para realizar el adelantamiento, garantizando al menos, que en cada zona de adelantamiento permitido pueda completarse una maniobra.

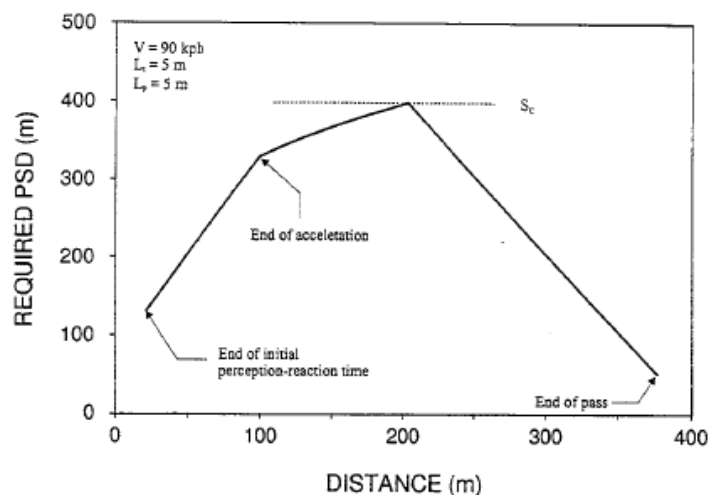


Figura 3-13. Perfil de visibilidad de un adelantamiento único según Hassan et al. (1996)

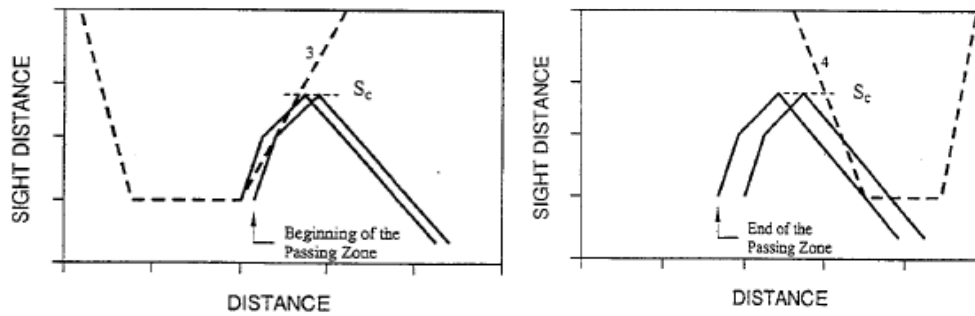


Figura 3-14. Aplicación del perfil de visibilidad a la determinación del inicio y fin de prohibición de adelantamiento, según Hassan et al. (1996)

Wang y Cartmell (1998)

El modelo (Wang y Cartmell, 1998) es de tipo determinista y no usa el concepto de posición crítica. Está basado en las ecuaciones del movimiento de los tres vehículos implicados en la maniobra.

Definición de distancia de adelantamiento y fases: distancia para realizar la maniobra completa de adelantamiento. Se compone de las tres siguientes distancias, correspondientes a las tres fases del adelantamiento:

- d_1 (en el tiempo t_1) desde el inicio de la maniobra hasta que la parte delantera del vehículo adelantante se encuentra en paralelo a la trasera del adelantado.
- d_2 (t_2) desde el final de la primera fase hasta que la parte trasera del vehículo adelantante se encuentra en paralelo a la delantera del adelantado.
- d_3 (t_3) desde el final de la segunda fase hasta concluir el adelantamiento.

Tipo de adelantamiento y modo de iniciación: parte del seguimiento del vehículo adelantado

Parámetros de entrada y valores propuestos:

- Velocidades de los vehículos: constituyen distintos parámetros de entrada
 - Adelantante: v_{p1} inicial y v_{p2} máxima.
 - Adelantado: v_i constante.
 - Opuesto: v_o constante.
- Longitudes de los vehículos l_i y l_p .
- Aceleración a , toma valores entre 0,6 y 3,4 m/s^2 .
- Desplazamiento transversal del vehículo adelantante: y .
- Distancia de seguridad d_{p-i} al inicio de la maniobra.
- Distancia de seguridad d_{p-f} al final de la maniobra.

Formulación: la maniobra de adelantamiento se descompone, según los autores, en las tres fases mencionadas anteriormente. Esta división da lugar al cálculo de tres componentes distintos de la distancia de adelantamiento.

En la primera y la última fase de la maniobra, la trayectoria del vehículo adelantante se puede aproximar por un polinomio de quinto grado, que enlaza dos líneas paralelas. A efectos de cálculo, los autores aproximan esta trayectoria a la sucesión de tres tramos rectos tangentes a la citada curva. La trayectoria en segunda fase del adelantamiento es también un tramo recto.

La trayectoria en la primera y segunda fase se define por la Ecuación 3-44.

$$S = \frac{7x}{15} + \sqrt{\left(\frac{8x}{15}\right)^2 + y^2}$$

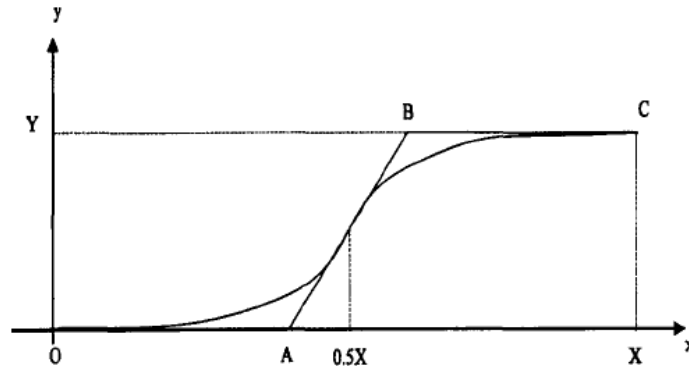


Figura 3-15. Trayectoria curvilínea y aproximación OABC del recorrido del vehículo adelantante en un cambio de carril, según Wang y Cartmell (1998)

Según la fase de la maniobra en la que se alcanza la velocidad máxima del vehículo adelantante, se distinguen tres casos, más un cuarto en el que el vehículo permanece acelerando durante todas las fases.

El tiempo y la distancia necesaria para que el vehículo adelantante pase de la v_{p1} a la v_{p2} se calculan con la Ecuación 3-45 y la Ecuación 3-46.

$$t_{\text{aceleración}} = \frac{V_{p2} - V_{p1}}{a} \quad \text{Ecuación 3-45}$$

$$d_{\text{aceleración}} = \frac{V_{p2}^2 - V_{p1}^2}{2a} \quad \text{Ecuación 3-46}$$

Estos valores deberán compararse con los tiempos de recorrido en cada fase que se obtengan a continuación, para poder determinar qué caso representa la maniobra estudiada.

Para cada caso se definen las ecuaciones del movimiento, que junto a la ecuación de la trayectoria de la curva descrita por el adelante, pueden ser resueltas, obteniendo los tiempos t_i y las distancias d_i correspondientes a cada fase.

De esta forma, el proceso a seguir es el del cálculo de los distintos casos hasta obtener el que satisfaga la condición de alcanzar la velocidad máxima en una fase determinada, o bien al final de la última.

Resultados: para proporcionar valores a este modelo, los autores emplean la misma relación entre las velocidades de diseño, del vehículo adelantado y del adelante, que se emplean en el modelo de la AASHTO, anteriormente comentado.

Se proponen dos valores distintos de distancia de visibilidad de adelantamiento, según dos niveles distintos de aceleración.

Velocidad de diseño (km/h)	50	60	70	80	90	100	110
D_{va} ($a=0,6 \text{ m/s}^2$) (m)	378	432	493	538	601	653	707
D_{va} ($a=3,4 \text{ m/s}^2$) (m)	289	330	375	412	462	503	547

Tabla 3-19. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Wang y Cartmell (1998)

Polus et al. (2000)

Modelo determinista y sin uso de la posición crítica. Basado en datos de campo.

Definición de distancia de adelantamiento y fases: distancia de visibilidad necesaria para realizar la maniobra de adelantamiento completa. Se compone de:

- d_1 recorrida por el vehículo adelantante durante el tiempo de percepción y reacción, y hasta el momento en que se invade el carril contrario, en el tiempo t_1 . Comienza cuando el vehículo adelantante acaba de cruzarse con el anterior vehículo en sentido opuesto.
- d_2 recorrida por el vehículo adelantante por el carril izquierdo y hasta el momento de regresar al carril derecho, en el tiempo t_2 .
- $d_3 = d_{p-o}$ de seguridad.
- distancia recorrida por el vehículo opuesto, igual a $2/3$ de d_2 .

Tipo de adelantamiento y modo de iniciación: parte del seguimiento del vehículo adelantado

Parámetros y suposiciones del modelo: como parámetros de entrada, se toman las distintas distancias y tiempos en los que se divide la distancia total de visibilidad de adelantamiento.

- distancias d_i componentes del adelantamiento, así como las distintas distancias de seguridad.
- tiempos t_i componentes de la maniobra, así como tiempos de percepción y reacción.

Formulación: el modelo es completamente empírico. Todos los datos se apoyan en el estudio de campo que los propios autores desarrollan, y que se describirá más adelante. Con ello se formula un modelo prácticamente idéntico al propuesto por la AASHTO (1994), con el cual se compara. La distancia de adelantamiento se obtiene sumando las distintas componentes (Ecuación 3-47).

$$D_{va} = d_1 + d_2 + d_3 + \frac{2}{3} d_2$$

Ecuación 3-47

Además de la velocidad, se han considerado como factores que pueden influir en la maniobra el tipo de vehículo adelantado (ligero o pesado) y el modo de iniciación del adelantamiento (lanzado o con seguimiento).

Resultados: el modelo propuesto por Polus et al. (2000) fue una crítica del propuesto por la AASHTO (1994). Para aquellos adelantamientos a vehículos ligeros, aunque los resultados coincidían, se observó que los componentes de la distancia de adelantamiento no fueron iguales a los que determina la AASHTO: el estudio de Polus proporcionó mayores distancias recorridas a lo largo del carril contrario, frente a menores tiempos de percepción y reacción.

La diferencia de velocidades entre vehículos decrece con la velocidad del vehículo adelantante, tal como proponen Glennon, o Hassan, y en contra de la AASHTO, que toma el valor constante de 15 km/h. Además, esta diferencia es mayor para vehículos pesados que para ligeros. La aceleración se producía, en gran parte, cuando el vehículo había invadido ya el carril contrario, por lo que el modelo de velocidad constante no era realista.

Velocidad de diseño (km/h)	70	85	100
D_{va} (m) cuando adelanta un veh. ligero	443	561	674
D_{va} (m) cuando adelanta un veh. pesado	501	625	747

Tabla 3-20. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Polus et al. (2000)

Harwood et al. (2008), MUTCD (2009) y AASHTO (2011)

Modelo de tipo determinista y con uso de la posición crítica. Se basa en el modelo de Glennon (1988), ya citado, aunque verificando el mismo por medio de datos experimentales (Harwood, et al. 2007 y Harwood, et al. 2010) y se ha incluido en la última modificación de la normativa de diseño norteamericana (AAHSTO, 2011).

Definición de distancia de adelantamiento y fases: distancia para completar la maniobra de adelantamiento desde la posición crítica

Parámetros de entrada y valores propuestos:

- Velocidades de los vehículos:
 - Adelantante $v_p = v_d$, constante si se completa la maniobra; si se desiste, decelera uniformemente. Esta velocidad se alcanza ya en la posición crítica.
 - Opuesto $v_o = v_d$, constante.
 - Adelantado: $v_f = v_p - \Delta v$, constante.
 - Δv es constante e igual a 19 km/h.
- Δc : la posición crítica se encuentra en aquél punto en que se igualan las distancias de visibilidad necesarias para poder completar la maniobra y para poder acabarla. Se calcula de forma analítica.
- Deceleración $d_a = 3,4 \text{ m/s}^2$ constante.
- Longitud de los vehículos $l_p = 5,8 \text{ m}$, $l_i = 5,8 \text{ m}$ considerando vehículos ligeros.
- Tiempo de percepción antes de desistir de la maniobra $p_a = 1 \text{ s}$.
- Distancias de seguridad resultado de considerar un hueco de 1 s, tanto al desistir como al completar la maniobra.
- Distancia de seguridad resultado de considerar t_{p-o} igual a 1 s.

Formulación: Harwood et al. asumieron que los modelos que mejor representan la maniobra de adelantamiento son los de Glennon y Hassan (1989 y 1996, respectivamente), que además proporcionaban distancias de adelantamiento muy similares a las del MUTCD, vigentes en Estados Unidos para señalización de zonas de adelantamiento.

La propuesta de Harwood et al. consistió en emplear el mismo criterio para señalización y para el diseño. Justificaron que el actual criterio de señalización era seguro, basándose en un estudio de campo que los mismos autores realizan. Es por ello que los valores que proporciona son los del criterio del MUTCD, vigente para la señalización en Estados Unidos, pero justificados mediante las ecuaciones del modelo de Glennon y Hassan.

Resultados:

Velocidad v_d (km/h)	50	60	70	80	90	100	110
Velocidad del adelantante (km/h)	50	60	70	80	90	100	110
Velocidad del adelantado (Km/h)	31	41	51	61	71	81	91
D_{va} (m)	160	180	210	245	280	320	355

Tabla 3-21. Distancias de visibilidad de adelantamiento según Harwood et al. (2008)

Se trata de las distancias necesarias para el adelantamiento de un vehículo ligero a otro vehículo ligero. No obstante, deben considerarse tramos con mayor visibilidad para que puedan producirse adelantamientos a vehículos pesados.

Se proporcionan, sin justificar expresamente, valores revisados para la longitud mínima de las zonas de adelantamiento permitida. Son los que se presentan en la Tabla 3-22, en función de la velocidad de diseño de la carretera.

Velocidad v_d (km/h)	50	60	70	80	90	100	110
Mínima longitud zona (m)	180	210	240	240	240	240	240

Tabla 3-22. Longitudes mínimas de zonas de adelantamiento, según Harwood et al. (2008)

3.2.1.3.2. Modelos probabilísticos

Sparks et al. (1993)

Se trata de una formulación probabilístico y con uso de la posición crítica.

Definición de distancia de adelantamiento y fases: distancia necesaria para llevar a cabo la maniobra completa. Se compone de:

- d_1 desde el inicio hasta la posición crítica: se basa en la proporcionada por Lieberman (1982).
- d_2 distancia desde la posición crítica hasta completar la maniobra: se basa en la proporcionada por Glennon (1988).

Tipo de adelantamiento y modo de iniciación: parte del seguimiento del vehículo adelantado

Parámetros de entrada: Los siguientes parámetros vienen caracterizados por su valor mínimo, máximo y más probable:

- Velocidades de los vehículos adelantante, adelantado y opuesto: v_p , v_i y v_o .
- Deceleración d_a .
- Aceleración máxima a , del vehículo adelantante.
- Velocidad máxima del vehículo adelantante $v_{p,max}$.
- Tiempo de percepción antes de desistir de la maniobra p_a .
- Distancias de seguridad h_{p-i} antes y después del adelantamiento.
- Distancia de seguridad d_{p-o} .
- Δc : la posición crítica se encuentra en aquél punto en que se igualan las distancias de visibilidad necesarias para poder completar la maniobra y para poder acabarla. Se calcula de forma analítica.
- Longitud de los vehículos: se estudian distintas longitudes de vehículo adelantante.

A modo de resumen, los valores de los parámetros adoptados son los expresados en la Tabla 3-23.

Formulación: se realizó una simulación estocástica del modelo determinista basado en el de Lieberman y en el de Glennon (1988). Se realizó por medio de un modelo de simulación estocástica de árboles de decisión, y posteriormente un análisis de sensibilidad para detectar que parámetros tienen una mayor influencia sobre el cálculo de la distancia de adelantamiento.

El estudio de Sparks et al. (1993) tenía como objetivo fundamental analizar la influencia de la longitud de los vehículos en la distancia necesaria para el adelantamiento, pero para ello realizó este tratamiento probabilístico de modelos anteriores, para comparar sus resultados con los

estándares vigentes en Canadá de distancias de visibilidad de adelantamiento. Ello permitió evaluar el nivel de seguridad de los mismos.

Parámetro	Unidad	Media	Mínimo	Máximo
Hueco inicial entre adelantado y adelantante	m	9,0	4,5	13,4
Hueco final entre adelantado y adelantante	m	4,5	2,0	10,0
Tiempo de percepción y de reacción	s	2,5	1,0	3,5
Velocidad del vehículo opuesto	km/h	100,0	85,0	115,0
Velocidad del vehículo adelantante	km/h	100,0	95,0	115,0
Velocidad del vehículo adelantado	km/h	85,5	79,0	91,0
Tasa de deceleración	m/s ²	2,4	2,0	4,0
Distancia entre el adelantante y el opuesto al finalizar la maniobra	m	55,0		
Máxima aceleración del adelantante	(km/h)/s	14,5	12,2	18,4
Máxima aceleración del adelantado	km/h	146,1	138,4	164,3

Tabla 3-23. Valores de las variables en el modelo de Sparks et al. (1993)

Resultados: se presentaron las distribuciones de probabilidad de distancias de visibilidad de adelantamiento para tres niveles distintos de velocidad (80, 90 y 100 km/h) y para varios tipos de vehículos adelantados: vehículo ligero y vehículos pesados de 23 y 25 m.

Para dos niveles distintos de velocidad del vehículo adelantante, se obtuvieron los resultados de la Figura 3-16 y la Figura 3-17.

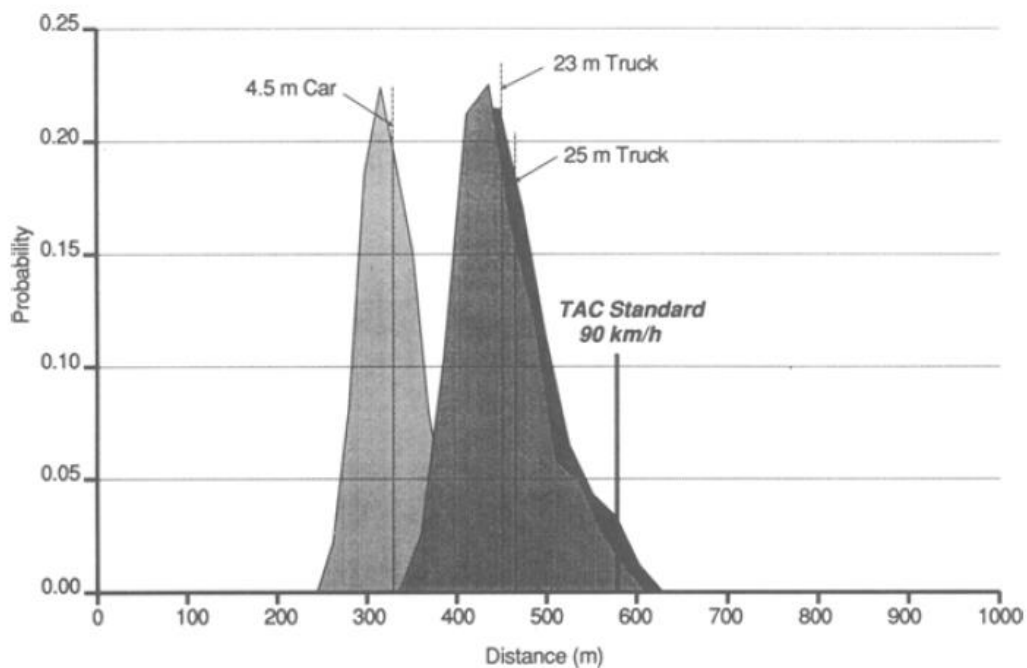


Figura 3-16. Curva distancia de visibilidad de adelantamiento-Probabilidad para velocidad de diseño de 80 km/h, según Sparks et al.(1993)

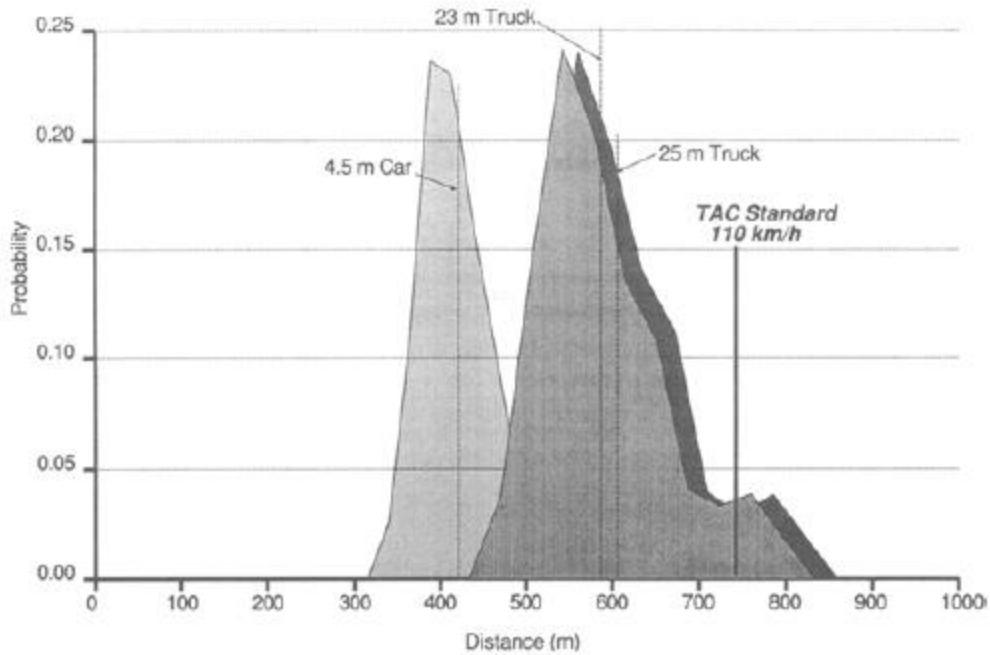


Figura 3-17. Curva distancia de visibilidad de adelantamiento-Probabilidad para velocidad de diseño de 100km/h, según Sparks et al. (1993)

El Khoury y Hobeika (2007a)

Los autores desarrollan un modelo probabilístico y con uso de la posición crítica, basado en el de Glennon (1988).

Definición de distancia de adelantamiento y fases: la necesaria para completar la maniobra desde la posición crítica.

Tipo de adelantamiento y modo de iniciación: parte del seguimiento del vehículo adelantado

Parámetros de entrada y valores propuestos:

- Velocidades de los vehículos:
 - Adelantante y opuesto: v_p y v_o siguen una distribución normal. La media y desviación se calculan en base a datos de campo en la propia carretera. Se supone constante, desde la posición crítica hasta el final del adelantamiento.
 - Adelantado $v_i = v_p - \Delta v$. La velocidad del vehículo adelantado se asume constante se calcula en base a la del adelantante y a la diferencia de velocidades Δv .
 - Δv sigue una distribución log-normal, que también se ha obtenido a partir de datos de campo de estudios de adelantamiento.
- Δc : la posición crítica se encuentra en aquél punto en que se igualan las distancias de visibilidad necesarias para poder completar la maniobra y para poder acabarla. Se calcula de forma analítica.
- Deceleración d_o : sigue una distribución normal, obtenida a partir de diversos estudios anteriores.
- Longitud de los vehículos, siguen una distribución estadística en base datos estadísticos de vehículos.
- Tiempo de percepción antes de desistir de la maniobra p_o : los autores emplean una distribución log-normal a partir de los resultados de diversos estudios sobre este tiempo de percepción.

- Distancias de seguridad h_{p-i} : los autores utilizan una distribución uniforme, entre los valores que estudios anteriores han propuesto.
- Distancia de seguridad d_{p-o} : se emplea, al igual que en la d_{p-i} una distribución uniforme.

Formulación: las ecuaciones del modelo se basaron en gran medida en las de Glennon (1988).

Mientras que Glennon amplió los supuestos a los valores que deben tomar las variables de su modelo, y proporcionó números exactos para los mismos, los investigadores de este modelo probabilístico estudiaron qué distribuciones rigen las variables del modelo. Glennon obtenía, para unas condiciones de velocidad y tipo de vehículo un único valor de la distancia de adelantamiento, que debía ser empleado para diseñar la carretera. El Khoury y Hobeika (2007a) obtuvieron una distribución de distancias de adelantamiento a partir de las distribuciones de los parámetros de entrada. Es decir, que a cada distancia de adelantamiento se le asoció un nivel de probabilidad. Existirán además un valor medio y unos indicadores de dispersión.

Los resultados se obtuvieron gracias a una simulación mediante el método Montecarlo a partir de las variables de entrada, y paralelamente, mediante el cálculo de un modelo analítico con el que las expresiones son evaluadas por sus distribuciones estadísticas. En cualquier caso, se emplearon fórmulas muy similares al modelo de Glennon (1988), a excepción de algunos supuestos que El Khoury y Hobeika no consideran. La utilización de dos métodos de cálculo distintos proporcionó, según los autores, una garantía de validez de los resultados.

Resultados: los autores sólo presentaron los resultados para la velocidad de diseño de 80 km/h. Para este nivel de velocidad, se obtuvo la distancia en función de distintos niveles de riesgo.

D_{vo} (m)	137	168	198	215	229	259	290	320	350	381
Índice de Riesgo	3,27	2,67	2,07	1,65	1,29	0,84	0,54	0,07	0,05	0,03

Tabla 3-24. Distancias de visibilidad de adelantamiento ($v=80$ km/h) según El Khoury y Hobeika (2007)

Donde el índice de Riesgo que se expresa en la tabla es un parámetro destinado a estimar el riesgo de llevar a cabo el adelantamiento, obtenido a partir de las distancias y tiempos de seguridad entre los vehículos que están implicados en los adelantamientos simulados.

Los autores comparan sus datos con los criterios vigentes en Estados Unidos del MUTCD para la señalización, y el modelo de Glennon en el cual se han basado. La Figura 3-18 muestra el índice de riesgo que asumen los modelos citados.

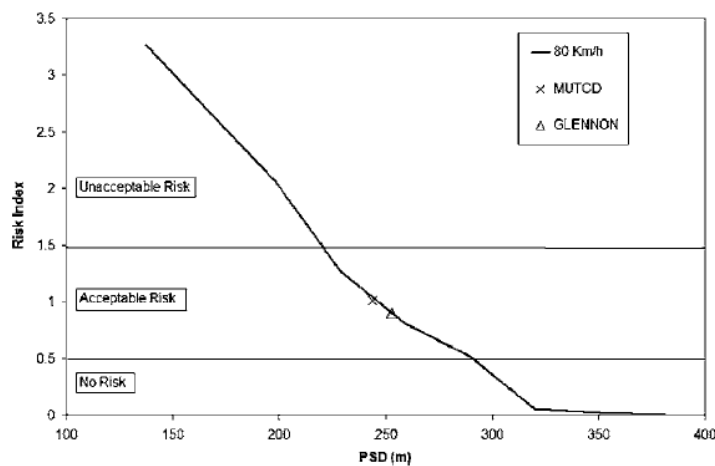


Figura 3-18. Índice de Riesgo en función de la distancia de visibilidad de adelantamiento a 80 km/h según El Khoury y Hobeika (2007)

El-Bassiouni y Sayed (2010)

Se trata de un modelo probabilista y sin uso de la posición crítica (El-Bassiouni y Sayed, 2010), basado en el modelo de la AASHTO (2001).

Definición de distancia de adelantamiento y fases: distancia necesaria para completar la maniobra desde el inicio de la misma. Se distinguen las cuatro siguientes distancias:

- d_1 recorrida por el vehículo adelantante durante el tiempo de percepción y reacción, y hasta el momento en que se invade el carril contrario, en el tiempo t_1 .
- d_2 recorrida por el vehículo adelantante por el carril izquierdo y hasta el momento de regresar al carril derecho, en el tiempo t_2 .
- $d_3 = d_{p-o}$ de seguridad.
- d_4 recorrida por el vehículo opuesto en t_2 .

Tipo de adelantamiento y modo de iniciación: parte del seguimiento del vehículo adelantado

Parámetros de entrada y valores propuestos: De cada una de las siguientes distancias se conoce la distribución de probabilidad, que se presenta en la Tabla 3-25.

Variable	Distribución	Media	SD
d_1 (m)	lognormal	92,14	36,12
d_2 (m)	lognormal	234,00	62,26
d_3 (m)	uniforme	41,62	15,20
d_4 (m)	normal	232,54	56,13

Tabla 3-25. Parámetros de entrada y distribución estadística de los mismos, según El-Bassiouni y Sayed, para $V=100$ km/h

Formulación: mediante el empleo del simulador de conducción de la University of British Columbia (Canadá), se obtuvo una muestra de las distintas distancias d_1 a d_4 , que posteriormente fue analizada estadísticamente para ajustar las distribuciones estadísticas más adecuadas a cada una de las componentes.

Conocidas las distribuciones, se llevó a cabo un proceso de simulación por el método Monte-Carlo. Para ello, se tomaban valores aleatorios de las cuatro distancias mencionadas para generar un número elevado de casos.

Para velocidades de 100 km/h, el resultado obtenido es una distribución de frecuencias de distancia de visibilidad de adelantamiento, tal como se muestra a en la Figura 3-19.

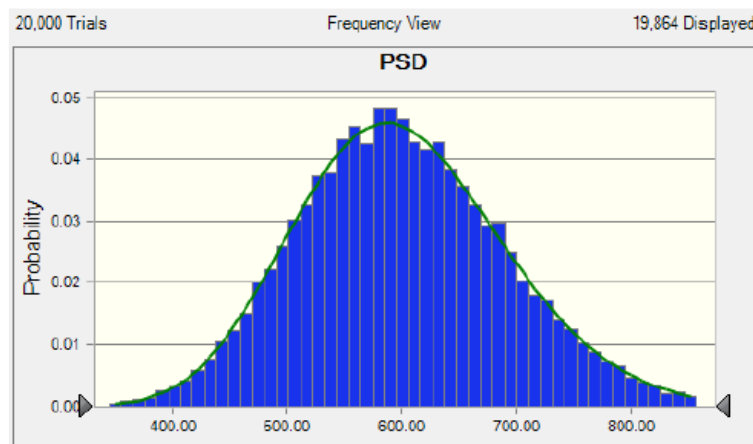


Figura 3-19. Distribución de frecuencias de distancia de visibilidad de adelantamiento según El-Bassiouni y Sayed (2010)

Tras la obtención de esta distribución, se ha realizado un análisis estadístico para evaluar el nivel de seguridad del modelo de la AASHTO.

Vlahoguanni y Golias (2013)

Se trata de un modelo probabilístico que únicamente evalúa la duración de la ocupación del carril izquierdo. Para ello, basándose en datos obtenidos mediante un simulador de conducción, con un amuestra de 57 conductores menores de 30 años, plantearon un modelo estadístico de supervivencia, o regresión de Cox. Para los autores, la duración de la supervivencia coincide con la duración de la maniobra de adelantamiento.

Tras la aplicación del modelo de regresión, se detectó que la mejor función que describe la probabilidad de que la maniobra dure más de un cierto tiempo es la del tipo log-logístico. El punto de inflexión de dicha curva se sitúa en tiempos de ocupación de 7 s (Figura 3-20).

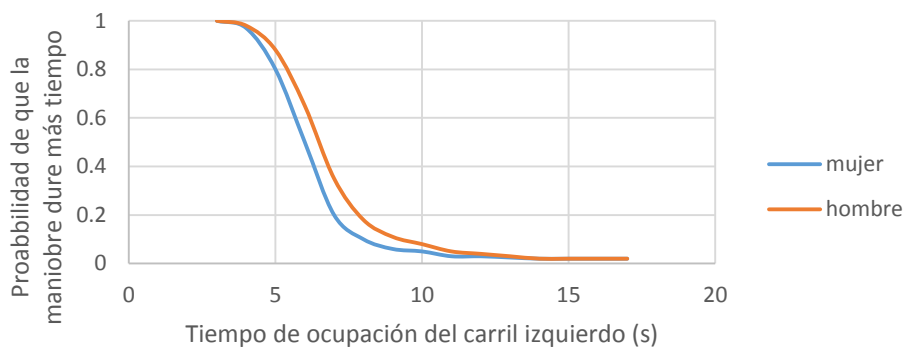


Figura 3-20. Modelo de duración de la ocupación del carril izquierdo según Vlahoguanni y Golias (2012)

3.2.2. Decisión de adelantamiento

Los modelos enunciados anteriormente trataban de representar la evolución de los vehículos implicados en una maniobra de adelantamiento, cuando esta ha llegado a producirse, es decir, cuando el conductor del vehículo adelantante manifiesta y ejecuta su deseo de rebasar a un vehículo que circula más lento.

Sin embargo, en el proceso relacionado con el adelantamiento en carreteras convencionales intervienen muchos más factores en base a los cuales los conductores consideran o no necesario adelantar, y realizan la maniobra en un determinado lugar bajo unas condiciones de tráfico concretas.

Este aspecto de la maniobra está muy relacionado con los modelos anteriormente propuestos, pero constituye un enfoque diferente que tiene una gran importancia cuando se trata de modelizar el flujo de tráfico por medio de programas de microsimulación. En concreto, este planteamiento busca determinar en qué situaciones un conductor desea adelantar, y que tamaño de huecos en el sentido contrario considera aceptable para ejecutar un adelantamiento.

Destaca, en este ámbito, el menor número de investigaciones realizadas, en comparación con las descripciones teóricas o experimentales que proporcionan los modelos de distancia de visibilidad de adelantamiento.

A continuación se revisan algunas de las aportaciones más significativas en este aspecto, destacando de la mayoría de ellas el estar basadas en la utilización de simuladores de conducción.

3.2.2.1. Lennung et al (2003)

Lennung et al. (2003) analizaron el nivel de riesgo asumido por los conductores en distintas maniobras, en función de la edad, el sexo o la influencia de la ingesta de alcohol. En cuanto a la maniobra de adelantamiento, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La edad del conductor de un vehículo que adelanta no influye en el tamaño del hueco aceptado.
- Los conductores hombres aceptan huecos ligeramente más pequeños (9,78 s de media, frente a 10,76 s por parte de las mujeres).
- Al aumentar la velocidad del vehículo opuesto, los huecos aceptados medidos han sido más reducidos.

Los resultados de Lennung et al. (2003) se apoyan en un experimento con 32 conductores, empleando el simulador de conducción STISIM.

3.2.2.2. Bar-Ghera y Shinar (2005)

Bar-Ghera y Shinar (2005) analizan desde un punto anterior el proceso de percepción, análisis y decisión del conductor, que puede conducir o no a la ejecución de una maniobra de adelantamiento. El objetivo de esta investigación era determinar la tendencia de los conductores a adelantar a otros vehículos en función de la diferencia de velocidades existente entre ambos.

Para ello, se realizó un estudio, también mediante un simulador de conducción STISIM, con un total de 19 conductores, todos ellos de edad menor a 30 años.

De esta forma, se llegó a la conclusión de que, incluso con cuando el vehículo que circula por delante del sujeto lo hace a una velocidad superior, existía un porcentaje de conductores que lo adelantaban, a pesar de que esa situación no implicaba ninguna demora. En la Figura 3-21 se observa este fenómeno.

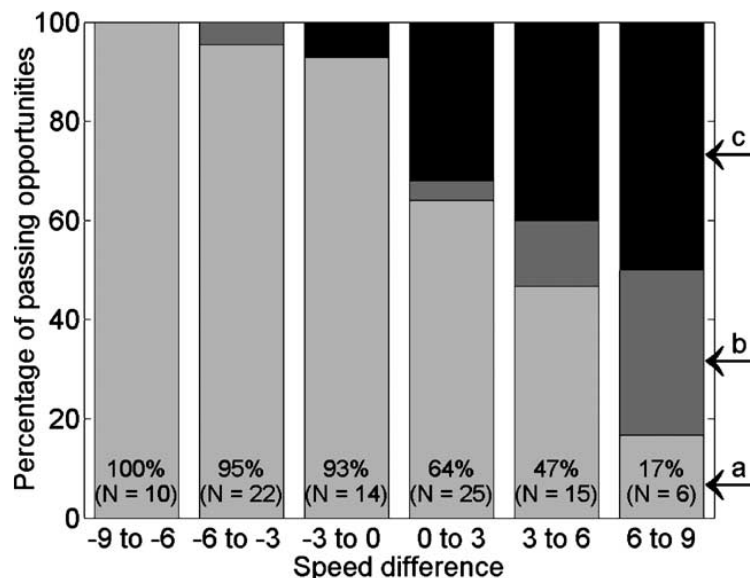


Figura 3-21. Porcentaje de vehículos que adelantan (a), desean adelantar y no lo hacen (b) y no desean adelantar (c), en función de la diferencia de su velocidad con la del vehículo que les precede (Bar-Ghera y Shinar, 2005)

3.2.2.3. Farah y Toledo (2010)

Entre los trabajos más recientes, destaca la propuesta de Farah y Toledo (2010), basada en la realización de pruebas experimentales con 100 conductores empleando el simulador STISIM,

mediante la que se representa todo el fenómeno del adelantamiento mediante modelos de decisión binaria.

Para estos autores, el adelantamiento se descomponía en dos fases. El deseo de adelantar se situaba en primer lugar, y si este era positivo, la aceptación de huecos constituía la segunda fase.

Cada una de esas fases se caracterizó mediante un modelo de decisión binario tipo probit, en función de las diversas variables controladas del experimento, y asumiendo cierta variabilidad originada por aspectos no considerados, como el carácter o destreza de los conductores.

El deseo de adelantar se valoró a partir de una función de utilidad, que tras la calibración del modelo, se observó que dependía de los siguientes factores:

- Diferencia entre la velocidad deseada y la del vehículo que va a ser adelantado, siendo la utilidad de la maniobra mayor cuando esta diferencia aumenta.
- Distancia de seguimiento, definida como el hueco existente entre el vehículo líder y el que le sigue y desea adelantarlo. Los autores consideran que una distancia de seguimiento reducida provoca un aumento en la función de utilidad.

Cuando la función de utilidad superaba un valor umbral, se manifestaba el deseo de adelantar al vehículo que precede al sujeto, por lo tanto, se iniciaba un proceso de rechazo y aceptación de huecos. El hueco aceptado era aquel que superaba el hueco crítico, definido como una variable aleatoria que no puede ser medida, y que dependía, según el experimento, de las siguientes variables:

- Velocidad del sujeto adelantante, siendo el hueco crítico más pequeño al circular más rápido.
- Velocidad del vehículo lento, aumentando el hueco crítico conforme aumenta la velocidad del mismo.
- Curvatura del tramo de carretera. En tramos más rectos los conductores aceptan huecos más reducidos.
- Tipo de vehículo adelantado, aumentado el tamaño del hueco crítico en el caso de vehículos pesados.

3.2.2.4. Vlahogianni y Golias (2012)

Esta investigación se basó, igualmente, en los datos obtenidos de un simulador de conducción con 57 conductores de edades inferiores a los 30 años. Los autores estudiaron la influencia de la edad, el sexo, los kilómetros recorridos, los años de carné de conducir y los accidentes sufridos en la probabilidad de completar un adelantamiento.

Para ello, plantearon un modelo bayesiano (bayesian network) alimentado con los datos obtenidos del simulador de conducción. Este modelo permitió representar la probabilidad de adelantamiento en función de los valores de las variables de entrada.

Los resultados mostraron la relación entre la probabilidad de adelantamiento y la distancia existente entre el vehículo adelantante y el vehículo líder (Figura 3-22), así como hasta el vehículo opuesto (Figura 3-23).

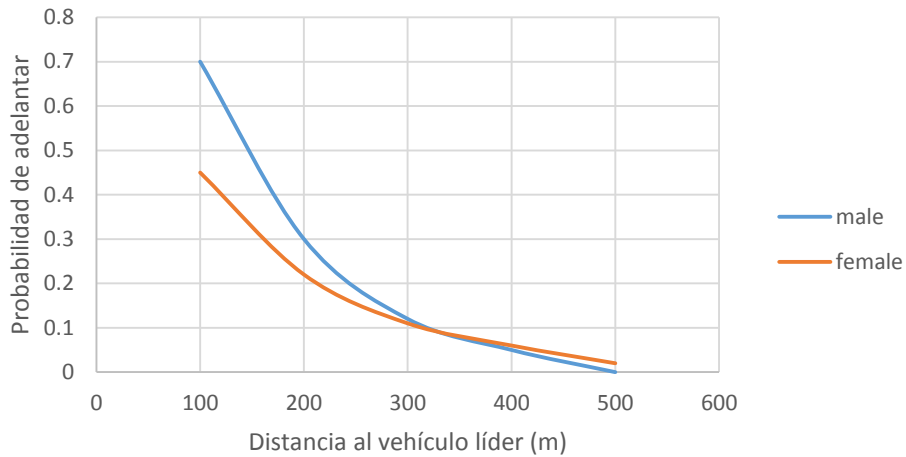


Figura 3-22. Probabilidad de adelantar en función de la distancia hasta el adelantado, según Vlahogianni y Golias (2012)

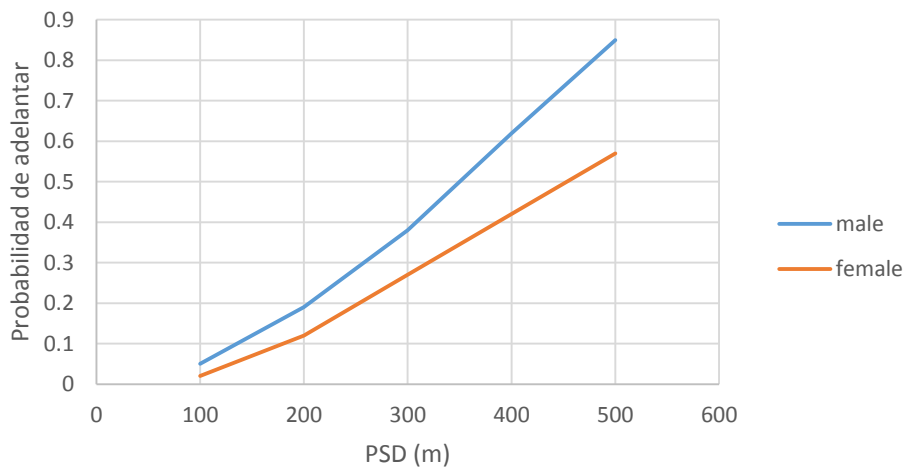


Figura 3-23. Probabilidad de adelantar en función de la distancia hasta el opuesto, según Vlahogianni y Golias (2012)

3.2.2.5. Ghods y Saccomanno (2014)

Estos autores, con el objeto de calibrar un modelo de microsimulación, propusieron un modelo de decisión de adelantamiento, siguiendo las bases metodológicas de Farah y Toledo (2010). Sin embargo, en este caso, se emplearon datos experimentales para su calibración.

Los autores realizaron un estudio de campo, tal como se ha descrito anteriormente, para evaluar el tiempo hasta la colisión o hueco residual. Este tiempo se correspondía con el transcurrido desde el final de la maniobra (regreso al carril propio) y el cruce con el próximo vehículo opuesto. Este hueco puede ser directamente medido en maniobras completadas, y debía ser estimado en huecos rechazados. Con todo ello, formularon un modelo probit en función de una única variable, el hueco residual al finalizar la maniobra, también definido como tiempo hasta la colisión, como se verá más adelante, y equivalente al margen de seguridad al finalizar la maniobra.

Con los datos de 171 huecos, el modelo arrojó como resultado un valor del hueco residual crítico medio de 3 s.

3.3. Simulación

Alternativamente a la recogida de datos experimentales, muchos de los modelos y análisis que ya se han comentado en anteriores capítulos se basaron en los resultados de simulaciones. Principalmente, se han desarrollado dos tipos de estudios basados en la simulación: los simuladores de conducción y la microsimulación de tráfico.

3.3.1. Simuladores de conducción

Los estudios de campo, cuando son muy extensos, son también muy costosos, tanto en tiempo como en dinero. Una posible alternativa es la utilización de simuladores de conducción. Mediante este procedimiento, un determinado número de conductores se ponen a los mandos de un simulador que trata de imitar la conducción real de un vehículo en una carretera. En los últimos años se han desarrollado muchos simuladores de conducción, que se han aplicado en distintos campos, incluyendo el de la maniobra de adelantamiento.

La simulación de la conducción permite, entre otras cosas, el estudio de distancias de visibilidad de adelantamiento bajo distintas condiciones, así como el estudio del comportamiento de los conductores.

Una de las ventajas, como ya se ha comentado, es la menor necesidad de tiempo. Por lo tanto, es posible estudiar muchas más maniobras con más conductores, en menos tiempo. También son estudios muy flexibles, pues es posible diseñar la carretera que más se ajuste al objetivo del estudio, sin necesidad de que esta exista en localizaciones cercanas. Por último, es posible muy de cerca al conductor durante el experimento y existe la posibilidad de analizar sus reacciones o su comportamiento, además de conocer perfectamente su historial como conductor y las principales variables demográficas.

Sin embargo, el principal inconveniente es que, a pesar de que existen simuladores muy realistas, las condiciones en que se desarrolla el experimento distan mucho de la realidad. El comportamiento de los conductores en el simulador nunca será el mismo que en la carretera. Ello se debe, en gran parte, a la limitación existente en la resolución de las imágenes, que hace difícil apreciar objetos muy lejanos, como es el caso de vehículos que se acercan en sentido opuesto. Además, la falta de riesgo real puede modificar de forma muy significativa el comportamiento de los conductores al adelantar.

A continuación se describen algunos estudios realizados mediante simuladores de conducción.

3.3.1.1. STISIM

STISIM es un simulador interactivo de conducción de la empresa norteamericana Systems Technology Inc. El simulador se puede emplear con fines muy diversos: educativos, como el aprendizaje de la conducción; médicos, como el efecto del cansancio o del alcohol en los conductores, etc.

Diversos investigadores emplearon también este simulador para el estudio de la maniobra de adelantamiento, tal como se ha comentado previamente.

Bar-Gera y Shinar (2005) realizaron un experimento con el simulador STISIM con el objeto de evaluar la tendencia de los conductores a adelantar a otros vehículos. 19 conductores realizan un total de 153 adelantamientos en el simulador.

Farah et al. (2009a) y Farah et al. (2010) llevaron a cabo un estudio sobre el comportamiento de los conductores ante los adelantamientos. Se elaboraron cuestionarios para tratar de establecer

una clasificación socio-económica de los 100 conductores que participan en el experimento, y posteriormente se les hizo conducir por un tramo en el simulador, en el cual debían realizar algún adelantamiento. Estos autores trataron de estudiar el nivel de riesgo asociado a maniobras de adelantamiento completadas. Para ello, estudiaron el indicador definido como “Time to Collision” (*TTC*), es decir, el tiempo transcurrido desde que el vehículo adelantante regresa al carril propio hasta el momento en que se cruza con el vehículo que viene en dirección opuesta.



Figura 3-24. Captura de imagen del simulador STISIM

3.3.1.2. Drive Safety

Drive Safety pertenece a la empresa norteamericana del mismo nombre. Este simulador, igual que el anterior se puede emplear en distintos campos de la ciencia. Drive Safety se instala en un vehículo real, siendo los mandos iguales a los de cualquier vehículo, con el objeto de dotar a la simulación del mayor realismo.

Jenkins y Rillet (2004) realizaron un estudio de la maniobra de adelantamiento, por medio de un experimento con el simulador Drive Safety. El estudio se centró en determinar la influencia de la longitud y características del vehículo adelantado en el tiempo y distancia necesaria para rebasarlo. 30 conductores condujeron por un recorrido con zonas de adelantamiento permitido.

Junto al simulador de conducción, el estudio de Jenkins y Rillet se apoyó en el uso de un modelo microscópico de simulación de tráfico (VISIM) para representar las evoluciones de los demás vehículos que se encuentran en el recorrido virtual del experimento.

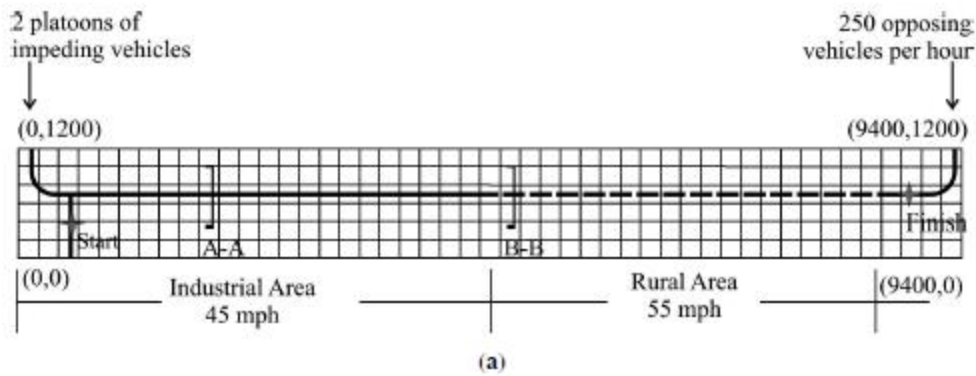


Figura 3-25. Escenario del experimento de Jenkins y Rillet (2004) y capturas de imagen del simulador Drive Safety

3.3.1.3. SHERPA

Este simulador fue desarrollado por el fabricante de coches francés PSA Peugeot-Citroën. Se instala también sobre un vehículo real.

Younsi et al. (2011) realizaron un estudio de la maniobra de adelantamiento por medio del simulador de conducción SHERPA. Los autores estudiaron la evolución del vehículo a lo largo de un adelantamiento, y observaron los movimientos del ojo del conductor gracias a una cámara instalada en el salpicadero del simulador.

Con ello se pretendía estudiar el comportamiento de los conductores cuando adelantan a otro vehículo: trayectoria del vehículo adelantante en cada fase, velocidad de circulación y punto al que mira el conductor en cada instante.



Figura 3-26. Simulador de conducción SHERPA

3.3.1.4. UBC

El simulador UBC (de la University of British Columbia), empleado para la calibración de un modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento (El-Bassiouni y Sayed, 2010), estaba instalado en el interior de un vehículo real. Mediante cinco pantallas se representan 200 grados de campo de visión.

Los autores emplearon este simulador para el cálculo de las cuatro componentes de la distancia de visibilidad de adelantamiento del modelo que planteaban, basado en el de la AASHTO (2004), comentado anteriormente. Para ello, estudiaron los datos de 111 maniobras realizadas por 20 sujetos

3.3.1.5. Dr. Forest

Se trata de un simulador dinámico instalado en la cabina de un coche real. Puede representar movimientos de cabeceo y alabeo, simulando fuerzas de aceleración en los tres ejes. Ofrece un campo de visión de hasta 180°.

Vlahogianni y Golias (2012) y Vlahogianni (2013) estudiaron la probabilidad de adelantamiento y la duración del mismo, respectivamente, a partir de un estudio realizado con este simulador. Sus datos se obtuvieron tras un ensayo con 57 conductores menores de 30 años.

3.3.1.6. CRISS

En 2011, Bella presentó un estudio de la afección del tráfico en el comportamiento adelantante. Para ello, se empleó el simulador de conducción CRISS. En cada maniobra, se registraron la distancia recorrida en el carril izquierdo, el hueco entre el adelantante y el adelantado antes de comenzar la maniobra y el tiempo hasta la colisión en el momento de finalizarla. Las conclusiones de Bella (2011) sugieren que todas las variables registradas decrecen cuando el volumen de tráfico se incrementa. Estas conclusiones fueron avaladas por casi 400 maniobras de adelantamiento.

Las conclusiones indicaron que los modelos generalmente aceptados no pueden validarse con los datos obtenidos en el simulador, pues el efecto de los factores humanos era muy intenso, las trayectorias del adelantamiento no eran simétricas y que todo el proceso se vería afectado por la presencia de tráfico en sentido opuesto.

3.3.2. Microsimulación

Los modelos microscópicos son programas informáticos basados en algoritmos que representan el movimiento de los vehículos considerándolos de forma individual. Los parámetros que se emplean en estos modelos son, por tanto, la velocidad del vehículo, la aceleración, la distancia o tiempo al vehículo anterior, etc.

Los modelos microscópicos se distinguen de los macroscópicos en que estos hacen referencia a flujos de vehículos, considerándolos de forma agregada. Las variables en los modelos macroscópicos son la velocidad media de recorrido, la intensidad y la densidad de vehículos.

Para el estudio de la maniobra de adelantamiento algunos investigadores han empleado recientemente modelos microscópicos. Los modelos macroscópicos, por su mayor escala, borran la evolución de los vehículos con ese nivel de detalle.

La modelización del adelantamiento requiere del empleo de algoritmos específicos, que no todos los programas disponibles poseen actualmente. Además del adelantamiento, el tráfico en carreteras convencionales se regula por modelos de seguimiento (car-following).

Un aspecto común a todos los estudios que emplean modelos de microsimulación es la necesidad de realizar un proceso previo de calibración. Mediante esta técnica se alimenta al modelo con datos observados en la realidad, como es el caso del volumen de tráfico, o sus velocidades de operación, así como la geometría de la vía. Con ello, se ajustan los parámetros del modelo necesarios para que proporcione los mismos resultados que las observaciones, que en este caso, serán descritas por variables que definan el número y tipo de adelantamientos. De esta forma, el modelo representa el fenómeno real observado de forma adecuada, y a partir de este punto, es posible emplearlo para simular distintas situaciones, no necesariamente observadas u observables.

A continuación se comentan algunos estudios relacionados con el adelantamiento de vehículos en carreteras de calzada única, clasificados según el modelo de microsimulación empleado

3.3.2.1. TWOPAS (IHSDM)

El Interactive Highway Safert Design Model (IHSDM) incluye un modelo de adelantamiento dentro del módulo TAM (Traffic Analysis Module, anteriormente llamado TWOPAS). Este modelo se empleó para evaluar velocidades medias de recorrido (ATS) y porcentajes de tiempo en cola (PTSF) (Bessa y Seti, 2011), así como carriles de adelantamiento en tramos en pendiente (Valencia y García, 2010). Harwood et al. (2008) usaron este modelo para demostrar que las zonas de adelantamiento cortas (por debajo de los 240 m) no tienen un efecto significativo en la mejora de la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales. Harwood et al. (2008) no calibraron ni validaron el modelo, asumiendo los valores de los parámetros sugeridos por Harwood et al. (1999).

Algunos autores detectaron limitaciones en el módulo TAM. Según Li y Washburn (2011), este modelo no puede incluir intersecciones en los tramos simulados. Además, según Kim y Eleftheriadou (2010), este modelo no puede simular tráfico mayor a 1700 veh/h, pues se colapsa.

3.3.2.2. CORSIM

Li y Washburn (2011) desarrollaron un modelo de simulación de adelantamientos para el software CORSIM. Este modelo ya incluye las tres etapas del adelantamiento: deseo, decisión y ejecución. El deseo de adelantar depende de la velocidad deseada, velocidad tolerable e impaciencia. Las decisiones de adelantar, y la ejecución del adelantamiento, se simula a partir del modelo del MUTCD (FHWA, 2009). CORSIM puede tener en cuenta las zonas de adelantamiento permitido y prohibido, así como el tráfico opuesto, pero no tiene en cuenta la visibilidad.

A pesar del elevado nivel de detalle del modelo, todavía no se dispone de una calibración y validación en escenarios reales con datos experimentales.

3.3.2.3. Otros modelos

Kim y Elefteriadou (2010) desarrollaron otro modelo de microsimulación para determinar la capacidad de carreteras convencionales. Este modelo asumía un comportamiento homogéneo entre conductores, pues el deseo de adelantar era positivo para cualquier vehículo circulando 8 km/h por debajo de su velocidad deseada. El modelo empleaba los valores de distancia de visibilidad de adelantamiento de la AASHTO (2004). Con ello, se obtuvo un valor de capacidad de 2100 veh/h.

Previamente, Dey et al. (2008) también formuló otro modelo de microsimulación, llamado TWO-SIM. También se empleó para evaluar la capacidad, si bien no se validó con datos experimentales de maniobras de adelantamiento, sino solo con datos de distribuciones de huecos en localizaciones puntuales.

Hegeman et al. (2009) realizó una investigación para establecer criterios de implantación de un sistema de ayuda a la conducción para maniobras de adelantamiento. Para ello, se calibró previamente el modelo RutSim, a partir de los datos procedentes de la observación directa de un tramo de carretera en Holanda. Este modelo procedía del VTI (Tapani, 2005). Estos modelos no se calibraron mediante la comparación de frecuencias de maniobras de adelantamiento u otras medidas de desempeño del tráfico. No obstante, en el modelo RutSim se simuló un sistema de ayuda a la conducción, para comparar la evolución de los vehículos respecto a la situación inicial. De esta forma, los autores estudiaron cómo afecta el sistema a la seguridad vial, evaluando las diferencias con la ayuda de un indicador de conflictividad, tal como se describirá en un capítulo posterior.

Recientemente, Ghods y Saccomanno (2014) han presentado otro modelo de microsimulación, únicamente empleado en sus investigaciones. Este modelo, que ya se ha comentado, se calibró en función del hueco residual crítico o tiempo hasta la colisión. Sin embargo, tampoco se han caracterizado todavía las medidas de desempeño resultantes por lo que el efecto de la maniobra de adelantamiento en el tráfico no puede ser explicado por este modelo.

Otros modelos comerciales ampliamente distribuidos, como VISSIM o Aimsun no incorporan, por el momento, ningún módulo que permita la simulación de maniobras de adelantamiento en carretera convencional.

3.4. Seguridad vial

Una de principales motivaciones del estudio de la maniobra de adelantamiento en carreteras convencionales es el impacto que tiene en la seguridad vial. Tal como se ha comentado, los ac-

cidentes relacionados con adelantamientos pueden tener una gravedad muy elevada. Sin embargo, no existen muchos estudios previos que hayan tratado en particular este problema, comparado con la gran cantidad de modelos y formulaciones.

1.1.1. Análisis de siniestralidad

En España no existe ningún estudio científico reciente sobre la siniestralidad asociada a la maniobra de adelantamiento. No obstante, el Informe anual de Siniestralidad de la Dirección General de Tráfico (Ministerio del Interior, 2012) destacó que el 71% de los accidentes ocurren en carreteras convencionales. Los accidentes se dividieron en este informe, por tipologías, pero no por causas o maniobras relacionadas. Es el caso de colisiones frontales, laterales, salidas de vía, etc. no siendo posible relacionar estos tipos de accidente con causas concretas, como el adelantamiento.

El proyecto TRACE (Traffic Accident Causation in Europe) (Molinero et al. 2008), de la Comisión Europea, que implicó a 21 instituciones de 8 países de la Unión Europea, realizó un análisis profundo sobre las causas de los accidentes de tráfico. En cuanto a la maniobra de adelantamiento, este proyecto analizó las tipologías accidente causado por la maniobra de adelantamiento, a partir de una revisión de la bibliografía existente y de los datos de distintas estadísticas de accidentalidad de cada uno de los países participantes en el proyecto.

Entre los distintos tipos de accidente asociados a maniobras de adelantamiento destacan, basándose también en la clasificación de Clarke et al. (1998) los siguientes:

- El vehículo adelantante impacta contra el adelantado cuando este realizaba un giro a la izquierda (35% de los accidentes).
- Colisión entre el adelantante y el opuesto al realizar el adelantamiento (16%)
- Colisiones en adelantamientos por la derecha (14%)
- Golpe lateral al vehículo al que se estaba adelantando (10%)
- Pérdida de control al completar el adelantamiento (8%)

La gravedad de los accidentes asociados a la maniobra de adelantamiento también se analizó dentro del proyecto TRACE. El adelantamiento es, según Molinero et al. (2008), la maniobra que origina los accidentes de mayor gravedad, de acuerdo a los datos de siniestralidad de España, Reino Unido y Francia. La gravedad se midió, en este estudio, por el indicador KSI (Kill or seriously injured rate), definido como el cociente entre el número de heridos graves y muertes, entre el total de heridos leves, graves y muertes. Los resultados se muestran en la Figura 3-27, en la que se representa la gravedad frente al tipo de accidente.

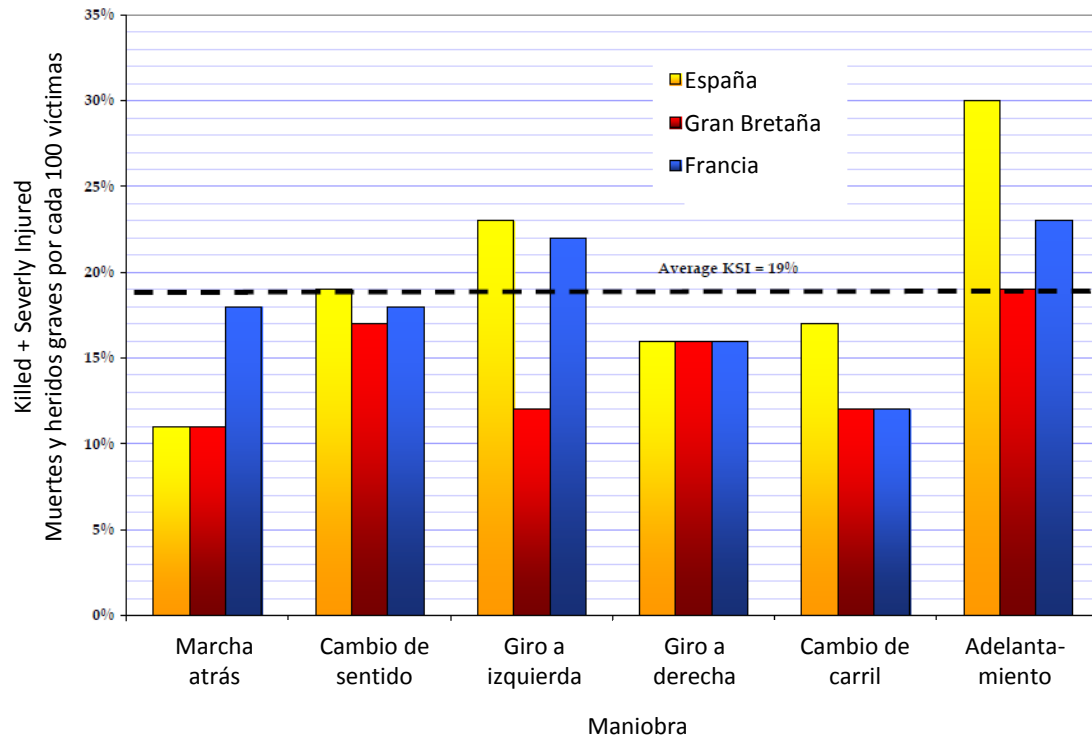


Figura 3-27. Gravedad de los accidentes en función del tipo de maniobra

Por otra parte, el Highway Safety Information System de la Federal Highway Administration (FHWA) realizó en 1994 en Estados Unidos una investigación (FHWA, 1994) sobre la magnitud y gravedad de maniobras de adelantamiento en carreteras convencionales, en tres estados federales A, B y C (no especificados), entre 1985 y 1989.

De acuerdo a los datos de los tres estados, se estimó que tan sólo el 1,3% de los accidentes ocurridos en carreteras convencionales estaba asociado a maniobras de adelantamiento.

Estado	A	B	C	Total
Número total de accidentes	198.185	68.489	100.776	367.450
Accidentes relacionados con adelantamientos	1.516	922	2.325	4.763
Porcentaje sobre el total	0,76%	1,35%	2,31%	1,30%

Tabla 3-26. Frecuencia de accidentes asociados a adelantamientos en carreteras convencionales de EEUU

La identificación de las causas de un accidente no es un proceso sencillo, según los autores de este estudio. De hecho, en el caso de los accidentes asociados a adelantamientos, se distinguieron distintas tipologías de accidente, tal como se muestra en la Tabla 3-27.

Tipo de colisión	Porcentaje %			
	Estado A	Estado B	Estado C	Media
Salida de vía de un vehículo	25,5	34,1	30,7	30,1 %
Lateral con el adelantado	31,9	12,1	31,7	25,3 %
Lateral con el opuesto	8,2	3,1	8,7	6,5 %
Alcance	12,2	25,2	12,2	16,5 %
Frontal	6,7	6,4	6,5	8,6 %
Otras	18,8	10,8	15,1	14,9 %

Tabla 3-27. Tipo de colisión en accidentes asociados a maniobras de adelantamiento en carreteras de EEUU

A pesar de la reducida frecuencia de accidentes asociados a maniobras de adelantamiento, sí que se destacó la gravedad de los mismos, en comparación con accidentes no relacionados con

adelantamiento. El 14% de los accidentes relacionados con maniobras de adelantamiento supuso al menos un muerto o herido grave, frente al 9% de la media de todos los tipos de accidentes.

También Mohaymany et al. (2010) identificaron, empleando árboles de clasificación, que entre las principales razones por las que se incrementaba la gravedad de los accidentes en carreteras convencionales de Irán eran la falta de uso del cinturón de seguridad y la realización de adelantamientos incorrectos.

1.1.2. Técnicas de Conflictos de Tráfico

La baja frecuencia de accidentes dificulta el estudio de la siniestralidad de las carreteras, pues no es habitual disponer de datos de largos periodos de tiempo, y menos aún, conociendo las causas concretas de cada uno de los accidentes producidos.

Por otra parte, en las carreteras se producen, además de los accidentes, todo un conjunto de sucesos o situaciones conflictivas, que son peligrosas, pero en las que no llega a producirse una colisión, y por tanto, mediante el estudio exclusivo de la siniestralidad, no tienen ninguna importancia.

Debido a ambos motivos (la falta de datos, y la existencia de conflictos no contabilizados) aparecieron las Técnicas de Conflicto de Tráfico (TCT). De acuerdo con esta metodología de estudio de la seguridad vial, si se contabilizaran todos los sucesos de tráfico ocurridos en las vías, los accidentes serían una parte muy reducida en frecuencia del total. Las situaciones fuera de peligro, por el contrario, representarían la práctica totalidad de los sucesos.

Entre ambos extremos se encontrarían, sin embargo, toda la serie de sucesos conflictivos que no se tienen en cuenta en estudios de siniestralidad, y que mediante las Técnicas de Conflicto de Tráfico, comienzan a ser estudiados. La Figura 3-28 muestra en forma de pirámide, el concepto anterior. En la punta de la pirámide se sitúan los fenómenos más graves pero poco frecuentes, mientras que en la base se encuentran las situaciones muy frecuentes pero seguras.

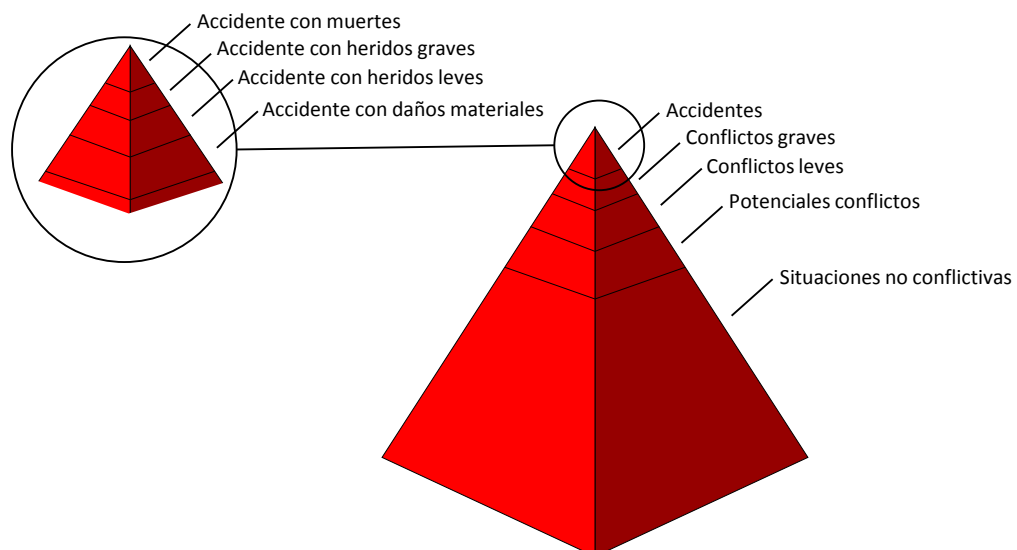


Figura 3-28. Concepto de técnicas de conflicto de tráfico

Mediante las TCT, se ha estudiado la seguridad vial en distintos ámbitos del tráfico por carretera. Para ello, suele definirse un Indicador de Conflicto de Tráfico como un valor agregado de otras variables que mide, de forma objetiva, el grado de peligrosidad de una determinada maniobra.

Aplicaciones frecuentes de las TCT existen en el estudio de intersecciones, pero son menos habituales para estudiar la seguridad de maniobras de adelantamiento.

3.4.1.1. Indicadores de conflicto de tráfico

A continuación se describen algunos de los indicadores de conflicto empleados hasta el momento.

3.4.1.1.1. Tiempo hasta el accidente (TA)

Perkins y Harris 1967 definieron en 1967 el *TA* como el tiempo restante hasta que ocurre un accidente, tomando como base el punto, en tiempo y espacio, en el cual un vehículo toma una acción evasiva. El *TA* se calcula usando valoraciones de velocidad y distancia realizadas por observadores entrenados. Al estar basada en el punto en el cual se realiza una acción, no puede tener en cuenta el tiempo de reacción.

Teniendo en cuenta el valor de *TA*, los conflictos se clasifican en serios y no serios, por medio de una función lineal dependiente de la diferencia de velocidades y de la capacidad de deceleración.

El *TA* es un indicador eficaz de seguridad, pero parte de una estimación de la velocidad y de la distancia, que puede dar lugar a datos erróneos.

3.4.1.1.2. Tiempo hasta colisión (Time to collision) – (TTC)

Hayward (1972) describió este indicador como el tiempo restante para una colisión hipotética que ocurriría si los vehículos implicados mantuvieran su velocidad y trayectoria. Valores pequeños de *TTC* indican una alta probabilidad de colisión.

Mientras el vehículo se va acercando a la colisión, el valor de *TTC* disminuye con el tiempo, por lo que se debe obtener el mínimo *TTC* durante el conflicto. El valor máximo de *TTC* es infinito, y el valor mínimo cero.

TTC es infinito si dos vehículos circulan a velocidad constante, uno detrás de otro, o si dos vehículos circulan en paralelo. Por ello, este indicador no es directamente aplicable cuando no se puede definir un punto de conflicto como el cruce de dos trayectorias.

Además, el *TTC* no tiene en cuenta que, a mayor velocidad absoluta, se requiere mayor tiempo y distancia para decelerar.

3.4.1.1.3. Tiempo de exposición a umbral bajo de TTC (Time exposed TTC) – (TET)

Minderhood y Bovy (2001) sugieren esta evolución del *TTC*, asegurando que es más eficaz para la evaluación de la seguridad vial. El *TTC* se calculaba en una sección específica, mientras que el *TET* se obtiene a partir de un periodo de tiempo.

El indicador mide la duración de la exposición del vehículo a un valor crítico de *TTC*. Puede agregarse, además, para todos los vehículos que pasan por la vía en un periodo mayor de tiempo.

La dificultad que presenta este indicador es la definición del valor umbral de *TTC*, ya que debe adaptarse a cada caso.

3.4.1.1.4. Integral de TTC bajo umbral (Time integrated TTC) – (TIT)

Minderhood y Bovy (2001) también desarrollaron otra evolución del *TTC*. Este nuevo indicador utiliza la integral del perfil de *TTC* a lo largo del tiempo, para expresar el área del mismo que se encuentra por debajo de un umbral.

Se pueden agregar, mediante este indicador, todos los vehículos que circulan por un tramo de la vía, obteniendo así una valoración de la seguridad vial de la misma.

De igual modo que el anterior indicador, el *TIT* presenta el problema de la determinación del *TTC* crítico.

3.4.1.1.5. *TTC* para aproximaciones (Approximate *TTC*) – (α -*TTC*)

Este indicador se calcula como el cociente entre la distancia relativa entre dos vehículos y la diferencia de velocidades entre los mismos. Se puede emplear para estudiar el conflicto de seguimiento, cuando se reduce la distancia de separación entre dos vehículos consecutivos. (Minderhood y Bovy, 2001)

Sin embargo, tampoco es adecuado para representar el conflicto que puede presentarse entre vehículos que circulan a la misma velocidad, pues el α -*TTC* tiende a infinito, en este caso.

3.4.1.1.6. Tiempo tras despejar la zona de conflicto (Post-encroachment time) – (*PET*)

Este indicador mide la diferencia de tiempo entre el momento en que el primer vehículo abandona la zona de conflicto y el momento en el que el segundo vehículo entra en ella.

El *PET* no requiere de una estimación o cálculo de velocidades y distancias, lo que justifica que se trate de un indicador objetivo y fácil de obtener. Requiere la definición de un área de conflicto, y no tiene en cuenta las maniobras evasivas o de frenado que pueden haberse producido antes de la llegada a la zona de conflicto.

3.4.1.1.7. Tiempo de invasión (Enchroachment time) – (*ET*)

ET se define como el tiempo durante el que un usuario sin prioridad está sobre la zona de conflicto. Es un indicador sencillo de obtener, pero requiere de la existencia de una zona de conflicto.

3.4.1.1.8. Tiempo tras despejar la zona de conflicto sin reacción (Initially attempted post-encroachment time) – (*IAPT*)

IAPT se define como el lapso de tiempo calculado entre el momento en el que el primer vehículo abandona la zona de conflicto y el momento en que el segundo vehículo entraría en ella si continúa circulando con la misma velocidad en el instante en que el primero entra en dicha zona (FHWA, 2003b)

Este indicador tiene las mismas ventajas que el *PET*, pero sí tiene en cuenta la posible acción evasiva del segundo vehículo. Sin embargo, tampoco puede aplicarse a casos de seguimiento o en ausencia de una zona de conflicto claramente definida.

3.4.1.1.9. Intervalo (Gap time) – (*GT*)

Se define el *GT* como el tiempo transcurrido desde el momento en que un vehículo que realiza una maniobra de giro sale de la zona de conflicto y el momento en el que un vehículo que continúa recto llega a la zona de conflicto.

3.4.1.1.10. Tasa de deceleración (Deceleration rate) – (*DR*)

DR es la medida de la máxima tasa de deceleración que tiene lugar en la maniobra que evita una colisión (FHWA, 2003). Valores elevados de *DR* indican una alta probabilidad de colisión.

La dificultad de este indicador es la obtención de una medida efectiva de la tasa de deceleración.

De la misma forma que con el *TTC*, fijando un valor crítico de deceleración, es posible obtener los indicadores de tiempo de exposición o integrado bajo una tasa de deceleración crítica.

3.4.1.1.11. Deceleración para tiempo tras despejar la zona de conflicto seguro (Deceleration to safety time) – (*DST*)

Este indicador, similar a *DR*, se define como la tasa de deceleración necesaria para alcanzar una medida de *PET* igual a 0 segundos, es decir, para que el segundo vehículo entre en la zona de conflicto en el momento en el que el primer vehículo la abandona.

3.4.1.1.12. Proporción de distancia de parada (Proportion of stopping distance) – (*PSD*)

Esta medida representa la proporción de distancia disponible para hacer una maniobra de frenado frente a la distancia de parada (FHWA, 2003). Valores superiores a uno indican una situación segura.

3.4.1.1.13. Tiempo hasta cruzar la línea (Time to line crossing) – (*TLC*)

Este indicador se emplea para determinar el *TTC* restante en una situación de conflicto antes de que el vehículo cruce la línea de borde o la de separación de carriles.

3.4.1.1.14. Índice potencial de colisión ante una deceleración de emergencia (Potential index for collision with urgent deceleration) – (*PICUD*)

PICUD es un índice para evaluar la posibilidad de que dos vehículos consecutivos puedan chocar asumiendo que el vehículo principal realiza una maniobra de parada de emergencia.

PICUD es definido como la distancia entre dos vehículos considerados en el conflicto después de la parada de emergencia de ambos. Valores de *PICUD* menores o iguales a 0 indican que la colisión no puede ser evitada.

3.4.1.1.15. Tiempo potencial hasta la colisión (Potential time to collision) – (*PTTC*)

Wakabayashi y Muramatsu (2007) propusieron en 2003 el indicador *PPTC* para evaluar la seguridad del tráfico en un entorno de alta velocidad y congestión. *PPTC* evalúa las consecuencias de una maniobra evasiva o disminución de un vehículo, si el que le sigue no realizara ninguna acción.

3.4.1.2. Aplicaciones a la maniobra de adelantamiento

Hasta la fecha, dentro de las técnicas de análisis de conflictos de tráfico, se han desarrollado gran variedad de indicadores que pretenden reflejar la conflictividad en el tráfico. La mayoría de las *TCT* han sido aplicadas en el estudio de las intersecciones, en situaciones en las que el punto o la zona de conflicto estaban claramente delimitados.

En estas situaciones, indicadores como el *TTC* y sus variantes, o el *PET*, han resultado ser medidas eficaces y adecuadas del nivel de conflictividad o peligrosidad de las intersecciones estudiadas.

Para poder extender estas técnicas a conflictos de seguimiento se han desarrollado otros indicadores, como el *PICUD* o el *PPTC*, que sí son aplicables aún en el caso de no disponer de una zona de conflicto clara, pero manteniendo una tipología de accidente por alcance.

La maniobra de adelantamiento, por sus características, presenta una conflictividad especialmente compleja. Las causas de un conflicto o accidente a lo largo de un adelantamiento son muy diversas. A lo largo del mismo, no existe un punto o zona de conflicto claramente definida, por lo que muchos de los indicadores no son aplicables.

No obstante, algunas investigaciones han empleado el indicador de Time to Collision (*TTC*) para evaluar la conflictividad de las maniobras de adelantamiento. A continuación se muestran algunos ejemplos.

Farah et al. (2009b) realizaron una investigación sobre el comportamiento de los conductores en maniobras de adelantamiento, mediante un simulador de conducción. Los autores estudiaron la peligrosidad de la maniobra de adelantamiento por medio del indicador de conflicto Time to Collision (*TTC*), o tiempo hasta la colisión. Este indicador se definió como el tiempo transcurrido hasta la colisión de dos vehículos, si ambos mantienen constantes las velocidades.

En este caso, se definió desde el instante en el que finaliza el adelantamiento (regreso del vehículo adelantante al carril propio) hasta el momento en que el vehículo adelantante y el opuesto se cruzan, cada uno en su carril.

El cálculo de este parámetro se realizó, en esta investigación, a partir de los datos obtenidos en un simulador de conducción. Este tiempo es, según los autores, un indicador del grado de conflictividad de la maniobra de adelantamiento.

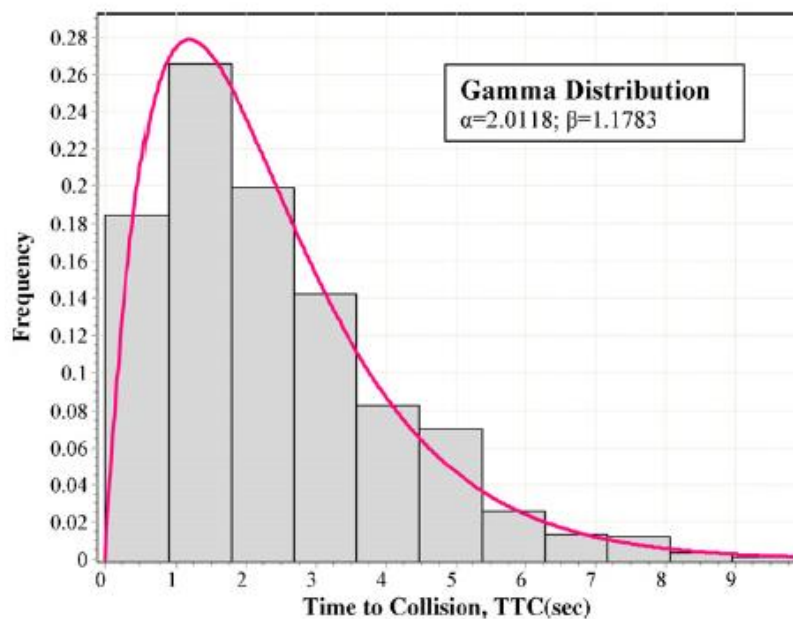


Figura 3-29. Distribución de frecuencias de Time to Collision (Farah et al. 2009a)

La distribución de *TTC*, definido y calculado de la forma anteriormente comentada, que se presenta en la Figura 3-29 se ha comparado con el estudio de campo de Polus et al. (2000) anteriormente comentado, observando que los datos del estudio de campo presentan valores medios del *TTC* más elevados. En concreto, el *TTC* superado por el 50% de los conductores que han realizado adelantamientos era de 2,3 s en el estudio mediante simulador de conducción y de 5,4 s en el estudio de campo. Los autores explican esta diferencia debido a la tendencia de los conductores a asumir mayores riesgos en el simulador que en la realidad.

Como resultado de la investigación, los autores presentaron varios modelos para obtener el indicador *TTC* de un conjunto de maniobras de adelantamiento a partir de distintos factores que caracterizan la carretera y el tráfico.

Otros autores, como Hegeman et al. (2009) utilizaron también este indicador de conflicto para el estudio de maniobras de adelantamiento.

Los autores definieron el *TTC* como el tiempo hasta la colisión si los vehículos mantienen su velocidad constante. De forma adicional, se calculó el tiempo expuesto al *TTC* (*TET*) como la suma del tiempo por debajo de un umbral de *TTC* crítico, y la integral del tiempo bajo el *TTC*,

como el área de la gráfica de *TTC* a lo largo del tiempo, cuando este se sitúa por debajo del *TTC* crítico. El *TTC* crítico se fijó en 3 s basándose en el estudio de Minderhoud y Bovy (2001).

Mediante una simulación realizada en el modelo microscópico RuTSim, anteriormente comentado, se analizó el *TTC*, *TET* y *TIT* asociado a las maniobras de adelantamiento ejecutadas en un tramo de carretera convencional. El estudio se centró en el análisis de un sistema de ayuda a la conducción, que informaba al mismo del riesgo de adelantar si el hueco en el tráfico opuesto era inferior a un umbral.

Para evaluar la posible mejora de la seguridad vial de dicho sistema se compararon los valores de los distintos indicadores de conflicto, calculados a partir de la salida de datos del modelo de microsimulación.

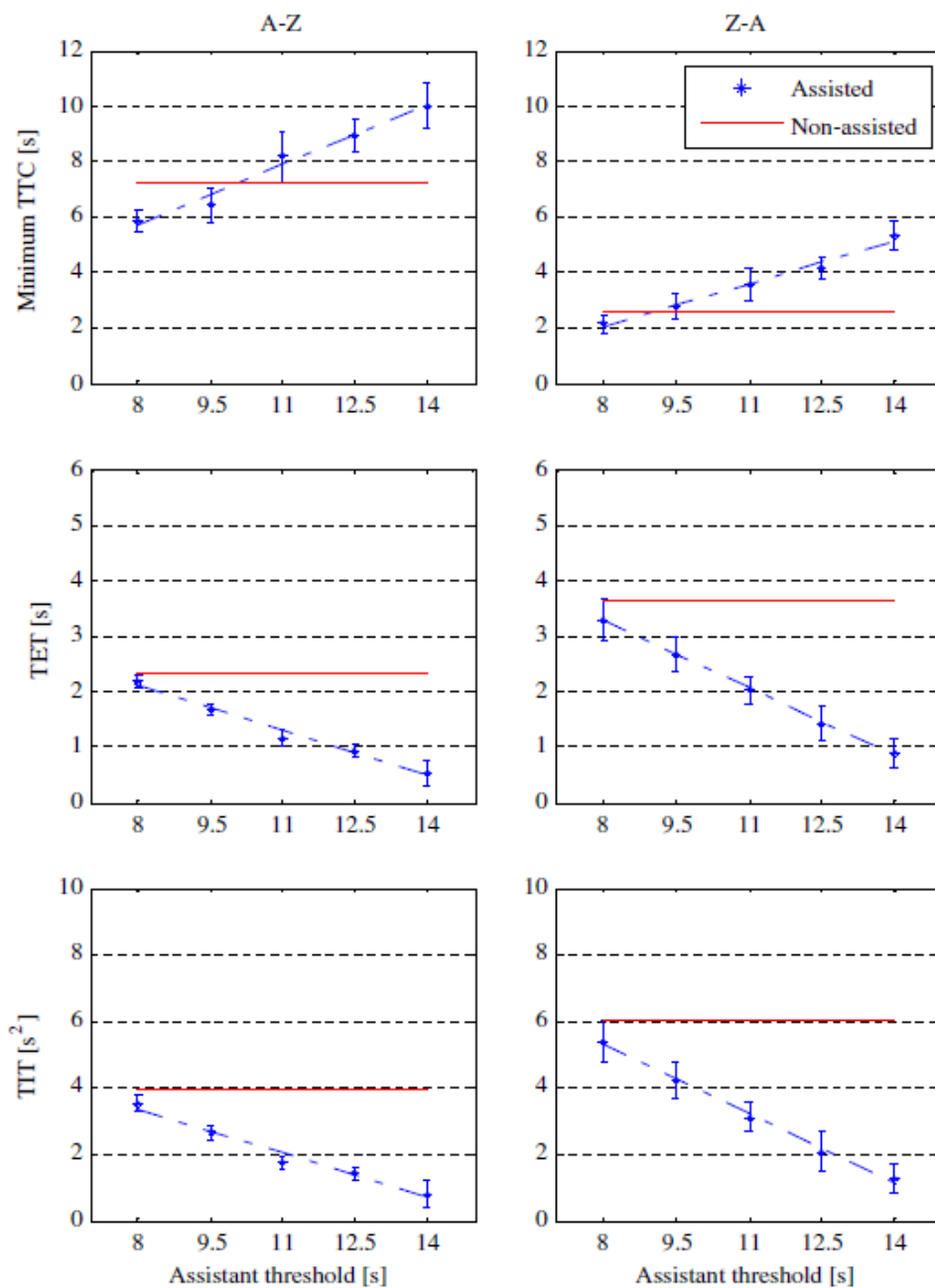


Figura 3-30. *TTC* mínimo, *TET* y *TIT* para distintos umbrales del sistema de ayuda a la conducción (Hegeman et al., 2009)

3.5. Normativas

Los criterios normativos constituyen una serie de normas o recomendaciones técnicas relativas a la maniobra de adelantamiento. Los resultados de modelos teóricos y observaciones se convierten en criterios normativos que deben ser aplicados en el diseño y utilización de las carreteras, de manera que éstas permitan realizar adelantamientos con la frecuencia necesaria y de forma cómoda y segura.

Prácticamente todos los países emplean en sus normativas criterios distintos para diseño geométrico y para señalización de zonas de adelantamiento. En fase de diseño geométrico, lo que se pretende es que la distancia de visibilidad existente o disponible en un punto del trazado supere a la distancia de visibilidad de adelantamiento necesaria, para una determinada velocidad de diseño. Con ello, el objetivo es diseñar carreteras que cuenten con tramos que permitan llevar a cabo el adelantamiento. El objetivo se cumple en mayor o menor grado, en función del porcentaje de tramos en que la distancia de visibilidad supera a la distancia de visibilidad de adelantamiento requerida. Este porcentaje viene regulado o recomendado sólo en algunas normativas.

En el aspecto de la señalización, el objetivo es el establecimiento de la señalización horizontal, es decir, las marcas longitudinales continuas o discontinuas en la calzada, así como la señalización vertical, como las señales de prohibición y fin de prohibición de adelantamiento. La señalización de prohibiciones de adelantamiento se determina igualmente en función de la distancia de visibilidad disponible, pero es habitual que los valores de distancias de visibilidad requeridos por las normativas no coincidan con los correspondientes a la fase de diseño geométrico del trazado.

3.5.1. Criterios normativos aplicables en España

Todos los criterios normativos que son vigentes en España se encuentran recogidos en las Instrucciones de Trazado y de Señalización horizontal y vertical. De forma adicional, el Reglamento General de Circulación establece cuáles son las obligaciones añadidas de los conductores que realizan la maniobra de adelantamiento.

3.5.1.1. Instrucción 3.1-IC: "Trazado"

La Instrucción de trazado (Ministerio de Fomento, 2000) incluye el criterio aplicable para la fase de diseño geométrico. Define la "Distancia de adelantamiento" como la distancia necesaria para que un vehículo pueda adelantar a otro que circula a menor velocidad, en presencia de un tercero que circula en sentido opuesto. La Instrucción proporciona los valores de la Tabla 3-28, en función de la velocidad de proyecto.

Velocidad de proyecto V_p (Km/h)	40	50	60	70	80	90	100
Distancia de adelantamiento D_a (m)	200	300	400	450	500	550	600

Tabla 3-28. Distancias de visibilidad de adelantamiento en la instrucción 3.1-IC

A su vez, se define la visibilidad de adelantamiento como la distancia que existe a lo largo del carril por el que se realiza el mismo entre el vehículo que efectúa la maniobra de adelantamiento y la posición del vehículo que circula en sentido opuesto, en el momento en que puede divisarlo, sin que luego desaparezca de su vista hasta finalizar el adelantamiento.

Se considera que, para el cálculo de la visibilidad de adelantamiento, el punto de vista del conductor y el vehículo contrario se sitúan a un metro con diez centímetros (1,10 m) sobre la calzada, y la distancia se medirá a lo largo del eje.

Se procurará obtener la máxima longitud posible en que la visibilidad de adelantamiento sea superior a la distancia de adelantamiento (D_a) en carreteras de dos sentidos en una calzada. Donde se obtenga, se dice que exista visibilidad de adelantamiento y su proporción deseable será del cuarenta por ciento (40 %) por cada sentido de circulación y lo más uniformemente repartido posible

3.5.1.2. Instrucción 8.2-IC: "Señalización horizontal"

Este documento (Ministerio de Fomento, 1987) contiene los criterios necesarios para determinar las zonas de prohibición de adelantamiento, por medio de señalización horizontal. Esta se compone de líneas continuas y discontinuas, así como flechas de retorno en las zonas de preaviso.

Las marcas longitudinales continuas están reguladas en el apartado 3.2.2 de la Instrucción.

Cuando la marca longitudinal se emplee como prohibición de adelantamiento, se iniciará cuando la distancia de visibilidad disponible (con observador y obstáculo a 1,2 m sobre el pavimento y a 1 m del borde interior del carril) sea inferior a la indicada por la Tabla 3-29 para cada velocidad máxima permitida, siendo DVN la distancia de visibilidad necesaria.

Velocidad máxima permitida (Km/h)	40	50	60	70	80	90	100
DVN (m)	50	750	100	130	165	205	250

Tabla 3-29. Inicio prohibición de adelantamiento (y fin prohibición en vías existentes) en la instrucción 8.2-IC

La línea continua finalizará en el punto en el que vuelva a disponerse de la distancia indicada por la Tabla 3-29 (en el caso de vías existentes) o la proporcionada por la Tabla 3-30.

Velocidad máxima permitida (Km/h)	40	50	60	70	80	90	100
DVN (m)	145	180	225	265	310	355	395

Tabla 3-30. Fin prohibición de adelantamiento en vías de nuevo Trazado en la instrucción 8.2-IC

Cuando entre dos prohibiciones de adelantamiento exista un tramo con una longitud inferior a la proporcionada por la tabla 32, se unirán ambas prohibiciones. Es deseable, además, que en vías de nuevo trazado las zonas de adelantamiento permitido tengan una longitud de al menos la proporcionada en la Tabla 3-31.

Velocidad máxima permitida (Km/h)	40	50	60	70	80	90	100
Distancia entre marcas DM (m)	160	200	245	290	340	385	435

Tabla 3-31. Distancia entre marcas viales continuas (vías de nuevo trazado) en la instrucción 8.2-IC

Si de la aplicación de lo anterior resultara una proporción de tramos con prohibición de adelantamiento excesiva, se tendrá que reconsiderar la velocidad máxima permitida de la carretera.

En aquellos lugares en los que la calzada se estreche y se llegue a carriles de ancho inferior a 3,25 m, se prohibirá el adelantamiento en el sentido de la convergencia.

En los apartados 3.1.6 y 3.5.4 se define la zona de preaviso de proximidad de iniciación de una prohibición de adelantamiento, mediante marcas longitudinales discontinuas y flechas de retorno.

La zona de preaviso comienza cuando deja de disponerse una visibilidad dada por la Tabla 3-32.

Velocidad máxima permitida (Km/h)	40	50	60	70	80	90	100
Distancia de visibilidad DN (m)	185	230	270	310	350	390	435

Tabla 3-32. Visibilidad al comienzo de la zona de preaviso en Instrucción 8.2-IC

Y la longitud mínima de la zona de preaviso viene dada por la Tabla 3-33.

Velocidad máxima permitida (Km/h)	40	50	60	70	80	90	100
Longitud mínima L (m)	95	115	135	155	175	190	215

Tabla 3-33. Longitud mínima de la zona de preaviso en la instrucción 8.2-IC

3.5.1.3. Instrucción 8.1-IC: "Señalización vertical"

Por último, esta instrucción (Mnisterio de Fomento, 2014) establece como señalización vertical las señales de prohibición de adelantamiento R305, fin de prohibición de adelantamiento R502 y de la misma forma, pero sólo aplicable a vehículos pesados, las señales R306 y R503.

Las señales de prohibición de adelantamiento y fin de prohibición R305 y R502 se colocan allí donde empiezan o acaban las zonas de adelantamiento prohibido y permitido, de acuerdo con lo que determina la Instrucción 8.2-IC sobre marcas viales.



Figura 3-31. R305



Figura 3-32. R306



Figura 3-33. R502



Figura 3-34. R503

En la Figura 3-35 se muestra la señalización típica de una zona de adelantamiento, de acuerdo con la instrucción de señalización horizontal (marcas viales) y la de señalización vertical (señales verticales). Se incluyen además, las zonas de preaviso señalizadas mediante flechas sobre la calzada.

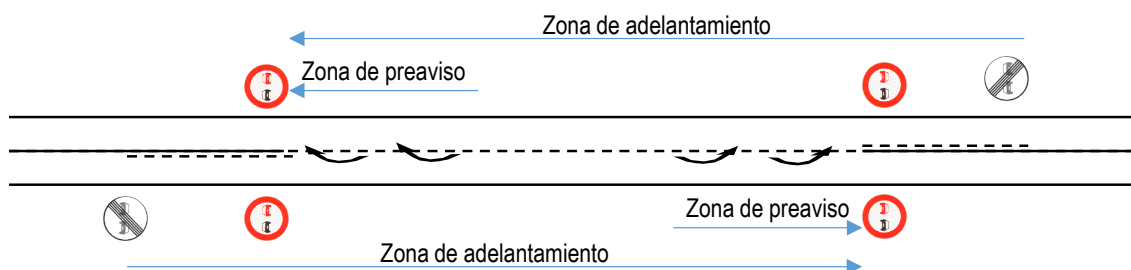


Figura 3-35. Señalización vertical y horizontal de adelantamiento según la normativa española

3.5.1.4. Reglamento General de Circulación

Fuera del ámbito de las Instrucciones de Carreteras que se han comentado, se encuentra el Reglamento General de Circulación (RGC) (Ministerio del Interior, 2003).

El RGC pertenece a la Legislación y contiene las normas a seguir por parte de titulares y usuarios de las vías.

En el ámbito de la maniobra de adelantamiento, el Reglamento General de Circulación recoge los siguientes aspectos, la mayor parte de ellos en el capítulo VII (Artículos 82 y siguientes), dedicado al adelantamiento:

- En el artículo 51 se establecen la velocidad máxima permitida durante el adelantamiento en 20 km/h por encima de la máxima de la carretera, siempre que ésta transcurra fuera de suelo urbano y se esté adelantando a otros vehículos que circulen a una velocidad inferior a la máxima permitida.
- El artículo 82 establece, como norma general, el adelantamiento por la izquierda.
- El artículo 84 trata las obligaciones del vehículo adelantante antes de iniciar la maniobra:
 - Comprobar que existe suficiente espacio para llevar a cabo la maniobra en condiciones de seguridad.
 - Preferencia del vehículo precedente, en caso de que éste ya haya iniciado el adelantamiento.
 - Prohibición de adelantar a un vehículo que ya esté adelantando, si para ello se invade el carril contrario.
 - Obligación del conductor de cerciorarse de que el vehículo que le sigue no ha iniciado el adelantamiento.
 - Necesidad de señalizar la maniobra.
- El artículo 85 trata sobre las obligaciones del vehículo adelantante durante la ejecución de la maniobra:
 - Debe alcanzar una velocidad claramente superior al adelantado y guardar la separación lateral necesaria.
 - Si se producen circunstancias que puedan dificultar el adelantamiento, debe disminuir la velocidad rápidamente, y regresar a su carril.
 - Debe regresar al carril tan pronto le sea posible y sin interferir en el resto de vehículos.
- El artículo 86, sobre obligaciones del adelantado:
 - Debe de ceñirse a la derecha de la calzada, en la medida de lo posible,
 - Se le prohíbe aumentar la velocidad o efectuar maniobras que entorpezcan el adelantamiento. El conductor del vehículo no está obligado a disminuir su velocidad en caso que observe alguna dificultad en el adelantante, si bien debe facilitarle su vuelta al carril.
- El artículo 87 señala que las prohibiciones de adelantamiento afectan a curvas, cambio de rasante, intersecciones, y en general, situaciones con limitaciones a la visibilidad.

3.5.2. Criterios normativos aplicables en el extranjero

El siguiente análisis de normativas extranjeras aplicables al diseño geométrico y a la señalización de carreteras para maniobras de adelantamiento se basa en el estudio de Harwood et al. (1998)

3.5.2.1. Diseño geométrico

Cada normativa definirá una distancia de adelantamiento diferente, que puede identificarse en la Figura 3-36.

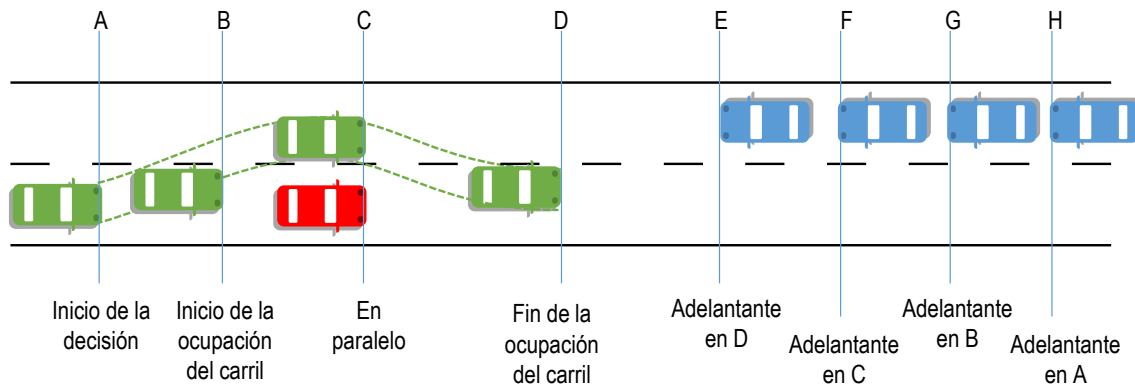


Figura 3-36. Fases de la maniobra de adelantamiento para la comparación de normativas internacionales

En la figura, cada letra representa el punto en que se empieza o acaba una determinada fase de la maniobra de adelantamiento:

- *A*: El conductor inicia la decisión de adelantar.
- *B*: El vehículo adelantante comienza a invadir el carril contrario.
- *C*: El vehículo adelantante alcanza la posición crítica o la posición en paralelo.
- *D*: El vehículo adelantante completa su regreso al carril propio.
- *E, F, G* y *H* corresponden a los puntos en los que el vehículo opuesto se encuentra cuando el adelantante está en *D, C, B* y *A*, respectivamente.

A continuación se desarrollan los distintos criterios que se emplean en las normativas internacionales.

3.5.2.1.1. Estados Unidos

Hasta 2011, se emplea el criterio basado incluido en la anterior edición de la guía de diseño de la AASHTO (2004), ya descrito. Este modelo consideraba la distancia *AF* de la figura.

Sin embargo, desde 2011 (AASHTO, 2011), se adaptaron los valores al MUTCD (FHWA, 2009) a raíz de los resultados del estudio experimental de Harwood et al. (2008). El nuevo modelo considera la distancia *CF*, aproximadamente.

3.5.2.1.2. Canadá

Emplea un criterio idéntico al de Estados Unidos, si bien algunas cifras difieren por el cambio en las unidades y el redondeo aplicado.

3.5.2.1.3. Reino Unido

La normativa británica define dos distancias de adelantamiento distintas: la “Full Overtaking Sight Distance” (*FOSD*), requerida para iniciar un adelantamiento y equivalente a la distancia *BG* de la figura; y la “Abort Sight Distance” (*ASD*) que marca el punto en que deja de disponerse la visibilidad necesaria y se aproxima por la distancia *CF* de la figura o bien por la mitad de la *FOSD*.

3.5.2.1.4. Australia

Se aplica igual que la británica, y se definen para ello las dos distancias siguientes: la “Establishment Sight Distance” (*ESD*) y la “Continuation Sight Distance” (*CSD*). Se corresponderían con las distancias *AH* y *CF* de la figura. La diferencia con la normativa británica se encuentra en considerar además el periodo inicial de percepción, reacción y decisión.

3.5.2.1.5. Nueva Zelanda

Define el concepto de "Overtaking Sight Distance" (*OSD*) como la distancia necesaria para llevar a cabo un adelantamiento. La *OSD* debe estar disponible en intervalos razonables a lo largo de la carretera. La normativa no proporciona valores para la *OSD*.

Sin embargo, la normativa dice que es suficiente para adelantar disponer de la "Intermediate Sight Distance" (*ISD*), una distancia inferior a la *OSD* que proporcionan la mayoría de modelos, para completar con éxito un adelantamiento. La *ISD* se calcula como el doble de la distancia de visibilidad de parada de un vehículo que circula a la velocidad de diseño. Es decir, la distancia de visibilidad de parada de dos vehículos que se acercan en sentidos opuestos.

3.5.2.1.6. Alemania (FGSV, 1996) y Grecia

Se basan en un modelo en el que el vehículo opuesto circula a la v_{85} , el adelantado circula al 85 por ciento de la v_{85} y el adelantante al 110 por ciento de la misma. La normativa no detalla este modelo, únicamente proporciona los valores correspondientes. La distancia obtenida representa la distancia *BG* de la figura.

3.5.2.1.7. Austria

Emplea el mismo criterio que Alemania, pero a partir de la velocidad de diseño.

3.5.2.1.8. Italia

Se calcula mediante la expresión $D_a = 5,5 \cdot V_d$.

Esta expresión se obtiene a partir de un modelo que considera tres fases del adelantamiento:

- Recorrido del vehículo adelantante desde el inicio de la maniobra hasta que su parte delantera coincide con la trasera del adelantado. Se emplearían siempre 4 s.
- Recorrido del vehículo adelantante desde la posición inicial hasta que la parte trasera coincide con la delantera del adelantado. Depende de las longitudes de los vehículos y de la diferencia de velocidades, si bien se asume que duraría 2 s.
- Recorrido del adelantante desde la posición anterior hasta completar la maniobra. Se emplearían para ello siempre 4 s.

La distancia de visibilidad de adelantamiento es la suma de las 3 distancias recorridas por el vehículo adelantante, y las recorridas por el vehículo opuesto en ese tiempo. Ambos circulan a la velocidad de diseño v_d en el punto de la carretera considerada.

3.5.2.1.9. Suiza

La distancia de visibilidad de adelantamiento se calcula suponiendo que el adelantamiento dura entre 8 y 10 segundos, independientemente de la velocidad.

3.5.2.1.10. Francia

La distancia requerida no depende de la velocidad y toma el valor mínimo de 500 m.

La Tabla 3-34 resume todos los criterios ya comentados.

País	Velocidad referencia	Velocidad (km/h)								
		40	50	60	70	80	90	100	110	120
EEUU (2004)	V_d	270	345	410	485	540	615	670	730	775
EEUU (2011)	V_d	140	160	180	210	245	280	320	355	395
Canadá	V_{85}	290	350	410	490	550	610	680	730	800
Reino Unido (FOSD)	V_{85}		290	345	410			580		
Reino Unido (ASD)			145	170	205			290		
Australia (ESD)	V_{85}		330	420	520	640	770	920	1100	1300
Australia (CSD)			165	205	245	300	360	430	500	600
N. Zelanda	V_d	60	80	110	150	190	280	340	420	500
Alemania	V_{85}			475	500	525	575	625		
Grecia	V_{85}			475	500	525	575	625		
Austria	V_d			400		525		650		
Italia	V_d	220	275	330	385	440	495	550		
Suiza	V_d			450	500	550	575	625		
Francia	V_d			500	500	500	500	500		
España	V_d	200	300	400	450	500	550	600		
Mínimo		60	80	110	150	190	280	340	420	500
Máximo		290	350	500	520	640	770	920	1100	1300
Rango		230	270	390	370	450	490	580	680	800

Tabla 3-34. Distancias de visibilidad de adelantamiento en criterios de diseño (m)

Por otra parte, y como ya se ha comentado, la distancia de adelantamiento debe estar disponible en una proporción determinada de los tramos de carretera, si se desea que en ellos la calidad de la circulación sea la adecuada. Sólo algunos países establecen criterios a este respecto, como se observa en la Tabla 3-35.

País	Tipo de criterio	Porcentaje de Zonas con adelantamiento permitido
España	Recomendación	40%, lo más uniforme posible
Alemania	Obligación	25% por sentido, como mínimo
Grecia	Obligación	25% por sentido, como mínimo

Tabla 3-35. Porcentajes de zonas con posibilidad de adelantamiento en distintas normativas

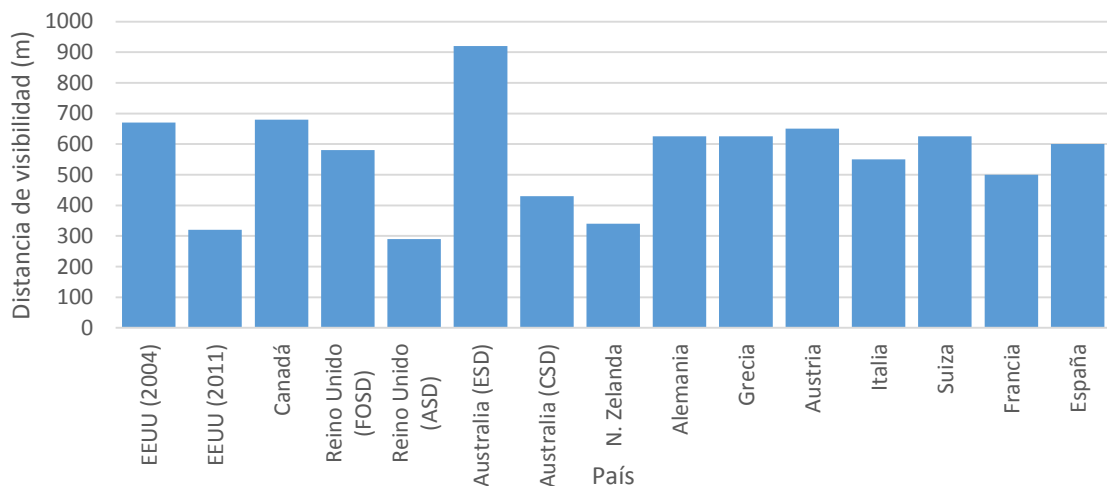


Figura 3-37. Comparación de criterios de diseño geométrico a 100 km/h

3.5.2.2. Señalización de prohibiciones de adelantamiento

La señalización de las zonas de adelantamiento se compone de las marcas viales continuas y discontinuas y de las señales verticales a los lados de la calzada. Se basa también en la visibilidad disponible en cada punto de la calzada.

Lo habitual es que el adelantamiento no esté permitido más allá del punto en el que comienza la prohibición, pese a que, en muchos casos, se dispone en ese punto aún de la visibilidad suficiente para completar muchos adelantamientos. Ello proporciona un margen de seguridad importante.

Además de las distancias de visibilidad necesarias para establecer las zonas de prohibición de adelantamiento, algunas normativas, como era el caso de la española, indican criterios adicionales que limitan la longitud mínima de las zonas de adelantamiento permitido o prohibido.

A continuación se analizarán los criterios para establecer las prohibiciones de adelantamiento en distintos países:

3.5.2.2.1. Estados Unidos

El criterio empleado es el del Manual on Uniform Traffic Control Devices (FHWA, 2009) Las zonas de prohibición de adelantamiento se señalizan allí donde no se disponen las distancias de visibilidad que el manual proporciona en función de la v_{85} . En la mayoría de estados no es posible completar el adelantamiento más allá del inicio de la prohibición.

Como criterio adicional, se fijan las longitudes mínimas para los tramos de adelantamiento permitido en 120 m, independientemente de la velocidad de diseño.

El MUTCD se basa en un modelo que no representa exactamente ninguna situación de adelantamiento, sino un compromiso subjetivo entre adelantamientos lanzados y adelantamientos que parten del seguimiento.

3.5.2.2.2. Australia

Tampoco permite continuar la maniobra de adelantamiento más allá del comienzo de la prohibición, pero extiende este punto hasta aquel en que se dispone la mitad de la distancia CSD, que se ha definido en el apartado de criterios de diseño.

Además se introducen limitaciones a la longitud de las zonas tanto de adelantamiento permitido como prohibido, en función de la v_{85} .

3.5.2.2.3. Alemania, Austria y Grecia

Se establecen las prohibiciones de adelantamiento en aquellos tramos en los que deja de disponerse el doble de la distancia de visibilidad de parada, para la velocidad v_{85} de la carretera.

Los valores empleados en los criterios de señalización se resumen en la Tabla 3-36.

País		Velocidad (km/h)								
		40	50	60	70	80	90	100	110	120
EEUU		140	160	180	210	245	280	320	355	395
Canadá			160	200	240	275	330	400		
Reino Unido			90	105	125			185		
Australia			150	180	210	240	270	300		
Alemania				130	170	220	280	340		
Grecia				130	170	220	280	340		
Austria				140	180	240		370		
España	Inicio prohibición	50	75	100	130	165	205	250		
	Fin prohibición*	50	75	100	130	165	205	250		
	Fin prohibición**	145	180	225	265	310	355	395		
Mínimo		50	75	100	125	165	205	185	355	395
Máximo		145	180	225	265	310	355	400	355	395
Rango		95	105	125	140	145	150	215	-	-
*: carreteras existentes										
**: carreteras de nuevo trazado										

Tabla 3-36. Distancias de visibilidad (m) de adelantamiento en criterios de señalización

En cuanto a las longitudes mínimas de las zonas de adelantamiento, algunas normativas plantean los criterios que se observan en la Tabla 3-37.

País		Velocidad (km/h)								
		40	50	60	70	80	90	100	110	120
EEUU (2004)	Mínima long. permitido	120								
EEUU (2011)	Mínima long. permitido	120	180	210	240	240	240	240	240	240
Australia	Mínima long. permitido		125	150	175	200	225	250		
	Mínima long. prohibido		75	90	105	120	135	150		
Canadá	Mínima long. permitido		120	160	200	240	280	320	360	
	Mínima long. prohibido		100	150	150	150	150	150	150	
España	Mínima long. permitido*	50	75	100	130	165	205	250		
	Mínima long. permitido**	160	200	245	290	340	385	435		
*: vías existentes										
**: vías de nuevo trazado										

Tabla 3-37. Longitudes mínimas (m) de zonas de adelantamiento prohibido o permitido

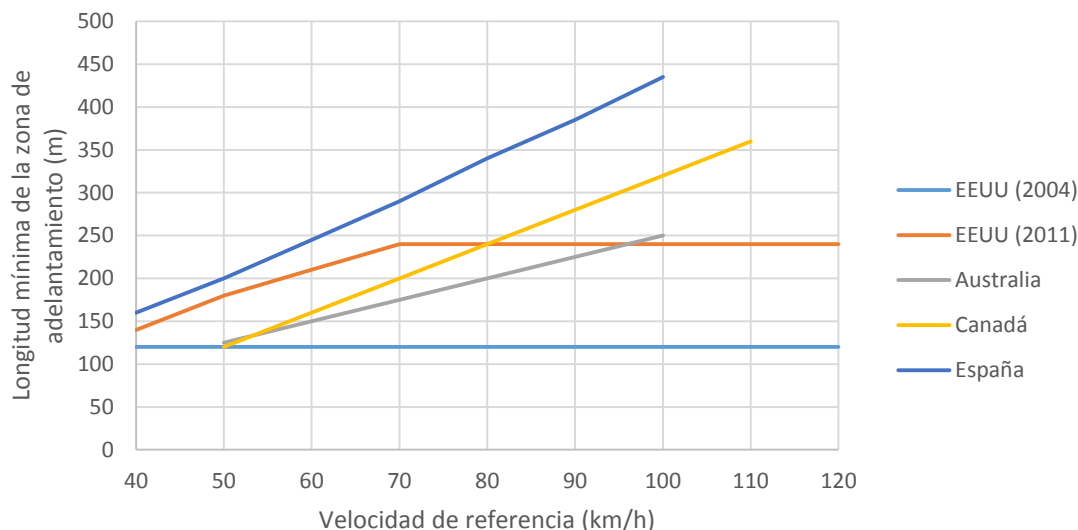


Figura 3-38. Comparación de longitudes mínimas de la zona de adelantamiento permitido

3.5.2.3. Comparación entre alturas para la medida de la distancia de visibilidad

Las distancias de visibilidad se obtienen por distintos procedimientos en la fase de diseño de una nueva carretera, o para determinar la visibilidad de una carretera ya construida.

Un factor muy importante a considerar en este estudio de la visibilidad disponible es la altura del observador y del obstáculo. Los países en sus normativas indican valores de estas alturas ligeramente distintos.

Ninguna de las normativas consultadas considera la altura del objeto observado como la altura real de un vehículo situado en el carril contrario. Según Ortega y García (2000), el valor de altura de vehículos superado por sólo el 10% de los vehículos es de 1,35 m, valor superior a los propuestos en la anterior tabla.

La diferencia en altura de vehículo observado podría tener efecto en el caso de limitaciones de visibilidad en acuerdos convexos de parámetros muy elevados.

País	Altura vista conductor (m)	Altura del objeto observado (m)
Alemania	1,00	1,00
Australia	1,15	1,15
Austria	1,00	1,00
Canadá	1,05	1,05
EEUU	1,08	1,08
Grecia	1,00	1,00
Reino Unido	1,05	1,00
España (trazado)	1,10	1,10
España (señalización)	1,20	1,20

Tabla 3-38. Alturas de conductor y objeto para el cálculo/medición de la visibilidad de adelantamiento

3.6. Conclusiones del estado del arte

Una vez revisado el estado del arte, se encontraron las siguientes conclusiones, que abren la puerta al inicio de una investigación en algunos campos relacionados con la maniobra de adelantamiento en carreteras convencionales.

3.6.1. Observaciones

Tal como se ha analizado, los estudios más relevantes sobre la maniobra de adelantamiento en carreteras convencionales emplearon metodologías basadas en grabación de videos. Principalmente, se abordó la toma de datos desde dos puntos de vista: la observación de maniobras desde puntos fijos situados en el exterior de la carretera (normalmente en puntos altos) y la grabación de maniobras desde vehículos equipados con cámaras de video (que circulaban a modo de vehículo lento adelantado). No obstante, ninguno de los estudios emplearon ambas técnicas de grabación en las mismas localizaciones, y ni siquiera en las mismas áreas geográficas.

Otra de las características comunes de la mayor parte de estudios experimentales es el reducido tamaño de las muestras recogidas, a excepción de Polus et al. (2000). En este sentido, hay algunos estudios que apenas alcanzaron 100 maniobras de adelantamiento (Carlson et al., 2006, Hegeman et al., 2008), estando además repartidas en localizaciones muy diversas. Incluso el estudio de Harwood et al. (2008) analizó 367 maniobras, pero repartidas en más de 28 zonas de adelantamiento. Estos planteamientos dificultaron en gran medida el análisis de la influencia de factores relacionados con la geometría de la carretera.

Además, en los estudios basados en grabaciones desde puntos fijos destaca la dificultad para procesar la totalidad de los datos obtenidos, debido, principalmente, a la falta de resolución en las cámaras, o al bloqueo de la visión de un vehículo por parte de otro. Además, todos los estudios que realizaron medidas de distancias a partir del video lo hicieron empleando métodos de restitución geométrica. Estos procedimientos requieren mucho tiempo de procesado de datos, y su precisión no está verificada en la mayor parte de casos.

Los estudios revisados han analizado, principalmente, maniobras de adelantamiento. Los resultados, en cuanto a trayectorias, velocidades o tiempos de recorrido, son muy dispersos, lo que sugiere que puede existir cierta dependencia de la metodología en los resultados, pero sobre todo una dispersión muy elevada en cuanto al área geográfica de los conductores.

Las principales variables consideradas para el estudio de los adelantamientos fueron la ocupación del carril contrario (caracterizada por un tiempo y una distancia recorrida), así como los huecos existentes entre el vehículo adelantado y el adelantante, tanto al inicio como al final de la maniobra. Además, todos los autores coinciden en establecer clasificaciones de las maniobras de adelantamiento en lanzados o en seguimiento, simples o múltiples, etc.

Dentro de este ámbito, algunos autores identificaron factores con una influencia muy significativa, como el tipo de vehículo adelantado (Polus et al., 2000) observando que al adelantar a un pesado se necesitaba una mayor ocupación del carril izquierdo. Otros factores, como la velocidad, no afectaban de forma clara al tiempo de ocupación (Carlson et al. 2006, Harwood et al 2008), aunque sí a la distancia recorrida en ese tiempo.

Sin embargo, la práctica totalidad de los estudios experimentales se centraron en la ejecución de la maniobra, y no en la decisión de adelantar. Esta decisión corresponde a un proceso de aceptación y rechazo de huecos, ampliamente estudiado en intersecciones, pero escasamente tratado en maniobras de adelantamiento. La medición de huecos en sentido opuesto no ha sido tratada con suficiente profundidad, y por tanto, la formulación de modelos capaces de estimar las distribuciones de hueco crítico (a partir del cual la decisión del conductor es de adelantar) no se ha realizado a partir de datos experimentales, a excepción del reciente estudio de Ghods y Saccomanno (2014). No obstante, ninguna investigación ha analizado los factores de la carretera o el vehículo en estas decisiones, con especial mención a la visibilidad de vehículos opuestos

aproximándose. Además, todos los estudios trataron los datos de forma puntual, centrándose en maniobras o zonas de adelantamiento, pero no en procesos de seguimiento en cola a lo largo de tramos de carretera convencional.

3.6.2. Modelos deterministas

El estudio de los modelos de distancia de visibilidad de adelantamiento puso de manifiesto una dispersión elevada de los valores propuestos. Las diferencias se deben a distintos enfoques, supuestos o planteamientos, pero también a distintas calibraciones de los modelos, según las cuales parámetros que representan lo mismo pueden tomar valores distintos. No obstante, también entre los distintos modelos se identificaron coincidencias, como se irá observando.

El primer modelo analizado, el de Van Valkenberg y Michael (1971), destaca por ser también el primero que introdujo el concepto de la posición crítica. Desde este momento, los modelos siguieron dos enfoques muy diferentes: la utilización o no de la distancia de visibilidad desde la posición crítica. Los modelos que emplean la posición crítica no suelen incluir en la distancia de adelantamiento la parte necesaria para alcanzar dicha posición, pues en esta fase inicial es posible desistir del adelantamiento sin ninguna consecuencia.

No obstante, la posición crítica que introdujo Van Valkenberg y Michael (1971) y que tomaron modelos posteriores no estaba definida de la misma forma en todos ellos. Weaver y Glennon (1972) la definieron como el punto en que los tiempos necesarios para completar y para desistir de la maniobra eran iguales, mientras que Harwood y Glennon (1976) la definieron mediante la igualdad de distancias de visibilidad necesarias, en lugar de tiempos.

Estos autores no calcularon dónde se encontraba la posición crítica, sino que asumen directamente que esta se encontraba en una determinada posición. Lieberman (1982) fue el primero que la calculó analíticamente, para que se igualase las distancias de visibilidad para completar y desistir la maniobra. De esta forma, Lieberman y posteriores autores emplearon el parámetro Δc como la distancia entre las partes delanteras de vehículo adelantado y adelantante, en el momento en que se encontraban en la posición crítica.

La definición de posición crítica igualando distancias de visibilidad fue la que más tarde Glennon (1988) asumieron como correcta. Posteriormente fue revisada por Hassan et al. (1996). Hassan et al. (1996) consideraron improbable que se desista de la maniobra una vez se ha rebasado el vehículo adelantado y afirmaron que la posición crítica se encontraba o bien allí donde las distancias para completar y desistir de la maniobra se igualaban, o bien en la posición en la que los dos vehículos estaban en paralelo; lo que antes ocurriera.

Sin embargo, ningún investigador ha basado la determinación de la posición crítica en datos experimentales, sino únicamente en modelos teóricos que no están validados.

En el otro grupo de modelos, que no proporcionan la distancia de visibilidad necesaria desde la posición crítica, se encuentran el de la AASHTO (2004), o el de Wang y Cartmell (1998). Estos modelos describieron la maniobra completa de adelantamiento desde el momento en que comienza, con el vehículo adelantante en el carril propio y detrás del adelantado. Por ello, proporcionaban distancias más elevadas, ya que la opción de desistir del adelantamiento no estaba contemplada o lo estaba solo en fases muy tempranas de la maniobra.

Otro aspecto en el que los modelos difirieron fue en las velocidades de los tres vehículos implicados en la maniobra: el adelantado, el adelantante y el opuesto. Es especialmente importante la relación que guardan esas tres velocidades entre sí (destacando la diferencia de velocidades

entre adelantado y adelantante, definida como Δv) y con las velocidades de diseño y operación de la carretera. La Tabla 3-39 resume los distintos supuestos de los modelos en cuanto a velocidades de los vehículos afectados en el adelantamiento.

Modelo	Año	Velocidades			
		V_p (adelantante)	V_i (adelantado)	V_o (opuesto)	$\Delta V = V_p - V_i$
Weaver y Glennon	1972	$V_{Diseño}$	$V_{Diseño} - \Delta V$	$V_{Diseño}$	13 a 19 km/h
Harwood y Glennon	1976	$V_{Diseño}$	$V_{Diseño} - \Delta V$	$V_{Diseño}$	16 km/h (constante)
Lieberman	1982	$V_i + \Delta V$	V_{85} o $V_{Diseño}$	V_{85} o $V_{Diseño}$	16 km/h (constante)
Saito y Garber	1984	V_{85}	$V_{85} - \Delta V$	V_{85}	No especificado
Glennon	1988	$V_{Diseño}$	$V_{Diseño} - \Delta V$	$V_{Diseño}$	13 a 19 km/h
Harwood y Glennon	1989	$V_{Diseño}$	$V_{Diseño} - \Delta V$	$V_{Diseño}$	13 a 19 km/h
Rocci	1993	<i>Variable</i>	V_{50}	V_{99}	<i>Variable</i>
Sparks et al.	1993	Valores según datos de campo			14 a 24 km/h
AASHTO	2004	Según $V_{Diseño}$	$V_p - \Delta V$	$= V_p$	16 km/h (constante)
Hassan et al.	1996	$V_{Diseño}$	$V_{Diseño} - \Delta V$	$V_{Diseño}$	13 a 19 km/h
Wang y Cartmell	1998	V_p , V_i y V_o son parámetros de entrada			$V_p - V_i$
Polus et al.	2000	Valores según datos de campo			11 a 15 km/h
Harwood et al.	2008	$V_{Diseño}$	$V_{Diseño} - \Delta V$	$V_{Diseño}$	19 km/h (constante)

Tabla 3-39. Velocidades de los vehículos según distintos modelos teóricos

Muchos modelos asumen que el vehículo adelantante (y a menudo el opuesto) circulaban a la velocidad de diseño de la vía, o la v_{85} cuando los modelos se emplean para señalización de prohibiciones de adelantamiento. En este caso es el vehículo adelantado el que circulaba a una velocidad inferior. No tuvieron en cuenta, por lo tanto, que durante el adelantamiento se podrían exceder las velocidades consideradas habituales para una localización determinada.

La diferencia de velocidades Δv , según algunos autores, fue constante y toma el valor de 16 o 18 km/h. Por el contrario, otros la definieron como variable, decreciendo al aumentar las velocidades de los vehículos adelantante y adelantado y situándose, normalmente, entre los 13 y los 19 km/h.

Además de las velocidades, máximas o medias, se han formulado distintas formas de describir la evolución de la velocidad del vehículo adelantante a lo largo del tiempo. En la Figura 3-39 se resumen distintas posibilidades.

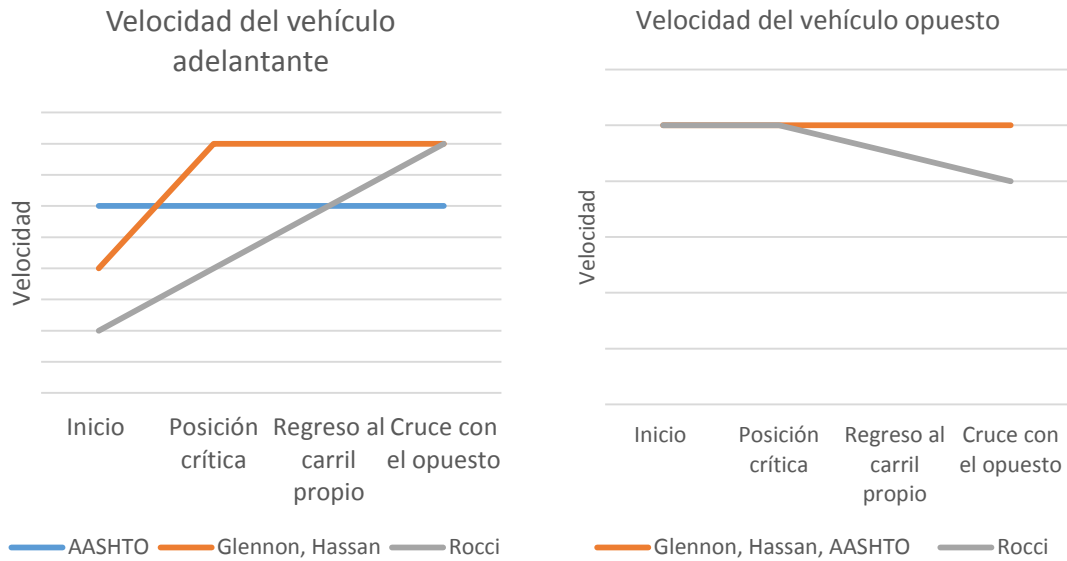


Figura 3-39. Velocidad a lo largo del tiempo de los vehículos adelantante, adelantado y opuesto en distintos modelos

En cuanto al vehículo adelantante, lo habitual es la consideración de un movimiento uniformemente acelerado. Muchos modelos teóricos supusieron que la aceleración concluía una vez alcanzada la posición crítica, excepto algunos, como el de Rocci (1993), que plantearon un movimiento acelerado durante toda la maniobra, o Wang y Cartmell (1998), que fijaron una velocidad objetivo, y hasta que no se alcanzaba se continuaba acelerando. La velocidad del vehículo adelantado siempre se consideró constante. Por último, por lo que respecta al vehículo opuesto, lo habitual fue suponer un movimiento a velocidad constante, excepto en el modelo de Rocci (1993) en el que el vehículo opuesto comenzaba a frenar 3 segundos después de la situación crítica o de decisión.

Otro de los parámetros de entrada de la mayoría de modelos teóricos lo representan las características de los vehículos. Los vehículos vienen descritos por sus longitudes (para el caso de vehículos adelantante y adelantado) y sus capacidades de aceleración y deceleración (para el caso del vehículo adelantante).

Entre los modelos que caracterizaron los vehículos por su longitud están los modelos de Glennon (1988), Rillet et al (1990), Hassan et al. (1996) o Wang y Cartmell (1998). Estos modelos se basaron en las ecuaciones que rigen el movimiento de los tres vehículos que participan en la maniobra, y para su cálculo analítico, era necesario conocer estos datos.

En la Tabla 3-40 se resumen los parámetros que caracterizan a los vehículos, según distintos autores, indicando los valores que proponen los mismos.

Modelo	Año	Longitudes (m)		Aceleración (m/s ²)	Deceleración (m/s ²)
		Adelantante	Adelantado		
Saito y Garber	1984	-	-	-	3
Glennon	1988	4,9 (ligero)	4,9 (ligero)	-	2,4
			33,5 (pesado)	-	-
Harwood y Glennon	1989	4,9 (ligero)		-	2,4 (ligero)
		22,9 (pesado)		-	1,5 (pesado)
Rocci	1993	5	10	0,53	3,9
AASHTO	2004	-	-	entre 0,62 y 0,67	-
Hassan y Easa	1996	5	5 (ligero)	-	-
			25 (pesado)	-	-
Wang y Cartmell	1998	-	-	entre 0,6 y 3,4	-
Harwood et al.	2008	5,8	5,8	-	3,4

Tabla 3-40. Parámetros de los vehículos en distintos modelos

La actitud de los conductores al volante es también un factor que se tiene en cuenta en los cálculos. Para ello se emplearon los parámetros de tiempos de percepción y reacción, o las distancias de seguridad que los conductores del vehículo adelantante guardaban respecto al adelantado o al opuesto.

Estos factores que representan la actitud de los conductores presentan una gran variabilidad, puesto que son difíciles de estimar ya sea analítica o empíricamente. En la Tabla 3-41 se presentan los valores propuestos en distintos modelos.

Modelo	Año	Distancia o tiempo de seguridad adelantante-opuesto, al final	Distancia o tiempo de seguridad adelantante-adelantado, al inicio	Distancia o tiempo de seguridad adelantante-adelantado, al final
Van Valkenberg y Michael	1971	6,1 m	-	-
Liebermann	1982	no especifica valor*	-	no especifica valor*
Saito y Garber	1984	no especifica valor*	-	no especifica valor*
Glennon	1988	1 s (=2·v m)	1 s (=Δv (m))	1 s (=Δv (m))
Rillet et al.	1990	no especifica valor*	1 s (v - Δv (m))	1 s (v - Δv (m))
Rocci	1993	0	6 m	6 m
AASHTO	2004	según V (entre 30 y 90m)	-	-
Hassan et al.	1996	1 s	1 s	1 s
Wang y Cartmell	1998	no especifica valor*	no especifica valor*	no especifica valor*
Polus et al.	2000	125,7 m (valor medio)	7,4 m (valor medio)	21,3 m (valor medio)
*no especifica valor, pero lo introduce como variable explicativa				

Tabla 3-41. Distancias y tiempos de seguridad entre vehículos en distintos modelos

Puede observarse que, incluso habiendo definido un mismo intervalo de tiempo vacío entre el vehículo adelantante y el adelantado (por ejemplo de 1 s), la distancia de seguridad que a partir de ella se calcula no es la misma. Es el caso de los modelos de Glennon (1988), Rillet et al. (1990) o Hassan et al (1996).

En la Tabla 3-42 se muestran los valores propuestos para el tiempo de percepción y reacción.

Modelo	Año	Tiempo de percepción y decisión al inicio de la maniobra	Tiempo de percepción y decisión antes de desistir de la maniobra
Glennon	1988	-	1 s
Hassan et al.	1996	-	1 s
Rocci	1993	3 s	0
Sparks et al.	1993	entre 1 y 3,5 s	entre 1 y 3,5 s
Polus et al.	2000	1,33 s (valor medio)	-

Tabla 3-42. Tiempos de percepción y/o decisión en distintos modelos

En la Tabla 3-43 se resumen todos los modelos analizados.

Modelo	Velocidad referencia	Velocidad (km/h)										Pos.Crit.
		40	50	60	70	80	90	100	110	120		
Van Valkenberg (Regreso voluntario)						355	415	480	540			Sí
Van Valkenberg (Regreso forzado)	Adelantante o V_d					250	300	350	400			Sí
Weaver y Glennon	Adelantante o V_d					346		474	539	610		No
Harwood y Glennon	Adelantante o V_d	175	201	255	313	377	439	508	580	660		No
Liebermann	V_d	200	277	363	455	557	656					No
Saito (posición "head to tail")	V_d		146	195	247	302	360	420				Sí
Saito (posición "abreast")	V_d		102	139	178	220	263	308				Sí
Glennon (Vehículo ligero)			159	190	222	253	283	312	341			Sí
Glennon (Vehículo pesado)	Adelantante o V_d		192	239	285	330	374	418	462			Sí
Harwood y Glennon (ligero a ligero)			161	194	227	260	291	322	352			Sí
Harwood y Glennon (ligero a pesado)			184	226	268	309	350	390	429			Sí
Harwood y Glennon (pesado a ligero)			204	251	297	342	388	434	479			Sí
Harwood y Glennon (pesado a pesado)	Adelantante o V_d		233	289	344	400	455	510	564			Sí
Rilett (ligero a ligero)			247	339	432	546	656					No
Rilett (ligero a pesado)	Adelantante o V_d			349	448	547	655	758				No
Rocci (Lanzado. Completado)		117	131	145	159	174	189	206	222			Sí
Rocci (Seguim. Completado)		132	162	193	225	256	288	319	349			Sí
Rocci (Lanzado Desistido)		88	118	157	198	241	287	337	386			Sí
Rocci (Seguim. Desistido)	V_d	80	103	130	157	184	211	237	263			Sí
AASHTO (2001)	V_d	285	345	410	485	540	615	670	730	775		No
Hassan et al. (Vehículo ligero)			150	195	243	294	360	468	601			Sí
Hassan et al. (Vehículo pesado)	Adelantante o V_d		168	218	271	327	385	468	601			Sí
Wang y Cartmell (Ap baja)		318	378	432	493	538	601	653	707	761		No
Wang y Cartmell (Ap alta)	Diseño	244	289	330	375	412	462	503	547	592		No
Polus et al. (Vehículo ligero)					443	561	674					No
Polus et al. (Vehículo pesado)	Diseño				501	625	747					No
Harwood et al. , MUTCD y AASHTO (2011)	Adelantante o V_d		160	180	210	245	280	320	355			Sí

Tabla 3-43. Resumen modelos teóricos de distancia de visibilidad de adelantamiento (m)

La Figura 3-40 y la Figura 3-41 muestran la diversidad en distancias de adelantamiento de los diferentes modelos analizados. A pesar de la difícil interpretación, se incluyen aquí porque demuestran la elevada dispersión en los resultados. Se presentan por separado los modelos que proporcionan la distancia total y los que lo hacen desde la posición crítica.

Dva desde el inicio del adelantamiento

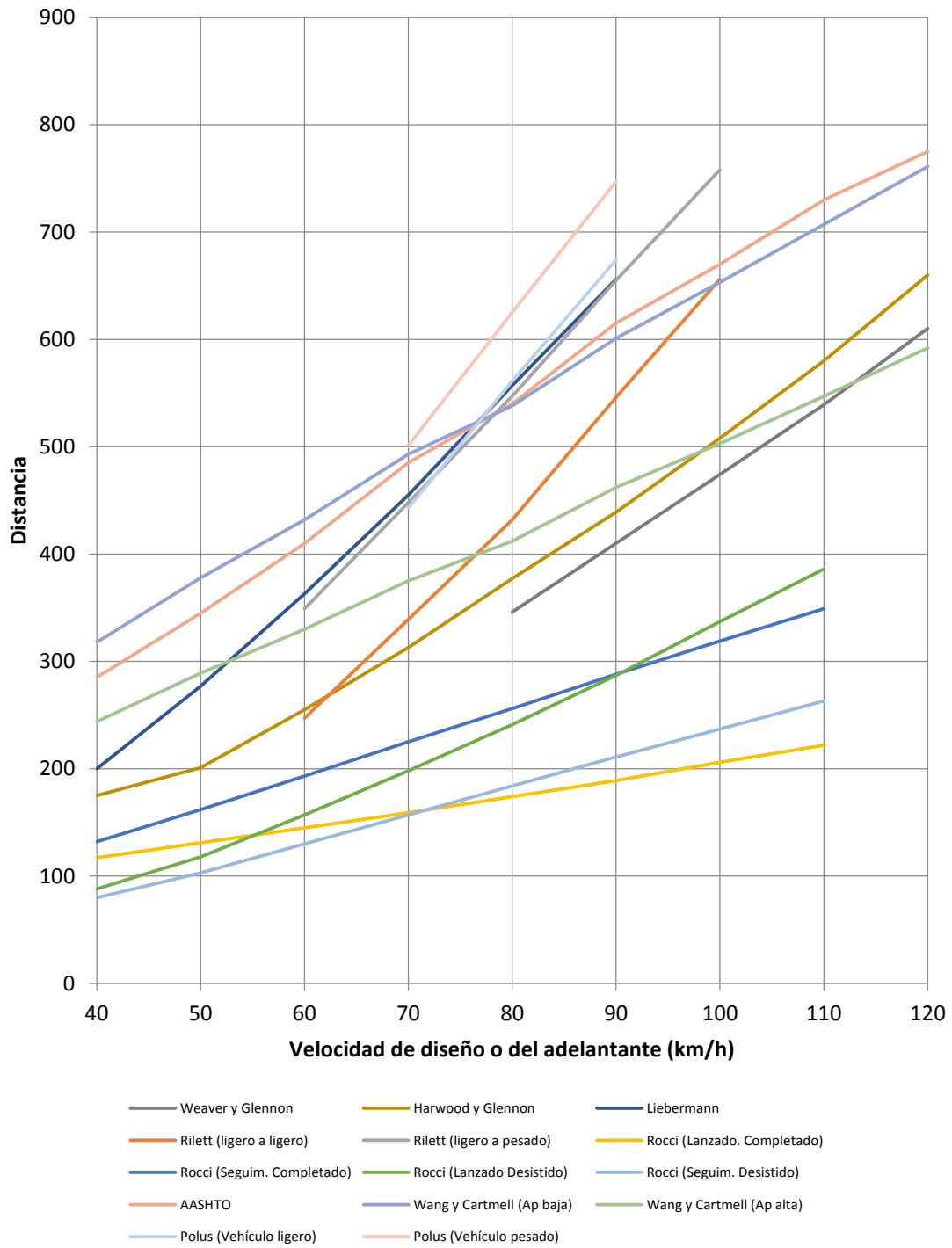


Figura 3-40. Distancia de visibilidad de adelantamiento en función de la velocidad. Distancia para adelantamiento completo

Dva desde la posición crítica

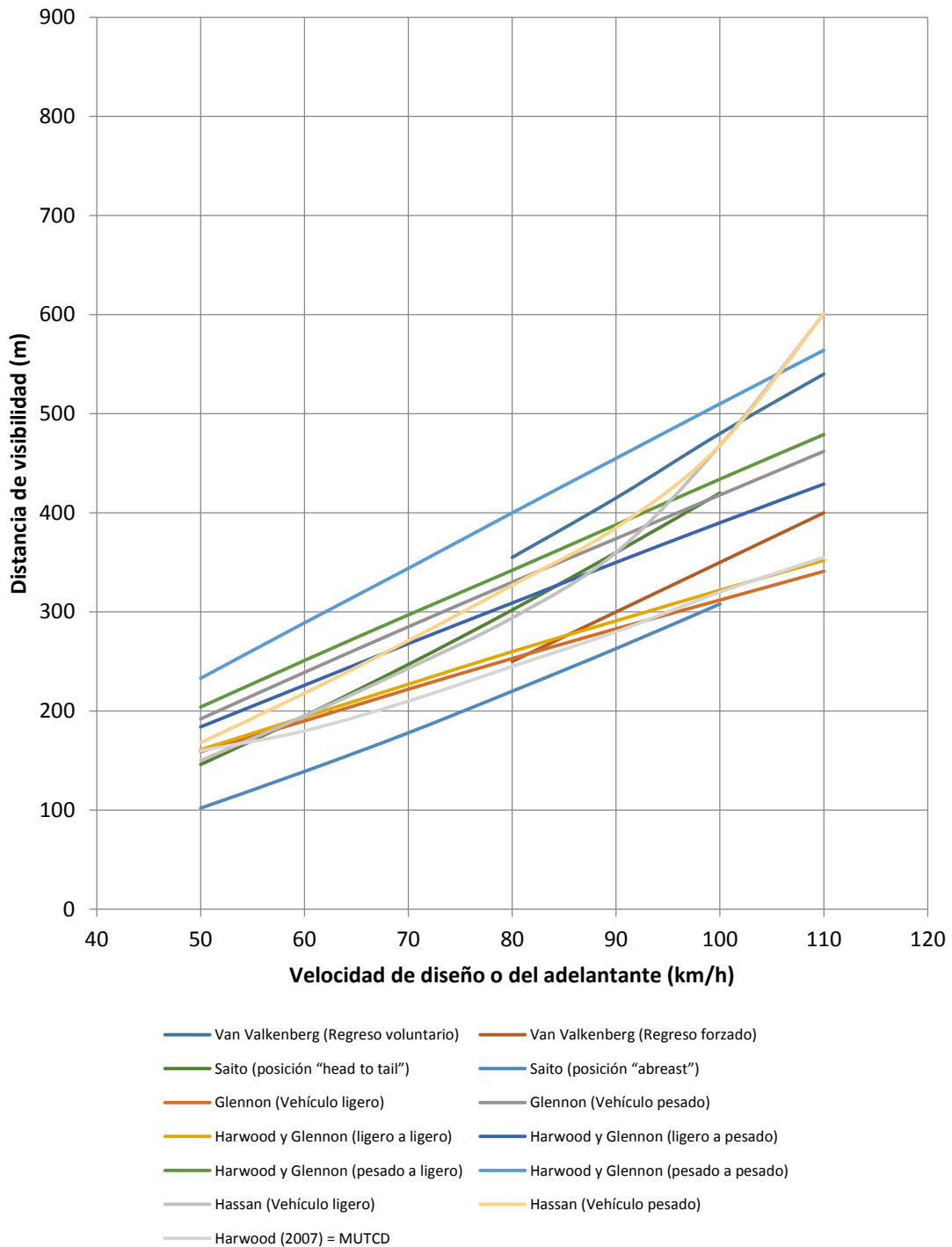


Figura 3-41. Distancia de visibilidad de adelantamiento en función de la velocidad. Distancia desde la posición crítica

3.6.3. Modelos probabilísticos

Frente a la gran dispersión hallada entre los distintos modelos deterministas, los modelos probabilísticos trataron de asociar a la distancia de visibilidad de adelantamiento una probabilidad de ocurrencia determinada. Para ello, todas las formulaciones probabilísticas analizadas se basaron en algunos de los modelos teóricos o empíricos. Sin embargo, se alimentaron de las distribuciones estadísticas de las variables de entrada.

La forma de obtener estas distribuciones es el principal problema en el que, hasta el momento, coincidieron todos los investigadores. Algunos de ellos, como El Khoury y Hobeika (2007) basaron sus resultados en distribuciones de los parámetros de entrada obtenidas de otras investigaciones o guías de diseño en las que no se estudió el adelantamiento. Por ejemplo, las distribuciones de tiempos de percepción y reacción se basaron en la distancia de parada. Otras propuestas, como las de El Bassiouni y Sayed (2010) no se apoyaron en distribuciones de estudios previos, sino que las tomaron de un simulador de conducción con tan solo 20 individuos.

Por último, a pesar de proporcionar una medida numérica del riesgo asociado a cada valor de distancia de visibilidad, ya sea mediante un índice de riesgo (El Khoury y Hobeika, 2007) o mediante la probabilidad de fallo (El Bassiouni y Sayed, 2010), estos resultados no se compararon con medidas objetivas de la seguridad vial, como es el caso de accidentes o conflictos.

3.6.4. Aceptación de huecos

En cuanto a los modelos de decisión de adelantar y de aceptación de huecos en el tráfico opuesto, cabe destacar, en primer lugar, que casi todos ellos se basaron en experimentos realizados mediante simuladores de conducción. De hecho, un gran número de los estudios analizados se basan en el simulador STISIM. Por este motivo, no se tuvo seguridad de la validez de estos planteamientos, puesto que la mayoría de simuladores de conducción no han sido validados, en cuanto a la maniobra de adelantamiento.

Únicamente, Ghods y Saccomano (2014) plantearon un modelo de decisión basado en datos experimentales, si bien el tamaño de la muestra y el número de localizaciones consideradas es muy bajo.

En cuanto a las variables que tuvieron un mayor impacto en aceptación de huecos y en el deseo de adelantar, destacan la diferencia de velocidades entre el adelantado y el adelantante, durante la fase de seguimiento, y el sexo y la edad del conductor. Hasta ahora, no se ha verificado el efecto de estas variables a partir de datos experimentales. Además, tampoco se conoce, por el momento, si la demora acumulada por un excesivo tiempo en cola puede influir en la aceptación de hueco y si la visibilidad del vehículo opuesto (o la ausencia de la misma) tiene un efecto en la forma en que los conductores toman sus decisiones.

3.6.5. Simulación

La simulación se planteó, según numerosos autores, como una alternativa válida para estudiar el fenómeno del adelantamiento. Principalmente, los simuladores de tráfico se han empleado para analizar el comportamiento humano con un grado de detalle elevado, incluyendo las diferencias entre sexo y edad, que hasta el momento nunca han sido tratadas mediante observaciones. Sin embargo, los principales problemas que pueden asociarse a los resultados derivados de simuladores de conducción se deben a la falta de resolución de las pantallas, que dificultan la percepción de objetos muy lejanos, y a la falta de riesgo real de sufrir accidentes, que puede alterar la forma en la que los conductores toman sus decisiones.

Por su parte, la microsimulación del tráfico se ha empleado en diversos estudios de la funcionalidad. Sin embargo, todavía no se han desarrollado modelos complejos de adelantamiento, que incorporen datos experimentales en su calibración.

3.6.6. Seguridad vial

Pese a la gravedad de accidentes asociados a adelantamientos, no se encontraron demasiados estudios de siniestralidad acerca de este problema concreto. Únicamente Clarke et al. (1999)

estableció una clasificación de tipologías de accidente causado por maniobras de adelantamiento.

El resto de estudios se limitaron a obtener los porcentajes de accidentes asociados al adelantamiento, respecto del total de accidentes. Esta cifra se situó generalmente entre el 3 y el 5%. Ningún estudio analizó las características geométricas o del tráfico que podrían estar relacionadas con una elevada concentración de accidentes debidos a adelantamientos.

Por su parte, muy pocos autores emplearon las técnicas de conflicto de tráfico para el análisis de los conflictos en maniobras de adelantamiento. En todo caso, ninguno de ellos fue capaz de establecer ninguna correlación con el número de accidentes. De hecho, ninguno de ellos se basaba en datos experimentales sino tan solo en resultados de un simulador de conducción (Farah et al., 2009) o de un modelo de microsimulación (Hegeman et al., 2009).

3.6.7. Normativas

La revisión de normativas nacionales e internacionales continuó con la tendencia general observada de dispersión en los resultados y valores de distancia de visibilidad de adelantamiento.

En general, en todos los países, se observó que los criterios empleados en fase de diseño y en fase de señalización son distintos, siendo los primeros mucho más conservadores. No existen razones para justificar este doble planteamiento, en especial, gracias al avance en el proceso de diseño de carreteras, por medio de herramientas informáticas, que permite a los proyectistas estimar de forma muy precisa la visibilidad disponible, y por tanto, la ubicación de las zonas de adelantamiento.

En particular, en España, las dos normativas empleadas difieren de forma muy significativa, ya que la norma de trazado propone visibilidades cercanas al doble de las que propone la normativa de señalización. En ninguno de los casos, se justifican los valores escogidos por medio de modelos u observaciones.

En Estados Unidos, sin embargo, desde la aparición de la última normativa de diseño (AASHTO, 2011), la dualidad existente entre guías de diseño y de señalización ha desaparecido. A partir de los resultados de un estudio experimental (Harwood et al, 2008), y basándose también en diversos modelos teóricos, se han cambiado los valores de distancia de visibilidad de la anterior guía de diseño (AASHTO, 2004) a los del manual de señalización MUTCD (FHWA, 2009). A pesar de las limitaciones ya descritas en el estudio de Harwood et al. (2008), las actuales normas de diseño y de señalización de zonas de adelantamiento son homogéneas.

Además, otros de los criterios fundamentales para determinar la localización y distribución de las zonas de adelantamiento es la longitud mínima que puede tener una zona. A este respecto, no es frecuente que las normativas incluyan valores mínimos. No obstante, de los considerados, la longitud mínima de zonas recomendable para carreteras de nuevo trazado en España es la más restrictiva.

No hay ninguna indicación en las normativas revisadas acerca de la forma del perfil de visibilidad en el interior de la zona de adelantamiento (si es constante y próximo al umbral del criterio, por estar en el interior de una curva amplia, o si por el contrario, decrece linealmente desde un valor muy elevado al principio de una recta). Este hecho tampoco había sido tratado en modelos de adelantamiento o de aceptación de huecos.

3.6.8. Resumen y necesidad de investigación

La revisión del estado del arte puso de manifiesto una serie de aspectos relacionados con la maniobra de seguimiento y adelantamiento en los que es preciso ampliar los conocimientos a través de una investigación científica, que se enumeran a continuación:

- En España no existen observaciones de maniobras de adelantamiento en carretera convencional, por lo que los supuestos y modelos que se asumen en el trazado y señalización de zonas de adelantamiento no están validados con la forma en que los conductores actúan frente a esta maniobra. Es necesaria la obtención de datos específicos en España, ya que, observando la dispersión existente en estudios previos, es posible concluir que el área geográfica es un factor que afecta al comportamiento de los conductores.
- El estudio experimental de maniobras de adelantamiento puede estar basado en la grabación de videos desde puntos fijos, desde un vehículo instrumentalizado o desde ambos, en cuyo caso las dos metodologías podrían complementarse y validarse.
- El estudio experimental de maniobras de adelantamiento se ha reducido en el pasado únicamente a la ejecución, siendo necesario analizar el proceso de seguimiento a lo largo del cual se lleva a cabo la aceptación y rechazo de huecos. En este sentido, resulta más apropiado la metodología basada en el vehículo instrumentalizado.
- La calibración de modelos de aceptación y rechazo de huecos es importante para conocer el comportamiento de los conductores, y de esta forma conocer qué factores influyen en dicho comportamiento, determinar cómo responden los conductores a la señalización de zonas de adelantamiento y desarrollar mejoras en modelos de simulación y microsimulación de adelantamientos.
- Es necesario plantear formulaciones probabilísticas, para caracterizar la más que probada aleatoriedad en el comportamiento del conductor, para así también analizar las consecuencias de desviarse de los valores indicados en las guías de diseño, así como proponer nuevas. Sin embargo, los modelos probabilísticos y sus parámetros de entrada deben estar basados en la adquisición de datos de maniobras en las mismas condiciones que las que se modelizan, algo que hasta el momento no se ha realizado.
- Es necesario asociar los resultados de los modelos probabilísticos con medidas objetivas de peligrosidad, como es el caso de accidentes relacionados con maniobras de adelantamiento.
- Es necesario conocer los niveles de riesgo asociados a los criterios de diseño y de señalización, y en su caso, proponer criterios unificados que tengan en cuenta la dispersión y aleatoriedad del fenómeno. Los criterios normativos deben abarcar tanto la visibilidad y su distribución a lo largo de la zona de adelantamiento, así como la longitud mínima de la misma.
- Debe plantearse el desarrollo y calibración de un modelo de microsimulación a partir de los resultados experimentales, validando de este modo modelos teóricos. De esta forma, se podría estudiar la funcionalidad del tráfico mediante estas herramientas, con las garantías de que la simulación es una representación fiel de la realidad.

4. Objetivos

El objeto de la presente tesis es la investigación de la maniobra de adelantamiento en carreteras convencionales, por medio de su observación experimental y con la intención de revisar y reformular los criterios de diseño y señalización de prohibiciones de adelantamiento.

Este objetivo principal se ha desglosado en un conjunto de objetivos específicos:

1. Diseño de una metodología experimental adecuada para el estudio de la maniobra de adelantamiento en tramos de carretera convencional. Para ello, se pretende desarrollar dos métodos de grabación de imágenes de video: desde puntos fijos situados en el exterior de la vía y desde un vehículo instrumentalizado que circula por la misma, siendo rebasado por otros que circulan libremente.
2. Realización de la toma de datos mediante las metodologías desarrolladas en una selección de tramos de carretera convencional en España, con el objeto de obtener una muestra significativa de maniobras de adelantamiento en distintas localizaciones y condiciones.
3. Análisis descriptivo de los datos obtenidos en el estudio experimental, para caracterizar el fenómeno del adelantamiento, teniendo en cuenta factores relativos al conductor (como el sexo, la edad, la demora, etc.), al vehículo (número y tipo de vehículos implicados, etc.), a la carretera (tráfico y velocidades de operación, visibilidad, etc.) y al entorno (condiciones de iluminación).
4. Modelización de las distintas fases de la maniobra de adelantamiento: deseo y decisión de adelantamiento por medio de modelos de elección binaria (aceptación de huecos) y ejecución, por medio de modelos de evolución de velocidad del vehículo adelantante.
5. Formulación de modelos para obtener la distancia de visibilidad requerida para adelantar a un vehículo. Planteamiento probabilístico de los modelos de distancia de visibilidad de adelantamiento, para conocer la probabilidad de ocurrencia de un valor determinado de la distancia de visibilidad necesaria.
6. Análisis cuantitativo del nivel de riesgo de criterios existentes, empleando técnicas de análisis de fiabilidad, a partir de los modelos probabilísticos desarrollados.
7. Estudio de los factores concurrentes y de las principales cifras de la siniestralidad vial asociada a maniobras de adelantamiento, a partir de una base de datos de accidentes. Análisis de la influencia de la geometría de la carretera en la siniestralidad asociada a la maniobra de adelantamiento.
8. Aplicación de los modelos de aceptación de huecos y de ejecución del adelantamiento al desarrollo de un modelo de microsimulación para carreteras convencionales implementado en un software de simulación de tráfico.
9. Revisión y reformulación de criterios técnicos, a partir de los resultados de la toma de datos y del análisis de fiabilidad realizado. Propuesta de nuevos criterios unificados de distancia de visibilidad de adelantamiento, para el diseño y señalización de zonas de adelantamiento.

5. Hipótesis

La investigación que se llevó a cabo vino motivada por una serie de hipótesis iniciales relativas a la maniobra de adelantamiento en carreteras convencionales. Mediante el estudio se trató de verificar o corregir el conjunto de hipótesis que se plantean a continuación.

En primer lugar, el desarrollo de nuevas metodologías de observación de maniobras de adelantamiento mediante el uso de tecnologías recientes, permitió analizar el fenómeno desde un punto de vista interno y mucho más próximo, y por tanto, preciso, que con el empleo de otras técnicas experimentales anteriores. Se esperaba de esta forma poder obtener un conjunto de variables que hasta el momento no han sido consideradas por ningún investigador, entre las que se encuentra el sexo y la edad del conductor del vehículo adelantante, las características de dicho vehículo o el comportamiento a lo largo de todo el proceso de seguimiento al vehículo adelantado, antes de ejecutar la maniobra.

Las hipótesis que se han formulado previamente a la investigación, y que han motivado su inicio, son las que se enumeran a continuación:

1. El área geográfica en la que se realiza la observación de maniobras de adelantamiento es un factor a tener en cuenta, de modo que los resultados del presente estudio podrían diferir de los mostrados por otras investigaciones, aún en el caso de que las características de la infraestructura y de los vehículos sean las mismas.
2. Las características demográficas de los conductores adelantantes (sexo y edad) podrían afectar a la forma en la que desarrollan las maniobras. Hay grupos de conductores, como los hombres jóvenes que podrían mostrar un comportamiento más agresivo: aceptar huecos más reducidos y adelantar más rápido ocupando el carril izquierdo un menor tiempo.
3. El tamaño del hueco aceptado puede afectar el tiempo de ocupación del carril izquierdo. Es decir, cuando el hueco aceptado sea más reducido, los conductores podrían adelantar a mayor velocidad para evitar el potencial conflicto con el vehículo opuesto.
4. La visibilidad o falta de visibilidad de vehículos en sentido opuesto podría provocar una modificación del comportamiento de los conductores. En los casos en los que el vehículo opuesto es visible, el conductor podría ser más conservador que en el caso de no ser visible, independientemente de la medida objetiva de dicho hueco.
5. La demora acumulada por el seguimiento a un vehículo lento podría provocar que los conductores que modifiquen su comportamiento, actuando de forma más arriesgada debido a la impaciencia.
6. El tipo de vehículo adelantado condicionaría el desarrollo de la maniobra. Para adelantar a un vehículo pesado es necesario un hueco de mayor tamaño y mayor tiempo de ocupación del carril izquierdo, debido a la mayor longitud del vehículo y al posible obstáculo a la visibilidad que él supone.

7. Se espera observar un carácter conservador por parte de los conductores al enfrentarse a la maniobra de adelantamiento, visible en el rechazo de huecos de tamaño muy elevado en el tráfico en sentido contrario y en huecos residuales grandes (al finalizar la maniobra). Esto se podría deber a la disminución de la experiencia en recorridos por carretera convencional, y por tanto, en llevar a cabo adelantamientos, así como a que, en los desplazamientos de medio o largo recorrido el porcentaje de circulación en carretera convencional es cada vez más reducido, por lo que la demora que se pueda acumular es una fracción mínima en el conjunto del viaje.
8. El comportamiento conservador explicado en la anterior hipótesis también podría relacionarse con la ausencia de maniobras abortadas. Se espera que el número de maniobras abortadas sea muy reducido, lo que indicaría que los conductores no toman decisiones arriesgadas al aceptar huecos, y únicamente lo hacen cuando se puede llevar a cabo la maniobra con gran seguridad.
9. Los criterios de diseño y de señalización aplicables al adelantamiento, al estar basados en la velocidad de proyecto o en la velocidad máxima permitida, respectivamente, podrían no mostrar niveles de riesgo homogéneos para todos los rangos de velocidades. De hecho, a velocidades de diseño o máximas permitidas bajas, y especialmente en tramos rectos en los que se puede adelantar, habría una mayor desviación respecto de la velocidad de operación, lo que se traduciría en una mayor peligrosidad del criterio que a velocidades altas.
10. Las condiciones de iluminación podrían provocar que el comportamiento del conductor en horario diurno y nocturno fuera diferente. Por una parte, tal como se ha reconocido tradicionalmente, en condiciones nocturnas los faros del vehículo opuesto anticipan su aproximación. De esta forma, es visible antes que durante el día, lo que haría esta maniobra más segura por la noche. Por otra parte, en ausencia de iluminación natural, la percepción del vehículo opuesto es muy complicada, y por tanto, la decisión de adelantar en presencia de tráfico en sentido opuesto podría justificar un comportamiento más conservador.
11. Las tipologías de accidente asociados a adelantamiento son variadas y no se limitarían únicamente a colisiones frontales con el vehículo opuesto, sino que incluirían colisiones laterales, alcances y salidas de vía.
12. Existen factores de la infraestructura que podrían tener una influencia especialmente significativa en la ocurrencia de accidentes en maniobras de adelantamiento. Entre otros factores, podrían tener un efecto más importante las longitudes de la zona de adelantamiento y el perfil de visibilidad disponible dentro de la misma. En concreto, dadas dos zonas de la misma longitud, sería más peligrosa aquella en la que la media de la visibilidad sea inferior.
13. La definición actual de criterios de distancia de visibilidad podría dar lugar a zonas de adelantamiento que, aun cumpliendo con el criterio, sean propensas a presentar problemas de seguridad vial. Este caso se podría detectar en zonas con valores de visibilidad disponible muy próximos al umbral, o a zonas dispuestas en tramos curvos o con visibilidades relativamente reducidas.

6. Alcance

Teniendo en cuenta los objetivos e hipótesis planteadas, el alcance de la tesis queda definido por las siguientes limitaciones:

- No se tiene en cuenta el efecto de las pendientes pronunciadas en la maniobra de adelantamiento. Por ello, las maniobras de adelantamiento que tienen lugar en tramos con pendientes superiores al 3% podrían diferir, en algunos aspectos, de los resultados del presente estudio.
- No se tienen en cuenta las maniobras de adelantamiento en tramos de carretera convencional con carriles adicionales destinados al adelantamiento, o carriles para vehículos lentos.
- Solo se realiza la observación de maniobras en carreteras convencionales del entorno de la ciudad de Valencia (España).

7. Metodología

Uno de los principales objetivos de la presente tesis fue la obtención de datos de maniobras de adelantamiento en carreteras convencionales. Estas observaciones se basaron en la observación del fenómeno minimizando la intervención del equipo investigador, para lo cual fue necesario desarrollar y perfeccionar una metodología específica.

Este apartado se divide en tres partes: la descripción del desarrollo de una nueva metodología específica para la obtención de datos, la selección de localizaciones en las que se realizarán las observaciones y el proceso de reducción o tratamiento de datos que será necesario para obtener un conjunto de variables descriptivas del fenómeno a analizar.

7.1. Diseño

Aunque el estudio de la maniobra de adelantamiento en carreteras convencionales ya ha sido realizado con anterioridad, tal como se especificó en el estado del arte, la extensión y nivel de detalle que se ha alcanzado mediante este trabajo requirió el desarrollo y perfeccionamiento de dos nuevas metodologías de toma de datos.

Ambas metodologías se basaron, como ya se ha comentado, en la observación semi-naturalística de maniobras de adelantamiento, si bien se diferenciaron en el punto de vista del observador. En el primer caso, que se denominó metodología estática, se realizaron grabaciones en video desde puntos fijos situados en el exterior de la vía. En la segunda metodología, denominada dinámica, las grabaciones se realizaron desde un vehículo instrumentalizado que circulaba por la vía.

El uso de dos procedimientos de toma de datos distintos estuvo motivado por su complementariedad. Mientras que el nivel de detalle alcanzado mediante la metodología dinámica fue muy superior, la introducción de un vehículo por parte del investigador no permitió evaluar algunos aspectos operacionales de la maniobra, como es el caso de la frecuencia de maniobras dentro de una zona de adelantamiento o la distribución de velocidades de los vehículos. Este hecho no condicionó el carácter semi-naturalístico de las observaciones, ya que incluso en la metodología dinámica, la presencia de los sistemas de grabación pasó desapercibida para el resto de conductores, tal como se explicará más adelante.

7.1.1. Metodología estática

Hasta la actualidad, se habían realizado algunos estudios de campo de maniobras de adelantamiento basados en la grabación de videos en tramos de carretera desde puntos fijos situados en el exterior de la misma. Los estudios de Polus et al. (2000) y Harwood et al. (2008) son algunos ejemplos recientes de aplicación de esta metodología. En ambos casos, se empleaba una única cámara por cada zona a estudiar, situándola bien en puntos altos del entorno de la vía o incluso

a bordo de un helicóptero, como Polus et al. (2000), o bien en lo alto de un mástil situado junto a la plataforma de la carretera, como es el caso del estudio de Harwood et al. (2008).

La metodología estática se basó, por lo tanto, en la obtención de imágenes de video de una zona de adelantamiento desde puntos fijos situados en el exterior de la carretera, para posteriormente extraer datos de las maniobras registradas.

El presente diseño experimental, a diferencia de los ya realizados, introdujo como novedad la utilización de un mayor número de cámaras de video, para poder cubrir la totalidad de la zona de adelantamiento gracias a una correcta orientación y enfoque de todas las cámaras disponibles.

La incorporación de cámaras adicionales mejoró la calidad de los videos obtenidos, de manera que pudieron analizarse con mayor precisión un mayor número de maniobras. Estas quedaron grabadas de principio a fin en las distintas cámaras, ya que cada una de ellas se enfocó a una sección reducida de cada zona de adelantamiento. El equipo que se utilizó para ello se describirá de forma exhaustiva a continuación.

7.1.1.1. Descripción del equipo empleado

El Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC) del Instituto del Transporte y Territorio (ITRAT) de la Universidad Politécnica de Valencia dispuso de un equipo adecuado para la realización del estudio. Para la grabación de maniobras de adelantamiento mediante video se empleó el llamado laboratorio móvil de tráfico.

El laboratorio móvil de tráfico es una plataforma elevadora articulada, como las destinadas a trabajos en altura, que cuenta con seis cámaras de video en la cesta superior. La principal aplicación de esta plataforma es la obtención de videos desde una posición elevada, de manera que se dispone de una mejor visibilidad sobre el área que se pretende grabar.

La ventaja que proporcionó este laboratorio móvil de tráfico, además de disponer de una altura elevada para la grabación, es la cantidad de cámaras instaladas en él. Las seis cámaras que pueden grabar desde lo alto de la plataforma elevadora proporcionaron una buena visión de amplias zonas, al poder enfocar cada una de ellas a una parte distinta de la zona que se estudia.

El laboratorio móvil de tráfico ya había sido empleado en distintas investigaciones llevadas a cabo por el GIIC, en distintos ámbitos de la ingeniería de carreteras (Cafiso et al., 2011), tal como se observa en la Figura 7-1.

Para describir con mayor grado de detalle el laboratorio móvil, se explica la función de cada uno de sus componentes.

7.1.1.1.1. Plataforma móvil

Es un remolque equipado con una plataforma articulada, como las que se emplean en obras de construcción, de limpieza o mantenimiento de fachadas, etc. Una vez estacionada y desplegados sus cuatro apoyos, puede elevarse hasta alcanzar una altura de 12 metros.

Para ello, cuenta con un sistema hidráulico que mueve tres brazos y una cesta, ubicada en la parte más alta. La cesta contiene las cámaras de video y el equipo de grabación. La altura conseguida con la elevación de la cesta permite obtener una buena visibilidad del área que la rodea. Adicionalmente, la plataforma móvil cuenta con un motor de gasolina empleado para el sistema hidráulico de elevación y como generador eléctrico para la alimentación de los equipos de gra-

bación de video. Cuando es remolcada, la plataforma se encuentra totalmente plegada y acoplada a un vehículo a motor. El vehículo a motor se empleó para remolcar la plataforma hasta el lugar del experimento (Figura 7-2).



Figura 7-1. Ejemplos de utilización del laboratorio móvil de tráfico

7.1.1.1.2. Cámaras de video

El laboratorio móvil de tráfico cuenta con seis cámaras de video Vivotek IP SD7151 instaladas en la cesta de la plataforma móvil (Figura 7-3). Las cámaras se disponen en las barandillas de la cesta, colgadas hacia el exterior. Este tipo de cámaras se emplean para seguridad y vigilancia en edificios, y para control de tráfico, situándose encima de mástiles altos. Cada cámara puede moverse en dos ejes, uno vertical que puede girarla 360 grados y uno horizontal, que permite 90 grados de variación. Por este motivo todo el campo que pueden abarcar está definido por la semiesfera de cristal que contiene la cámara. Además, están equipadas con zoom óptico de 18 aumentos y graban a una resolución de 640x480 píxeles, a 30 cuadros por segundo.

El empleo del zoom permite obtener imágenes a una distancia elevada de la plataforma elevadora, lo cual será necesario en zonas de adelantamiento permitido largas, como alguna de las que van a estudiarse.

Mediante la orientación y el nivel de zoom adecuados de las seis cámaras fue posible obtener imágenes de zonas muy amplias. El ajuste de las cámaras se realizó in situ mediante el sistema de grabación y el ordenador portátil, tal como se describe más adelante.



Figura 7-2. Plataforma elevadora articulada



Figura 7-3. Cámaras de video instaladas en la cesta del laboratorio móvil de tráfico



Figura 7-4. Captura de video grabado por el laboratorio móvil de tráfico

7.1.1.1.3. Sistema de grabación y ordenador portátil

El equipo de grabación está formado por un conjunto de discos duros de gran capacidad, para almacenar los videos que graban las cámaras. Además, cuenta con un router inalámbrico para conectar las distintas cámaras a los discos duros, y para generar una red inalámbrica a través de la cual, y mediante el ordenador portátil, es posible controlar todo el dispositivo.

Mediante un ordenador portátil conectado a la red inalámbrica que genera el equipo de grabación es posible controlar todo el sistema. Cada una de las cámaras y el sistema del disco duro se controlan por medio de una página web con una dirección IP específica.

Desde una página correspondiente a cada cámara es posible observar lo que grabará ésta y ajustar la orientación y el enfoque deseado. Además, desde la página del propio sistema de grabación se escogen las cámaras que se desea que estén grabando, la duración de la grabación y otros parámetros de la misma.

7.1.1.2. Condicionantes

El diseño del estudio de campo con la utilización del laboratorio móvil de tráfico se vio afectado por una serie de condicionantes.

7.1.1.2.1. Visibilidad de la plataforma y desde la plataforma

La afección del laboratorio móvil de tráfico a la circulación debía ser en todo momento la mínima posible. De lo contrario, los datos carecerían de la suficiente validez, y el equipo podría generar un efecto disuasorio en los conductores, reduciendo la frecuencia con la que los adelantamientos ocurren.

Para ello, el equipo debía estar lo más oculto posible de la vista de los conductores que circulen por la carretera que se está grabando. Por este motivo se trató de “esconder” la plataforma del campo de visión habitual de los conductores.

Por otra parte, las cámaras que están instaladas en la plataforma debían disponer de una buena visibilidad sobre la carretera, para poder obtener imágenes de las maniobras de adelantamiento con la resolución y ángulo de visión adecuados para el tratamiento posterior de las mismas.

La posición del laboratorio móvil se decidió, por tanto, como un compromiso entre el impacto visual que supone para los conductores y la visibilidad de las cámaras sobre la carretera. En cada emplazamiento concreto se analizó este aspecto de forma precisa. En la Figura 7-5 se muestra un ejemplo de lo que observaban los conductores en una de las sesiones de toma de datos.



Figura 7-5. Visibilidad de la plataforma elevadora desde la carretera

7.1.1.2.2. Autorizaciones

La instalación de equipos en zonas de dominio público o afección de las vías públicas está sujeta a autorización del titular de la vía. Por otra parte, la grabación de imágenes de vehículos que circulan sobre las carreteras requiere de la autorización de la Dirección General de Tráfico. El estudio se desarrolló en todo momento ajustándose a estos condicionantes legales.

7.1.1.2.3. Limitaciones técnicas

Tal como se ha descrito, el equipo que se utilizó en el estudio de campo tiene unas dimensiones y una maniobrabilidad que condicionaron la posición y el transporte del mismo para el estudio.

El lugar donde se estacione la plataforma elevadora debía tener unas dimensiones aproximadas de 3 x 3 m y ser plano. La superficie debía estar pavimentada, o al menos, compactada. Además, dado que se trata de un remolque relativamente grande, la accesibilidad al lugar donde la plataforma quedaba estacionada debía ser fácil, permitiendo maniobrar con el equipo de forma segura. Para ello se estudiaron previamente los radios de giro y los anchos de las calzadas de acceso al punto donde se estacionó la plataforma móvil.

Por otra parte, los lugares escogidos se debían encontrar a una distancia razonable de la Universidad, donde se encuentra estacionado normalmente el equipo, debido a los costes económicos y de tiempo que suponía el transporte.

7.1.2. Metodología dinámica

Esta segunda metodología se basó en la grabación de maniobras de adelantamiento desde un vehículo adelantado, es decir, aquel que circula más lento y que es rebasado por el vehículo

adelantante (basándose en Carlson et al., 2006 o en Hegeman, 2009). Se emplearon dos vehículos adelantados instrumentalizados. El primero de ellos fue un vehículo ligero, siendo en todas las pruebas un Renault Clio conducido por el equipo investigador. El segundo de ellos fue un vehículo articulado pesado, de 16,5 m de longitud y caja frigorífica, alquilado con conductor para esta finalidad.

La metodología dinámica consistió en la realización de recorridos sucesivos de ida y vuelta en diversos tramos seleccionados de carretera convencional, a velocidades ligeramente reducidas, con el objeto de que otros vehículos siguieran en cola al instrumentalizado y finalmente le adelantaran. Durante el seguimiento y el adelantamiento se registraron diversas variables descriptivas del comportamiento del conductor perseguidor.

7.1.2.1. Descripción del equipamiento

El equipo empleado se compone del sistema Video VBOX Pro de la compañía Racelogic, dos distanciómetros S200 de la compañía Laser Technology Inc., una cámara de alta definición GoPro y un ordenador portátil, además de los accesorios para alimentación y transmisión de datos.

El Video VBOX Pro es un sistema que permite la grabación simultánea de imágenes de video de cuatro cámaras digitales, coordenadas espaciales y temporales procedentes de un receptor GPS de 10 Hz y otros parámetros adicionales, como aceleraciones, al conectar el equipo a una unidad inercial. Para aumentar la resolución en la vista trasera, se instaló la cámara de alta definición. Paralelamente, los dos distanciómetros, conectados a un ordenador portátil, proporcionaron las mediciones de distancias entre el vehículo instrumentalizado y los que le rodean.

A continuación, se detallan las características de cada uno de los componentes.

7.1.2.1.1. Cámaras de video

El sistema VBOX Pro cuenta con cuatro cámaras digitales de tamaño reducido. Su forma es cilíndrica, siendo su tamaño ligeramente inferior a 10 cm de longitud y 2 cm de diámetro. Se pueden acoplar a un brazo articulado que, a su vez, se dispone sobre una base que cuenta con tres ventosas. Las cámaras pueden grabar con una resolución de hasta 576x720 píxeles, en función del número de cámaras conectadas simultáneamente. El enfoque y apertura de las cámaras es automático.

De esta forma, cada una de las cámaras se instaló en una ventanilla del vehículo o en el parabrisas. El brazo articulado permitió orientar la cámara a cualquier posición.

En la Figura 7-6 se observan dos imágenes de las cámaras.



Figura 7-6. Cámaras de video del sistema VBOX en el turismo instrumentalizado

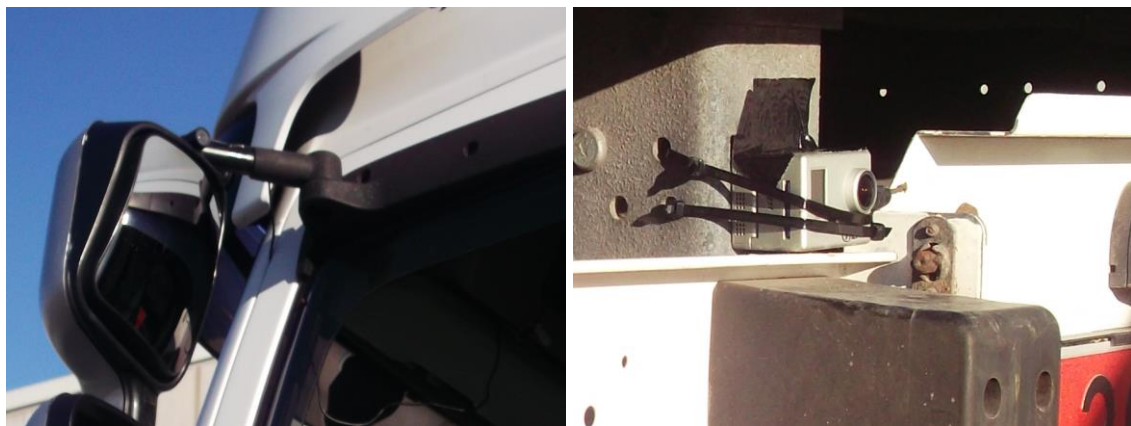


Figura 7-7. Cámara de video lateral y trasera (de alta definición) del camión instrumentalizado

A estas cámaras convencionales se les añadió una de alta definición (1920x1080 píxeles) GoPro, que instalada en el interior del vehículo y enfocada hacia la parte trasera, permite la caracterización del vehículo perseguidor y de su ocupantes con mayor nivel de detalle.

7.1.2.1.2. Receptor GPS

El equipo Video VBOX Pro cuenta con un receptor del sistema de posicionamiento global por satélite GPS. La frecuencia de actualización de dicho sistema es de 10 Hz. El receptor se encuentra integrado en la unidad de grabación principal, que se describe a continuación, aunque cuenta con una antena externa, que se fija en la parte exterior del vehículo.

La precisión del receptor GPS es, de acuerdo a los datos de su fabricante, de $\pm 0,2$ Km/h en la determinación de velocidades, de ± 5 m en la determinación de la posición horizontal y de ± 10 m en la determinación de la altitud. En la Figura 7-8 se observa la antena del receptor.



Figura 7-8. Antena del receptor GPS del sistema VBOX, instalada en el techo del vehículo

7.1.2.1.3. Unidad principal de grabación

Las cámaras de video y el receptor GPS, así como otros accesorios, se conectaron a la unidad de grabación del sistema Video VBOX Pro. Este sistema está alimentado mediante corriente continua a 12 V.

El equipo de grabación, que puede observarse en la Figura 7-10, recoge los datos proporcionados por las cámaras de video y por el GPS, y los almacena en forma de archivos de video y archivos de texto asociados que contienen la información de la posición, a lo largo del tiempo, del vehículo en el periodo de grabación. Estos datos se almacenaron en una tarjeta de memoria extraíble.

7.1.2.1.4. Distanciómetros láser

Para la medición de las distancias existentes entre el vehículo instrumentalizado y los que se encuentran detrás o delante de él se instalaron dos distanciómetros láser del tipo S200, de la marca True Sense. El distanciómetro trasero se instaló en el parachoques trasero de los vehículos mediante elementos metálicos y cinta adhesiva. Su reducido tamaño (10x6x3 cm) hace que resultara prácticamente imperceptible para el resto de conductores.

El distanciómetro delantero estaba situado dentro del vehículo, y se montó en forma de pistola láser controlada por el copiloto. Este apuntaba a través de un visor óptico al vehículo cuya distancia se deseaba medir (Figura 7-9).

Los distanciómetros proporcionan una precisión superior a 5 cm, y una frecuencia de medición de 12,5 Hz, lo que permitió, mediante mediciones sucesivas al mismo vehículo, conocer cuál es su velocidad relativa. Los datos medidos por estos dispositivos se transmitían a un ordenador portátil.

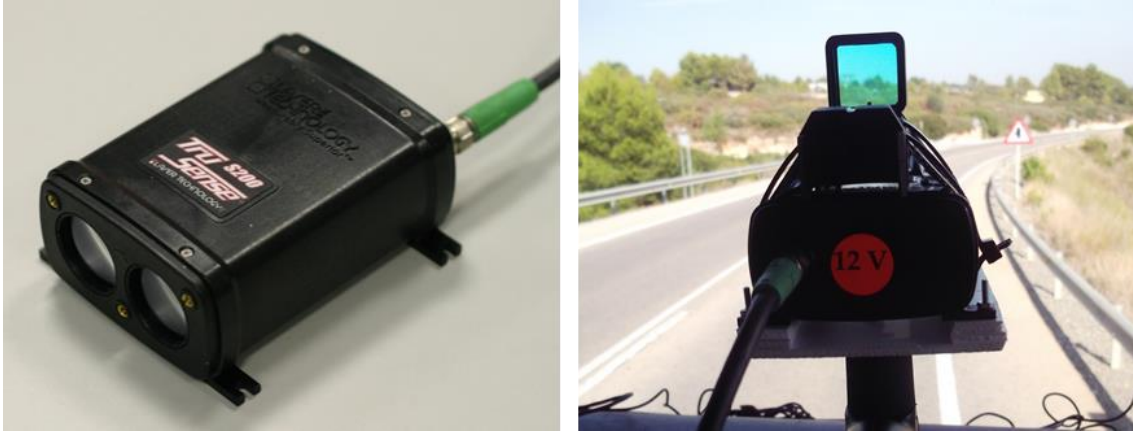


Figura 7-9. Distanciómetro láser y pistola láser delantera

7.1.2.1.5. Accesorios

Todos los equipos se alimentaron mediante una batería de 12V y 39 Ah de capacidad, que le proporcionaba al vehículo una autonomía de más de 8 horas.



Figura 7-10. Unidad de grabación del sistema VBOX

7.1.2.2. Instalación

Los componentes del equipo descrito se instalaron a bordo de los vehículos, de la manera que se detalla en este apartado.

Dado que el objetivo era obtener imágenes de maniobras de adelantamiento al vehículo instrumentalizado, fue necesario que las cámaras abarcaran toda el área trasera, lateral izquierda y delantera del vehículo. Por este motivo, en el vehículo ligero se instaló una cámara en la luna trasera, otra en la lateral trasera izquierda, otra en la lateral delantera izquierda y una última en la delantera. La disposición y ángulo de visión de las cámaras permitió abarcar toda la maniobra, existiendo áreas de solape entre las imágenes procedentes de distintas cámaras. A estas cámaras se les añadió la de alta definición, abarcando la vista trasera del vehículo. En la Figura 7-11 se observa la disposición y área grabada por las cámaras.

En el vehículo pesado, se instaló una cámara de alta definición en el parachoques trasero, y dos cámaras en la cabina: la primera de ellas apuntando al frente y la otra apuntando a la parte trasera, desde el espejo retrovisor. En la Figura 7-11 se observa igualmente la disposición de las cámaras.

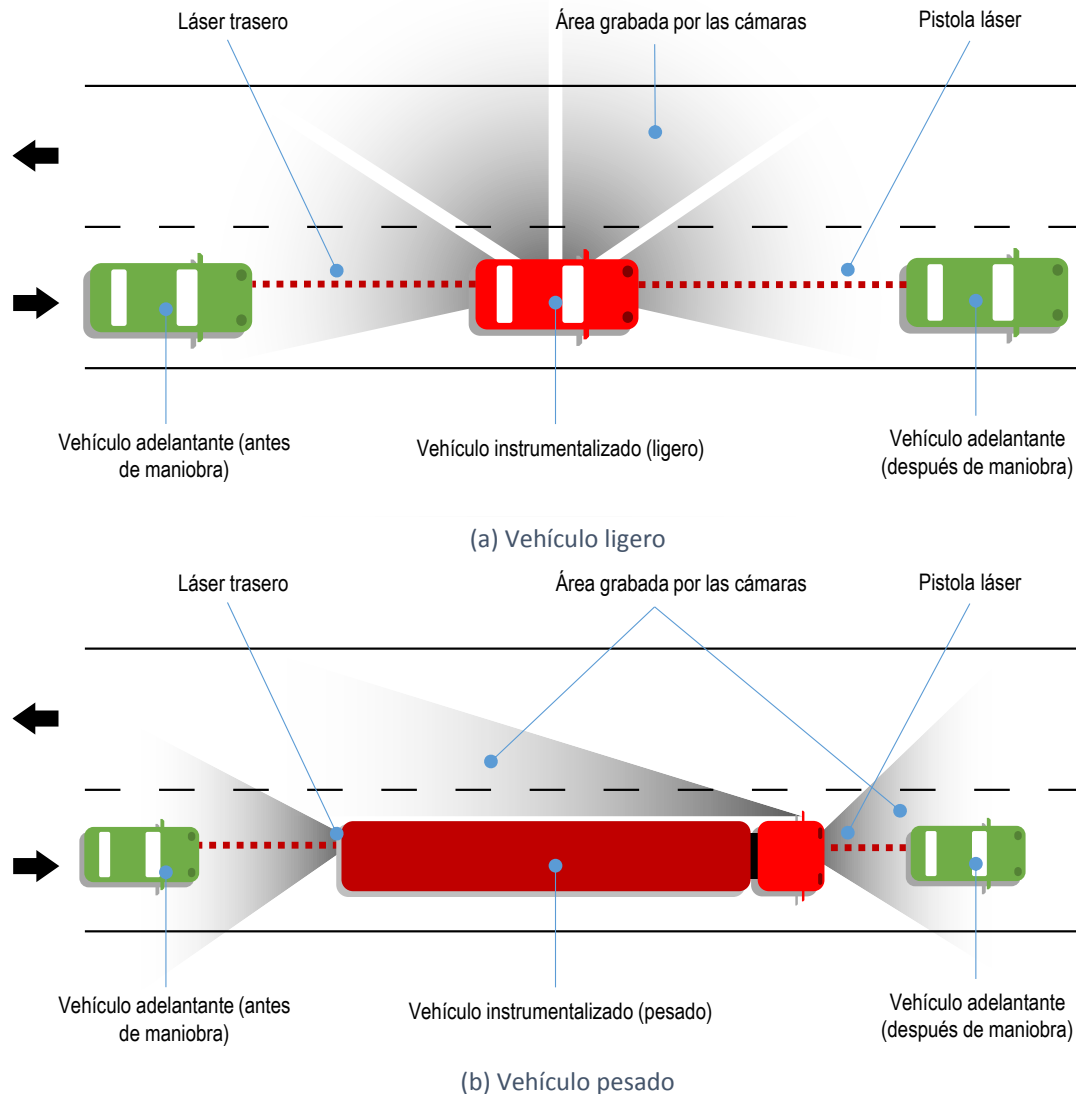


Figura 7-11. Esquemas de los vehículos instrumentados

Mediante un ordenador portátil se configuraron los distintos parámetros de grabación del sistema Video VBOX Pro, como el número de cámaras grabando, la calidad del video, o los distintos mensajes que deseen mostrarse superpuestos a la imagen, entre los que están el tiempo, la velocidad o las coordenadas geográficas.

Estas opciones de configuración se manipularon mediante el software VBOX Setup, proporcionado por el fabricante del equipo. En la Figura 7-12 se observa un ejemplo de configuración. En azul, aparece la forma que tendrá el archivo de video, en este caso, mostrando cuatro cámaras simultáneamente, con el valor de la velocidad instantánea y del tiempo superpuesto.

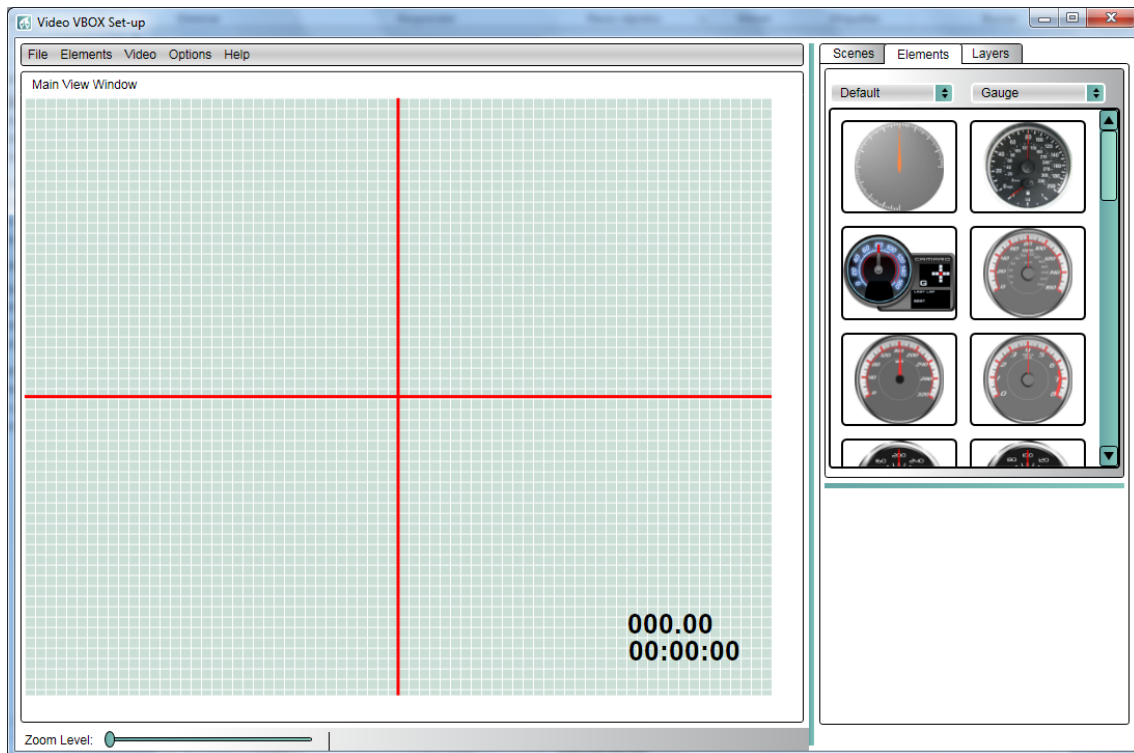


Figura 7-12. Ventana del software VBOX Set-up, para la configuración del equipo VBOX

La cámara de alta definición grabó los archivos de video en una tarjeta de memoria, y fue conectada a la batería de 12 VDC mediante el puerto USB y un adaptador de voltaje.

En cuanto a los distanciómetros, se alimentaron también mediante la batería de 12 VDC, y transmitieron datos al ordenador portátil a través de puertos serie RS232. El ordenador portátil permaneció encendido durante toda la toma de datos, por lo que se alimentó también desde la batería de 12 VDC a través de un adaptador de voltaje.

Una vez identificados los tramos y fechas para la toma de datos (tal como se detalla en la sección 7.2), se procedió a instalar el equipo en el vehículo, que fue conducido a lo largo de la vía realizando sucesivas pasadas de ida y vuelta.

La velocidad del vehículo se fijó constante, en valores ligeramente inferiores a la velocidad máxima permitida y a las velocidades de operación observadas en el tramo. Esta velocidad se situó dentro de la distribución de velocidades de vehículos adelantados, observada mediante la metodología estática, realizada antes en el tiempo.

7.1.2.3. Condicionantes

En el momento del diseño de la metodología se tuvieron en cuenta distintos factores que determinaron el procedimiento de tomas de datos.

Durante el experimento fue muy importante evitar, en todo momento, la influencia del vehículo instrumentalizado sobre el resto de los conductores, ya que esto podría haber afectado a la validez de los datos obtenidos.

Por este motivo se escogió un equipo que, por sus reducidas dimensiones, pudo pasar desapercibido para el resto de usuarios de la vía. El reducido tamaño de las cámaras, y su emplazamiento en el interior del vehículo, hicieron que apenas fueran perceptibles para el conductor del

vehículo que circulaba detrás. La Figura 7-13 y la Figura 7-14 muestran un vehículo equipado con las cuatro cámaras, donde puede verificarse este hecho.



Figura 7-13. Vista delantera del vehículo instrumentalizado



Figura 7-14. Vista trasera del vehículo instrumentalizado

Por otra parte, el comportamiento del vehículo instrumentalizado debía ser similar al de cualquier otro usuario de la carretera. Por este motivo, las velocidades de circulación fueron uniformes y se situarán alrededor de las de operación de la vía, basándose en observaciones previas de adelantamientos realizadas mediante la metodología estática. Estas velocidades se situaron, en general, dentro del intervalo comprendido entre el 70 y el 100% de la velocidad máxima permitida y en un percentil reducido (entre el 15 y el 30) de la distribución de velocidades de vehículos adelantados en tramos similares. Posteriormente, en el capítulo de análisis, se verificará esta correspondencia entre ambas metodologías.

De esta forma, además de mostrar un comportamiento que pueda considerarse normal dentro del tráfico, se pretendió desarrollar la prueba en condiciones suficientes de seguridad, sin forzar excesivamente a la baja la velocidad, puesto que no sería representativa del fenómeno real.

En el caso concreto de la prueba realizada mediante el vehículo pesado, la presencia de los dispositivos era aún menos evidente, así como la velocidad de circulación, que se aproximó a la velocidad media esperable para camiones en el tramo considerado.

7.1.3. Medidas de velocidad puntual

En la mayor parte de las zonas observadas mediante la metodología estática, se midieron velocidades de todos los vehículos en el centro de la zona de adelantamiento. Se asumió que en este punto, situado cerca del centro de la recta en la que se permite adelantar, se alcanza la velocidad máxima.

Para realizar estas mediciones se instaló un dispositivo medidor de velocidades T100/200 del fabricante Laser Technology Inc. Este dispositivo se instaló en el lateral de la carretera. El principio en que se basa es en el cálculo de la diferencia de tiempos de cruce de un vehículo con dos haces láser perpendiculares al eje de la vía y separados una distancia conocida (Figura 7-15)

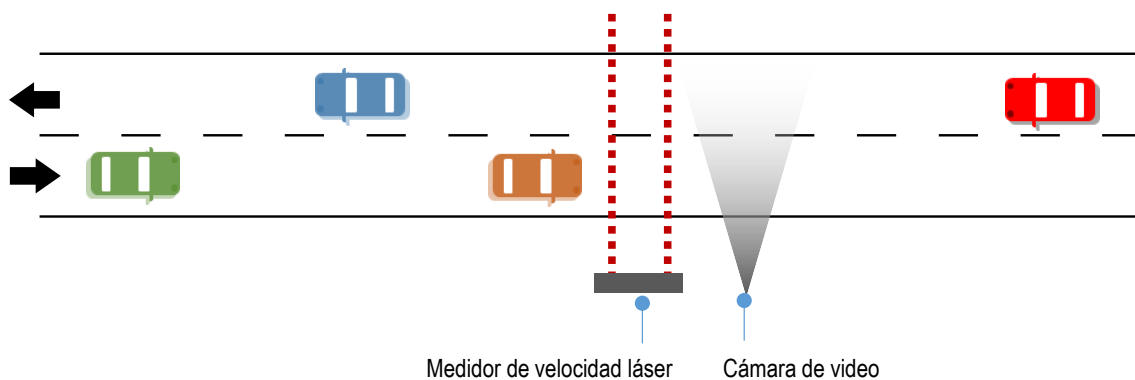


Figura 7-15. Esquema del sistema de medición de velocidades puntuales



Figura 7-16. Medición de velocidades puntuales

7.2. Selección de localizaciones

Además de la elección, diseño e instalación de los equipos que van a emplearse en el proyecto, en el diseño experimental se integró, también, la elección de las localizaciones que iban a ser estudiadas.

En este caso, la metodología estática se aplicó en zonas de adelantamiento localizadas en tramos de carretera convencional, de dos sentidos y calzada única. La metodología dinámica, en cambio, se aplicó a lo largo de tramos de carretera que contienen varias zonas de adelantamiento.

De este modo, se denominó tramo a un segmento de la carretera de características homogéneas, en cuanto a geometría y niveles de tráfico. Una zona de adelantamiento, por su parte, es la longitud de carretera situado entre las señales consecutivas de fin de prohibición de adelantamiento y de prohibición de adelantamiento, marcado además mediante línea discontinua. Por lo tanto, dentro de un tramo se pueden encontrar varias zonas de adelantamiento.

Puesto que la señalización relativa a los permisos de adelantamiento depende del sentido de circulación considerado, y es distinta en general para cada uno de ellos, cada zona de adelantamiento se refirió únicamente a un único sentido de circulación.

En este apartado del diseño experimental, se propuso la selección del conjunto de localizaciones en las que se llevó a cabo posteriormente la toma de datos, teniendo en cuenta, no solo la naturaleza de los datos, sino también los distintos condicionantes ya mencionados en la descripción de la metodología y lo derivados de la naturaleza estadística de los datos y de los recursos económicos disponibles.

En primer lugar, se procedió a analizar la red de carreteras del entorno de Valencia, lo que permitió elaborar un inventario de zonas de adelantamiento a estudiar.

En base a este inventario, y considerando las variables que puedan estudiarse y los condicionantes estadísticos y técnicos, se elaboró una propuesta de localizaciones, tanto para la metodología estática como la metodología dinámica.

7.2.1. Análisis de la red de carreteras

Dentro de la tarea de selección de localizaciones y tramos a incluir en el estudio de la maniobra de adelantamiento, se encuentra el análisis de la red de carreteras. En este análisis, se realizó un inventario de tramos de carretera convencional del entorno de la ciudad de Valencia, en los que se podría llevar a cabo el estudio.

De esta forma, se abarcaron todo tipo de características geométricas y diversos volúmenes y composiciones de tráfico, que permitieran estudiar la influencia de estas variables en la maniobra.

7.2.1.1. Inventario de tramos

Para comenzar el análisis de la red de carreteras convencionales, se llevó a cabo un inventario de todos los tramos de carretera convencional en el entorno de Valencia. Para la realización de este inventario, el único criterio fue la identificación de todas aquellas carreteras convencionales, ayudándose de cartografía de carreteras.

7.2.1.2. Intensidad de tráfico

Dado que uno de los principales condicionantes de la maniobra de adelantamiento en carreteras convencionales es el volumen y composición del tráfico, resulta de gran importancia evaluar el mismo en los distintos tramos identificados en la tarea anterior.

Además, el volumen de tráfico supuso un primer criterio para filtrar los tramos de carretera en los que podría llevarse a cabo la investigación experimental, dado que aquellas carreteras con volúmenes de tráfico muy reducidos fueron descartadas, por la dificultad de obtener un tamaño de muestra suficiente.

Los datos de tráfico se han obtenido a partir de las siguientes fuentes, en función de la titularidad de cada una de las carreteras consideradas:

- Mapa de Tráfico del Ministerio de Fomento (2012), aplicable a las carreteras de la Red de Carreteras del Estado (RCE).
- Memoria Anual de Aforos de la Conselleria de Infraestructuras Territorio y Medio Ambiente, de la Generalitat Valenciana (2012), aplicable a la red autonómica.
- Libro de Aforos de la Diputación Provincial de Valencia (2011), aplicable a la red de la Diputación Provincial.

En cada uno de los tramos considerados, se obtuvo, al menos, la Intensidad Media Diaria (*IMD*) expresada en vehículos al día. Además, en la mayoría de los casos se obtiene el porcentaje de vehículos pesados (en % del total). De forma adicional, en algunas carreteras, se dispuso también de las intensidades horarias a lo largo del día.

El nivel de tráfico, computado por estaciones de aforo permitió dividir cada una de las carreteras en tramos de volúmenes de tráfico prácticamente uniforme. Esta tramificación se trasladó al inventario de carreteras realizado anteriormente, dividiendo cada una de ellas en tramos de *IMD* homogénea.

De acuerdo a la influencia del tráfico en la maniobra de adelantamiento, se descartaron todos aquellos tramos en los que la intensidad media diaria era inferior a 1000 veh/día, ya que las

intensidades horarias esperadas en estas vías dificultan la observación de maniobras de adelantamiento en un tiempo razonable. En estos casos, la mayoría de vehículos circulaba en condiciones de flujo libre, es decir, sin que otros vehículos les hagan modificar su velocidad deseada. Del mismo modo, se descartaron aquellos tramos cuya intensidad media diaria supera los 15.000 veh/día, por tratarse estos casos de niveles de tráfico próximos a la congestión.

7.2.1.3. Geometría y señalización

Una vez localizados aquellos tramos de carretera en los que podría estudiarse el adelantamiento, se procedió a describir sus características geométricas y la señalización existente. La obtención de estos datos se realizó a partir de cartografía de detalle, principalmente a partir de fotografía aérea, complementada con la herramienta Street View de Google.

Dentro de todas las variables relativas a la señalización y a la geometría, se han tenido en cuenta las siguientes características:

- Velocidad de proyecto, entendida como la velocidad de diseño de tramos de características uniformes y longitud superior a 2 km.
- Límite de velocidad señalado en la zona de adelantamiento.
- Tipo de sección transversal, caracterizada por el ancho de los carriles y la existencia (y anchura) de arcenes.
- Perfil longitudinal: de forma aproximada se han descrito las características del terreno, a partir del modelo digital del terreno de Google Earth (cuadrícula de 90x90).
- Ubicación y distribución de zonas de adelantamiento, de forma cualitativa, a lo largo del tramo.

7.2.1.4. Resumen del inventario

Atendiendo a todos los anteriores criterios de selección, se elaboró una base de datos en la que se enumeró y describió un conjunto de tramos susceptibles de ser estudiados a lo largo del estudio, por tener la maniobra de adelantamiento un importante efecto en sus características del tráfico o en la seguridad vial.

En total, tras el filtrado según los criterios de volumen de tráfico ya explicados, se consideraron 105 tramos de carretera. Su longitud total ascendió a 854 km, de los que 255 km eran de titularidad estatal, 485 de la red autonómica y 114 de la Diputación Provincial. La longitud de cada uno de los tramos homogéneos fue de entre 1,5 y 35 km.

La *IMD* promedio fue de 5.641 vehículos/día. La longitud media de los tramos considerados fue de 8,2 km. Dentro de cada tramo se identificó, al menos una zona de adelantamiento, si bien lo habitual es que se encuentren varias.

El porcentaje de vehículos pesados oscila entre el 2% y el 40%. La velocidad de diseño de los tramos se sitúa entre 50 y 120 km/h.

Por otra parte, las secciones transversales medidas más estrechas fueron de 6 m de ancho de calzada sin arcenes, mientras que las más amplias tuvieron un ancho de plataforma de 11 m, siendo la calzada de 7 m y los arcenes de 2 m.

Este inventario se recoge con detalle en el Anexo IV.

7.2.2. Condicionantes estadísticos

La obtención de datos de un fenómeno real por medio de un estudio de campo se basa en la observación de una muestra representativa del fenómeno. Con este planteamiento, en el presente proyecto, la ejecución experimental observará una muestra representativa de maniobras de adelantamiento, para que a través de los estadísticos de la muestra, se transfieran por inferencia a los parámetros de la población.

La representatividad de la muestra se debe al tamaño de la misma, y a la variedad de escenarios que abarca, respecto de la variedad de situaciones que existen en la realidad. No obstante, el número total de maniobras en cada localización dependerá, no sólo de la variabilidad estadística, sino también de la disponibilidad de recursos para la realización de la prueba.

El tamaño de la muestra mínima de maniobras en cada localización debe calcularse para garantizar la adecuada precisión y confiabilidad de las estimaciones, y, en todo caso, debe garantizarse la aleatoriedad de la muestra. El tamaño de la muestra, a nivel estadístico, depende del tamaño de la población estudiada, la homogeneidad de la población respecto a la variable a caracterizar, el grado de precisión y el nivel de confianza.

Considerando que la población de maniobras de adelantamiento se ajusta a una distribución normal, se realizó la estimación de la muestra necesaria. Asumiendo un tamaño de población elevado, un error admisible del 10% y la desviación típica obtenida en datos experimentales anteriores, para obtener el valor medio de las principales variables (especialmente del tiempo de ocupación del carril izquierdo durante el adelantamiento) se determinó que era necesario obtener una muestra de al menos 50 maniobras. En consecuencia, se trató de obtener una muestra superior a 50 maniobras en cada una de las localizaciones donde se llevó a cabo el estudio. Esta estimación se basa en la Ecuación 7-1.

$$N > \frac{s^2 \cdot z^2}{e^2} \quad \text{Ecuación 7-1}$$

Donde:

- N es el mínimo tamaño de muestra.
- s es la desviación estándar de la muestra (en este caso se tomó un valor igual a 2,1 s).
- e es el error admisible (un 10% de 7,5 s, es decir, 0,8 s).
- z es un estadístico igual a 1,96, para un nivel de confianza del 95%.

Por otro lado, el número de localizaciones intentó abarcar escenarios con la mayor diversidad de variables cuya influencia se esperaba significativa. Sin embargo, tratar de abarcar un número demasiado elevado de variables hubiera obligado a realizar un número excesivo de pruebas de campo, algo que quedó limitado por disponibilidades de tiempo y de recursos para el proyecto.

7.2.3. Propuesta de localizaciones

Teniendo en cuenta el inventario de tramos de carretera convencional, así como lo condicionantes estadísticos y técnicos específicos para cada maniobra se realizó una propuesta de localizaciones para la toma de datos. Dicha propuesta se basó en lo siguiente:

- La gran mayoría de tramos escogidos tuvieron una sección transversal tipo 7/10 (7 m de ancho de calzada y arcenes de 1,5 m de ancho). Esta selección se basó en el hecho de que, en la muestra de tramos inventariada, este tipo de vías movilizan casi el 90% de

veh·km, por lo que cabe esperar que las mayoría de maniobras de adelantamiento se llevarán a cabo en ellas.

- Todos los tramos y zonas de adelantamiento se situaron en terreno llano u ondulado, no existiendo pendientes superiores al 3% en longitudes significativas. El efecto de la pendiente, así como la existencia de carriles de vehículos lentos no se consideró en el presente estudio.
- Los tramos escogidos presentaron una amplia variabilidad en el volumen de tráfico, en el porcentaje de vehículos pesados, la longitud de las zonas de adelantamiento permitido y en las velocidades de diseño y máxima permitida (y en todos los parámetros derivados de ellas). De esta forma, se pretendía estudiar el efecto de las características geométricas y de tráfico en el adelantamiento.
- Gran parte de las localizaciones propuestas para la metodología estática formaron parte de tramos de carretera propuestos para la metodología dinámica. El objetivo de esta coincidencia fue la validación mutua de la ausencia de afección del investigador en el fenómeno investigado.

Los tramos y zonas seleccionados se muestran en la Tabla 7-2 y en la Tabla 7-1.

Código	Localización	Número de zonas de adelantamiento	IMD (veh/d)**	Sección transversal***	Velocidad de diseño (km/h)	Velocidad máxima permitida (km/h)	Longitud de la zona de adelantamiento (sentido A) (m)	Longitud de la zona de adelantamiento (sentido D) (m)
E1 (Casinos)	CV-35 Pk 44+500	2*	5797	7/10	120	100	1265	1130
E2 (Vilamarxant)	CV-50 Pk 84+500	2*	4517	7/10	****	100	850	600
E3 (Carlet 1)	CV-50 Pk 37+000	2*	5091	7/10	90	100	265	230
E3 (Carlet 2)	CV-50 Pk 37+500	2*	5091	7/10	90	100	270	285
E4 (Cheste)	CV-50 Pk 77+000	2*	4517	7/10	80	100	755	990
E5 (Riba-roja)	CV-37 Pk 14+000	2*	7775	7/10	****	100	550	560
E6 (Marines)	CV-25 Pk 5+000	2*	10267	7/10	****	100	1000	1000
E7 (Calles)	CV-35 Pk 90+500	2*	2366	7/10	70	100	540	522
E8 (Algar de Palancia)	N-225 Pk 5+000	2*	5925	7/10	100	100	507	265
E8 (Algar de Palancia)	N-225 Pk 6+000	2*	5925	7/10	100	100	1050	1270
*Una zona por cada sentido de circulación								
**Datos de 2011 y valor medio del tramo								
***ancho calzada/ancho plataforma (m)								
****no se ha calculado. Las zonas de adelantamiento están entre 2 glorietas								

Tabla 7-1. Zonas de adelantamiento propuestas en la metodología estática

Código	Localización	Número de zonas de adelantamiento	Longitud del tramo (km)	IMD (veh/d)*	Velocidad de diseño (km/h)	Sección transversal**	Velocidad máxima permitida (km/h)***	Velocidad vehículo instrumentalizado (km/h)
T1	N-225 Pk 0+000 a 15+000	17	15	5925	100	7/10	100	80
T2	CV-35 Pk 40+000 a 50+000	10	10	5797	120	7/10	100	80 y 90
T3	CV-50 Pk 76+000 a 86+000	13	10	4517	80	7/10	100	60 y 70
T4	CV-50 Pk 34+000 a 40+000	12	6	5091	90	7/10	100	60 y 70
T5	CV-415 Pk 1+000 a 9+000	18	8	5465	70	6/6	90	60
T6	CV-405 3+500 a 11+500	22	8	15342	70	7/10	80	60
*Datos de 2011 y valor medio del tramo								
**ancho calzada/ancho plataforma (m)								
***en ausencia de limitaciones puntuales								

Tabla 7-2. Tramos de carretera propuestos en la metodología dinámica

7.3. Reducción de datos

Mediante el proceso de reducción de datos se ha definido y obtenido un conjunto limitado de variables que permiten analizar los datos recogidos en el estudio de campo. Las variables pueden asignarse a tramos de carretera, zonas de adelantamiento, maniobras, vehículos o conductores, tal como se describe a continuación.

7.3.1. Tramo de carretera

Se obtuvieron una serie de parámetros que permiten caracterizar la carretera y el tramo concreto en el que se ha llevado a cabo el estudio experimental, y dentro del cual los resultados del estudio eran aplicables. Gran parte de estas variables se obtuvieron y se analizaron en la fase de diseño experimental:

- *Carretera*: constituye un identificador del tramo de carretera.
- Velocidad de diseño (*Vd*): velocidad de proyecto de la vía, según la definición de la Instrucción de Trazado 3.1 IC (Ministerio de Fomento, 2000). En los casos en los que el valor de esta velocidad no se conoce, se obtiene de considerar tramos de al menos 2 km de longitud. Dentro de estos tramos, la geometría de la curva horizontal o vertical más restrictivas tiene asociada una velocidad específica, de acuerdo a la Instrucción de Trazado, que será la velocidad de proyecto del tramo.
- Velocidad máxima permitida (*Vm*): se trata de la velocidad máxima genérica de la vía, o bien de la establecida por medio de limitaciones específicas de velocidad, señalizadas conforme a la Instrucción de Señalización Vertical 8.1 IC (Ministerio de Fomento, 1999).
- Intensidad de circulación, en concreto, la Intensidad Media Diaria (*IMD*) y las intensidades horarias medidas durante el estudio (*Ih*).
- Composición del tráfico, definida por el porcentaje de pesados (*%HV*) respecto del total de vehículos circulantes.

Estas variables caracterizan tanto la geometría de la vía (*Vd*), como su señalización (*Vm*) y el tráfico que circula por la misma. Con carácter particular, y en algunos puntos concretos del estudio, se analizaron algunas variables adicionales, como las que detallan el trazado en planta y

alzado (radios de curvatura vertical y horizontal, etc.) y la sección transversal (ancho de calzada y arceles).

7.3.2. Zona de adelantamiento

A continuación, se caracterizaron algunas variables relativas a las zonas de adelantamiento:

- Longitud de la zona de adelantamiento permitido (*PZL*, de *passing zone length*)
- Visibilidad disponible (*ASD*, de *available sight distance*) a lo largo del tramo: con el objeto de un posterior análisis, se han estimado los perfiles de visibilidad disponible a lo largo del tramo de carretera, y en concreto, dentro de las zonas de adelantamiento permitido. Esta estimación se ha realizado a partir de imágenes de fotografía aérea y grabaciones de video realizadas desde un vehículo, durante las distintas sesiones de toma de datos.
- Velocidad de operación (*V85*): es el percentil 85 de la distribución de velocidades de vehículos ligeros en flujo libre en el centro de la zona de adelantamiento (velocidad máxima). Esta variable se obtuvo a partir de los listados procedentes del dispositivo láser de medición de velocidades. Para ello, se filtraron las velocidades correspondientes a vehículos pesados (a partir de su longitud, también proporcionada por el dispositivo) y del intervalo entre vehículos.
- Sección transversal (*Sección*): es la sección de la carretera en la zona de adelantamiento. Únicamente se han considerado dos niveles de esta variable: sección con arcén y sección sin arcén.

De forma adicional, las zonas de adelantamiento se caracterizaron mediante la agregación de variables correspondientes a las maniobras observadas en ellas (por ejemplo, la distribución de velocidades de los vehículos adelantados).

7.3.3. Maniobra

El primer paso en la reducción y procesado de maniobras consiste en la identificación de las mismas, realizada por medio del visionado directo de los videos y apoyada por los conteos y anotaciones realizadas durante la propia prueba. A efectos de facilitar el análisis, a cada maniobra se le asignó un código, resultante de unir el número de la sesión de toma de datos y el orden cronológico de maniobras dentro de la misma.

7.3.3.1. Identificación

Durante el periodo de grabación, los sistemas de grabación de ambas metodologías generaron un conjunto de archivos de video, que contiene las imágenes procedentes de las cámaras. En el caso de la metodología dinámica, se generaron además varios listados de datos, procedentes del receptor GPS, de los distanciómetros y de las anotaciones.

En el caso de la metodología estática, la identificación de maniobras se realizó mediante el visionado directo de los hasta seis videos simultáneos que se registraron. En cuanto a la metodología dinámica, las maniobras se identificaron también mediante el visionado directo de los videos, contando además con listados de anotaciones tomados por el copiloto. Además, se realizó un trabajo de coordinación con las otras fuentes de datos, de modo que a cada instante del video se le asignaron los valores correspondientes de localización (tanto procedente del GPS como en el sistema de referencia de PK de la carretera), como de mediciones de los distanciómetros laser.

7.3.3.2. Clasificación

La observación de las grabaciones de video de las propias maniobras ya permitió establecer una clasificación de las mismas en grupos diferenciados, considerando como criterios de clasificación las siguientes variables:

- Número de vehículos adelantados (N_i , de number of impeding vehicles): según el número de vehículos que fueron adelantados durante una maniobra de ocupación del carril izquierdo, fue posible distinguir entre adelantamientos simples y múltiples (dobles, triples, etc.).
- Número de vehículos adelantantes simultáneos (N_p , de number of passing vehicles): cada vehículo adelantante define una maniobra de adelantamiento. Sin embargo, a menudo varios vehículos adelantantes ocuparon simultáneamente el carril izquierdo. En este caso, la maniobra de adelantamiento de los vehículos que adelantante detrás de otro se clasificaron como maniobras simultáneas.
- Tipo de vehículo adelantado y adelantante ($Tipoi$ y $Tipop$, por impeding y passing, respectivamente): antes de la identificación del tipo de vehículo adelantante y adelantado, se clasifican los mismos entre ligeros y pesados, en función de si su masa máxima autorizada es inferior o superior a 3500 kg. Esta distinción se ha realizado por medio del visionado directo de los videos.
- Categoría o segmento al cual pertenecen el vehículo adelantado y adelantante ($Categoriad$ y $Categoriap$, por impeding y passing, respectivamente). Las categorías consideradas son: utilitario, compacto, berlina, familiar, deportivo, furgoneta, monovolumen, todo-terreno, camión rígido, camión articulado, autobús y especial.
- Modo de iniciación de la maniobra ($Inicio$): las maniobras de adelantamiento pueden iniciarse según uno de los siguientes modos:
 - Maniobras en seguimiento: el vehículo adelantante está siguiendo al adelantado durante cierto tiempo antes de realizar la maniobra, por lo que parte de una velocidad próxima a la del adelantado y requiere acelerar hasta rebasarlo.
 - Maniobras lanzadas: el vehículo adelantante alcanza al adelantado sin llegar a reducir su velocidad y le rebasa sin permanecer en seguimiento.
- Terminación de la maniobra (Fin): las maniobras de adelantamiento, una vez iniciadas, suelen concluir cuando el vehículo adelantante regresa al carril derecho por delante del adelantado (maniobra completada). Sin embargo, existen casos en los que el vehículo adelantado no completa la maniobra y regresa a su propio carril sin rebasar al adelantado (maniobra abortada).
- Longitudes de los vehículos implicados, obtenidas a partir de la marca y modelo, y en su defecto, valores medios para las categorías de vehículo:
 - L_i : longitud del vehículo adelantado.
 - L_p : longitud del vehículo adelantante.
- *Iluminación*: condiciones de iluminación durante el desarrollo de la maniobra. Pudieron ser diurnas o nocturnas.

Todas estas variables fueron obtenidas en la totalidad de maniobras registradas, tanto en la metodología estática (grabaciones desde puntos externos) como en la dinámica (grabaciones desde un vehículo instrumentalizado). Todas ellas se basaron en la observación directa de los videos, excepto las longitudes de los vehículos, que se han obtenido a partir del modelo y marca

de los mismos, siempre que fuera conocido, y en caso contrario, a partir de los valores medios de longitudes correspondientes a la categoría del vehículo.

7.3.3.3. Conductor y ocupantes

Únicamente la utilización de la metodología dinámica permitió caracterizar algunas variables relativas al conductor del vehículo que adelanta. La incorporación de estas variables en el estudio semi-naturalístico de la maniobra de adelantamiento constituye un avance significativo en el estudio del factor humano. Se trata de las siguientes variables:

- Edad estimada del conductor del vehículo adelantante (*Edad*), a partir de la observación directa por parte del copiloto en el instante en el que tiene lugar la maniobra. Se ha estimado con una precisión de 5 años. Entre las limitaciones derivadas de la propia metodología, debe entenderse que la estimación de la edad de los conductores se realizó sin ningún tipo de intervención directa, con el objeto de respetar las condiciones naturalísticas del estudio. Por ello, es posible que exista un cierto error.
- Sexo del conductor del vehículo adelantante (*Sexo*), obtenido de la misma forma que la edad.
- Número de ocupantes del vehículo adelantante (*Ocupantes*), obtenido por conteo en el momento en que se produce la maniobra.

Estas variables se obtuvieron a partir de la observación directa de la maniobra, únicamente en la metodología dinámica.

7.3.3.4. Fase de seguimiento

A continuación, se analizó el proceso de seguimiento del vehículo adelantante antes de llevar a cabo la maniobra de adelantamiento. Este conjunto de variables se ha considerado, principalmente, en las maniobras observadas mediante el vehículo instrumentalizado, ya que en ellas se dispone de datos relativos a la totalidad del proceso de seguimiento previo a la maniobra de adelantamiento.

De esta forma, desde el momento en el que un vehículo cuya velocidad deseada era superior a la del vehículo instrumentalizado entraba en la cola, se sucedían distintas oportunidades de adelantamiento, definidas como huecos. El inicio de un hueco podía estar determinado por alguno de los siguientes sucesos:

- El vehículo llega a la cola.
- El vehículo se cruza con un vehículo en sentido opuesto.
- El vehículo rebasa una señal de adelantamiento permitido: inicio de zona de adelantamiento.

Igualmente, el punto final de dicho hueco se definía por alguno de los siguientes motivos:

- Cruce con un vehículo opuesto (definiendo un hueco real entre dos vehículos).
- Existencia de distancia de visibilidad limitada (definiendo un hueco virtual, asumiendo que un vehículo podría aparecer en el instante inicial del hueco desde el límite de visibilidad disponible).

A lo largo del proceso de seguimiento del vehículo adelantante se midieron o estimaron los distintos huecos que son rechazados por el mismo así como el hueco que finalmente es aceptado. Los huecos se midieron tanto en unidades de tiempo (desde el punto de vista del conductor del vehículo adelantante) como en unidades de distancia.

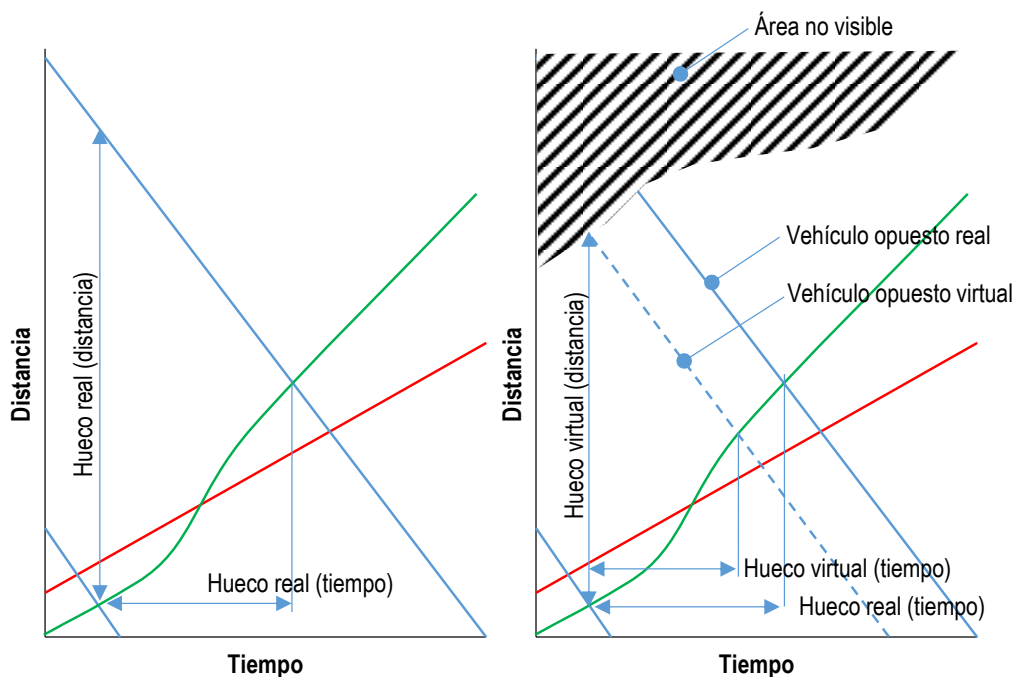


Figura 7-17. Huecos con vehículos opuestos visibles y huecos limitados por la visibilidad disponible

7.3.3.4.1. Hueco

Un hueco es el tiempo o distancia existente entre dos vehículos que circulan en sentido opuesto. Para un conductor que se encuentra siguiendo a otro, un hueco suficientemente grande era una oportunidad para realizar la maniobra de forma cómoda y segura. Los huecos pueden, por lo tanto, ser rechazados o aceptados. A cada hueco se le asignó el valor de la variable Aceptación, siendo igual a 1 si se acepta e igual a 0 si se rechaza.

Existen distintas definiciones de huecos aplicables al caso de la maniobra de seguimiento y adelantamiento, tal como se muestra en la Figura 7-18. En ella, cada uno de los tiempos se define a continuación:

- t_0 : inicio del hueco, definido bien por el cruce del vehículo adelantante (o perseguidor) con un vehículo opuesto o por el rebase de una señal de “fin de prohibición de adelantamiento”.
- t_3 : fin de la maniobra (solo si el hueco fue aceptado).
- t_4 : fin del hueco aceptado, producido por el cruce entre el vehículo adelantante (o perseguidor) y el opuesto.
- t_4' : fin del hueco rechazado (o fin del hueco aceptado estimado si se hubiera rechazado), definido de forma análoga a t_4 .

En base a ello se definieron los distintos conceptos aplicables al hueco:

- $dGap$: es el hueco medido en unidades de distancia, correspondiente a la distancia libre existente entre dos vehículos que circulan en el flujo de tráfico opuesto.
- $sGap$ (hueco estático): es el intervalo de tiempo entre dos vehículos consecutivos que circulan en el flujo de tráfico opuesto, medidos como lo haría un observador situado en el exterior de la carretera. No se utiliza, puesto que no refleja la percepción del conductor que desea adelantar, sino la de un observador externo.

$$sGap = \frac{dGap}{V_o}$$

Ecuación 7-2

Donde V_o es la velocidad del opuesto.

- *Gap* (hueco dinámico): es el intervalo de tiempo entre dos vehículos consecutivos que circulan en el flujo de tráfico opuesto, medidos como lo haría el conductor del vehículo adelantante o perseguidor.

$$Gap = t_4 - t_0 = \frac{dGap}{V_o + V_p}$$

Ecuación 7-3

Donde V_o es la velocidad del vehículo opuesto y V_p la velocidad del vehículo adelantante o perseguidor.

- *Gapr* (hueco dinámico – rechazado): esta definición se aplica a huecos aceptados, y corresponde con el hueco dinámico equivalente a $dGAP$, suponiendo que el hueco realmente hubiera sido rechazado. El objetivo de este concepto es la comparación homogénea de huecos aceptados y rechazados.

$$Gapr = \frac{dGap}{V_o + V_p^*} = t_4' - t_0 \neq t_4 - t_0$$

Ecuación 7-4

Donde V_p^* es la velocidad del vehículo adelantante si se hubiera mantenido a la cola, es decir, la velocidad del vehículo adelantado V_i .

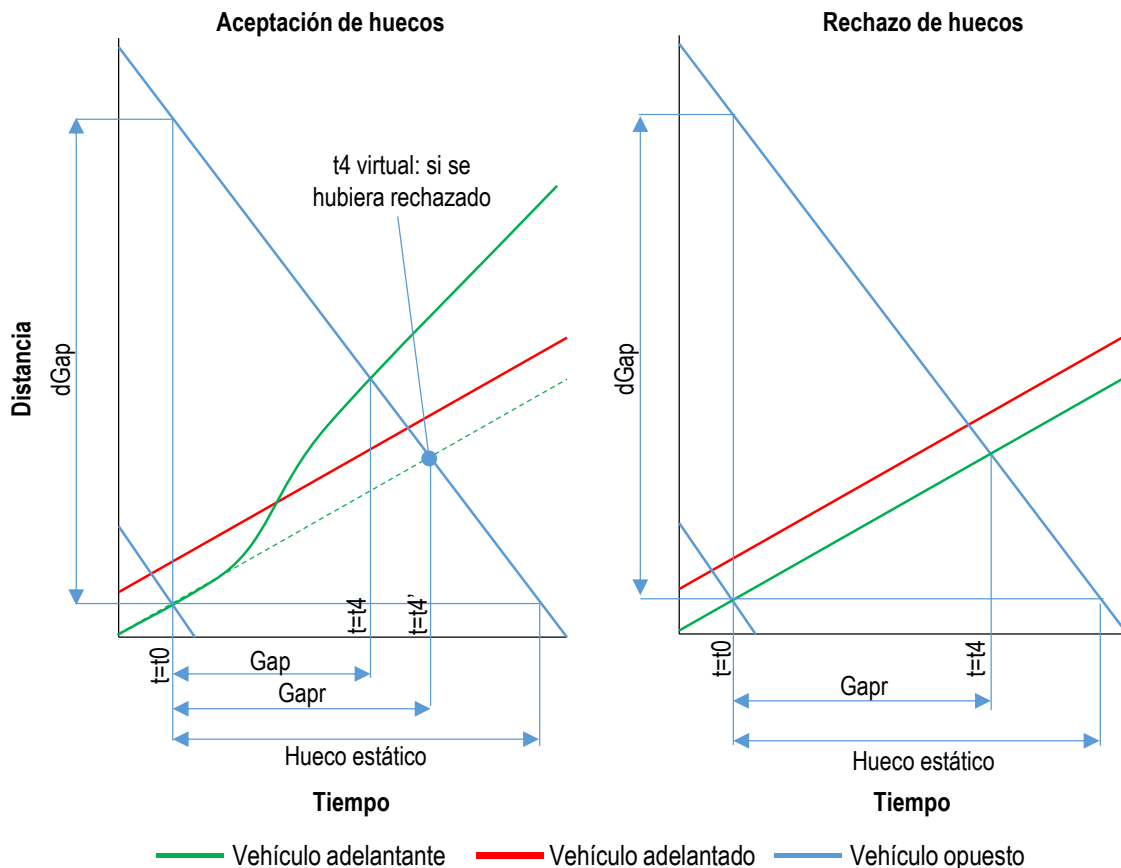


Figura 7-18. Definiciones alternativas de hueco

En el caso de existir un vehículo acercándose en el momento de la aceptación o el rechazo del hueco, el cálculo de los huecos se realizó a partir de la medición de las variables, t_0 , t_4 , V_i , V_p y la estimación de V_o (igual a la velocidad de diseño de la vía).

Sin embargo, es muy frecuente que las maniobras de adelantamiento se lleven a cabo en ausencia de vehículos acercándose en sentido opuesto. En estos casos, no se dispone de una medición del tiempo t_4 . Sin embargo, el hueco que realmente se está aceptando o rechazando es igual a la distancia de visibilidad disponible (ASD) en el punto donde se localiza el vehículo seguidor. Este valor de ASD se corresponde con el hueco en unidades de distancia ($dGAP$).

Para obtener los huecos medidos en unidades de tiempo, se definió el concepto de vehículo opuesto virtual. En maniobras no limitadas por la presencia de un vehículo opuesto, el hueco se acepta o se rechaza suponiendo que, en el peor de los casos, aparecerá un vehículo opuesto desde el punto más alejado visible por el conductor perseguidor. De esta forma, este vehículo, que se denominó virtual, se acerca al adelantante a la velocidad de diseño de la vía, y se cruza con él en un instante t_4 virtual, permitiendo de esta forma obtener los valores de Gap y Gap_r .

No obstante, dado que se esperaba que el comportamiento del conductor fuera distinto en ambas situaciones (limitadas por vehículo opuesto y por distancia de visibilidad), a cada hueco, además de asignarle el valor de la variable de aceptación (*Aceptación*) se le asignó también el valor de la variable *Opuesto* (visibilidad del opuesto), siendo igual a 0 si no existe un opuesto visible, e igual a 1 si lo hay.

7.3.3.4.2. Hueco residual

Análogamente, otros autores han basado el estudio de la aceptación de huecos en el análisis del hueco residual (TTC , de time to collision), es decir, el tiempo desde la finalización de la maniobra hasta el cruce con el vehículo que se aproxima en sentido opuesto (t_4-t_3). Habitualmente, el valor del hueco residual se ha usado como indicador de conflicto, siendo equivalente al Time To Collision (TTC) en intersecciones, por lo que lleva su mismo nombre (Hegeman et al., 2009; Farah et al., 2009; Ghods y Saccommanno, 2014).

En el caso de no existir vehículos acercándose, se empleó, de forma análoga, el concepto de vehículos virtuales acercándose desde el punto de la carretera más alejado dentro de la visibilidad disponible. En el caso de ser hueco rechazado, se aproximó el concepto de hueco residual como la diferencia entre el hueco disponible y el tiempo de ocupación del carril izquierdo (t_3-t_1). Esta diferencia fue, en muchos casos, negativa.

Por lo tanto, a cada valor de hueco residual (TTC) se le asignó, igualmente, el valor de la variable *Aceptación* y el de la variable *Opuesto*.

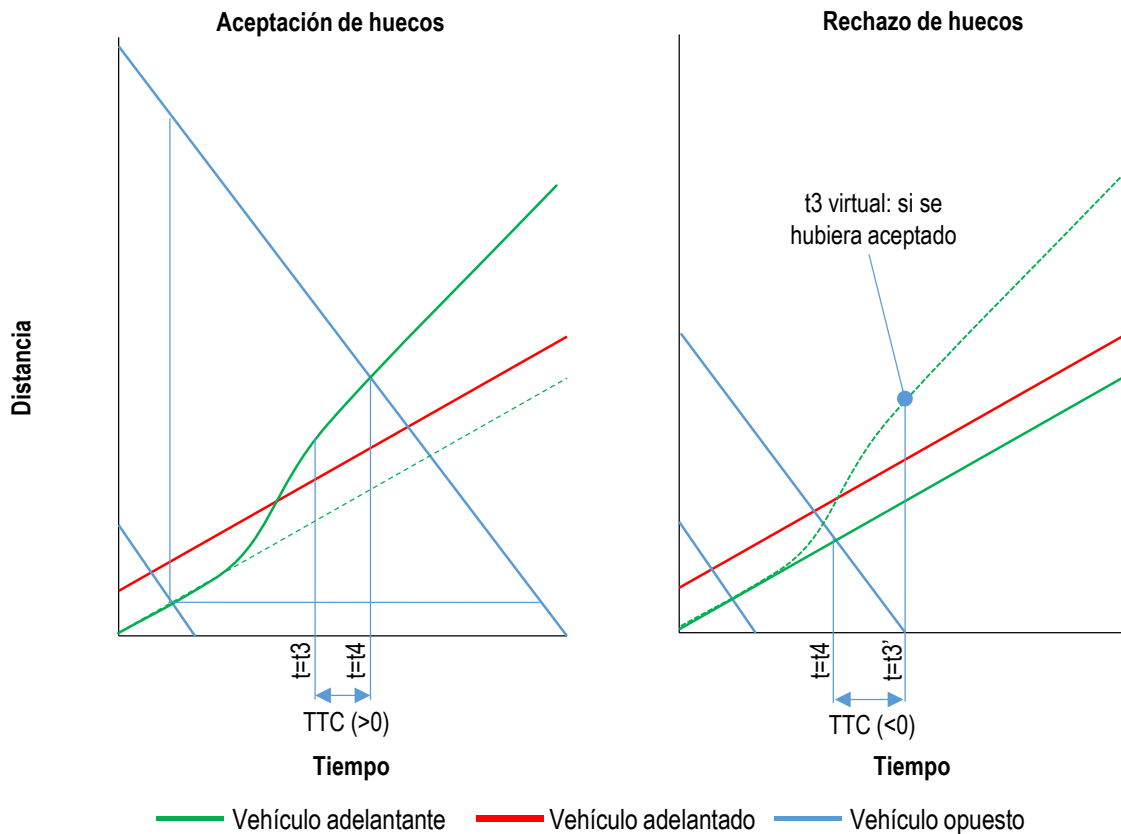


Figura 7-19. Hueco residual

7.3.3.4.3. Demora

Adicionalmente, en el inicio de cada hueco se midió el tiempo transcurrido desde la entrada en la cola hasta dicho instante. El tiempo en cola (T_{cola}) va avanzando desde la entrada en la cola hasta la aceptación del hueco en el que se adelanta, y toma valores nulos para maniobras lanzadas. El tiempo en cola es una medida de la demora acumulada por el conductor que desea adelantar mientras realiza el seguimiento.

7.3.3.5. Fase de adelantamiento

El último paso en la reducción de datos fue la caracterización del recorrido del vehículo adelantante durante la maniobra de rebase al vehículo adelantado, momento en el cual se ocupa el carril contrario, y en el que se produce la situación potencialmente conflictiva del adelantamiento.

En primer lugar, y mediante el procedimiento de visionado de videos en software de reproducción, se identificaron los siguientes instantes temporales en todas las maniobras, tanto en la metodología dinámica como en la estática:

- t_0 : inicio del hueco aceptado.
- t_1 : inicio de la maniobra, definido por el inicio de ocupación del carril izquierdo por parte del vehículo adelantante.
- t_2 : la parte frontal del vehículo adelante y del adelantado se encuentran en paralelo.
- t_3 : fin de la maniobra, definido por la finalización de la ocupación del carril izquierdo.
- t_4 : fin del hueco aceptado, definido por el cruce con el vehículo opuesto que se aproxima, o bien por el cruce con un vehículo opuesto virtual que aparecería en t_0 en el punto visible más alejado.

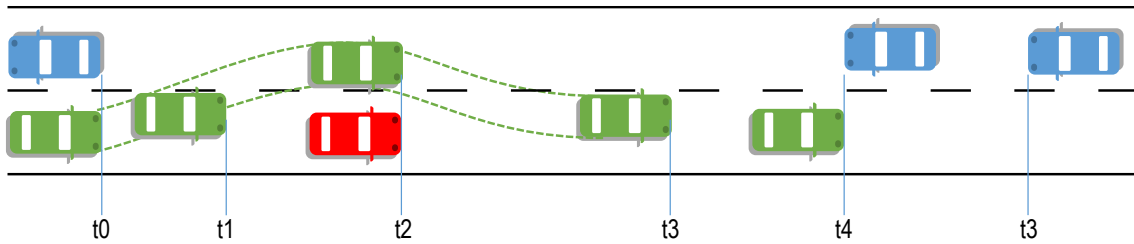


Figura 7-20. Instantes temporales en la maniobra de adelantamiento

Una vez identificados los instantes temporales (Figura 7-20), se han computado los intervalos de tiempo más significativos (Figura 7-21), si bien en cada etapa del análisis pueden definirse otros:

- $t4 - t0$: hueco aceptado.
- $t1 - t0$: parte del tiempo de reacción y decisión.
- $t3 - t1$: tiempo de ocupación del carril izquierdo.
- $t2 - t1$: tiempo necesario hasta alcanzar la posición en paralelo.
- $t4 - t3$: margen de seguridad o tiempo hasta la colisión (Time to Collision - *TTC*) al finalizar la maniobra.

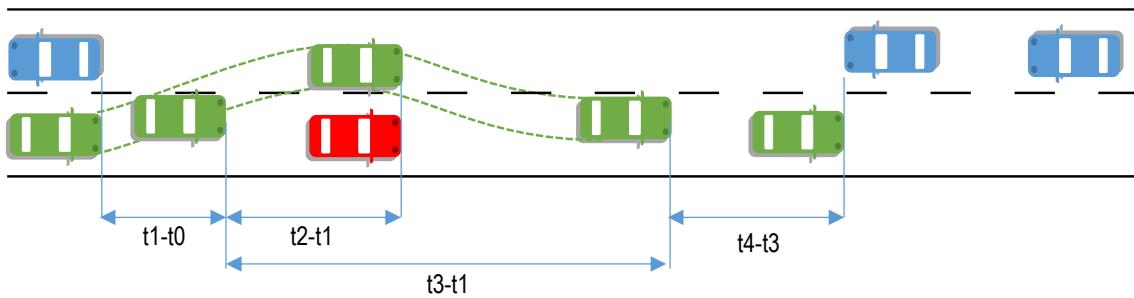


Figura 7-21. Intervalos de tiempo de la maniobra de adelantamiento

Una vez caracterizadas las magnitudes en tiempo, se obtuvieron distintas distancias de recorrido y velocidades.

Las variables en unidades de distancia (Figura 7-22) que se definieron para el estudio son las siguientes:

- distancia recorrida por el vehículo adelantante entre los instantes t_j y t_k ($dpjk$).
- distancia recorrida por el vehículo adelantado entre los instantes t_j y t_k ($dijk$).
- hueco entre el vehículo adelantado y adelantante en el instante t_j (h_j).

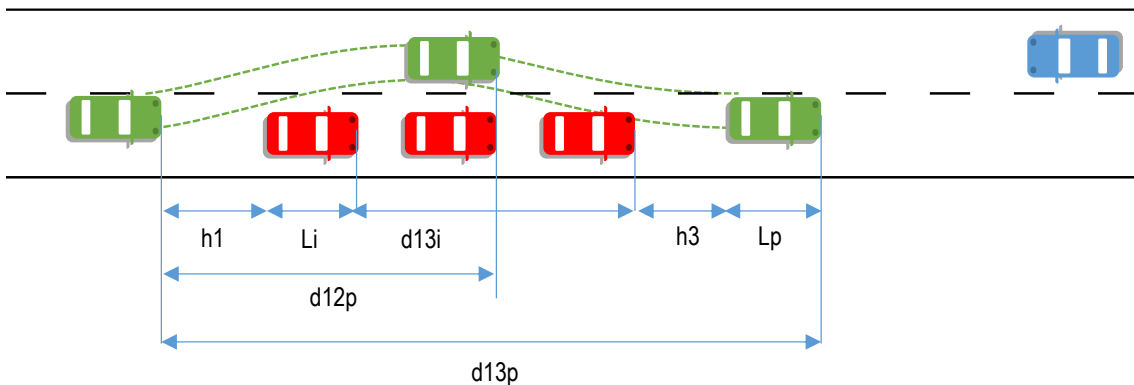


Figura 7-22. Variables en unidades de distancia en la maniobra de adelantamiento

Por último, las variables en unidades de velocidad que se escogieron para caracterizar el adelantamiento son:

- Velocidad instantánea del vehículo adelantado (V_{ij}).
- Velocidad instantánea del vehículo adelantante (V_{pj}).
- Velocidad instantánea relativa respecto del adelantado (dV_j).
- Velocidad media del vehículo adelantado entre t_j y t_k (V_{ijk}).
- Velocidad media del vehículo adelantante entre t_j y t_k (V_{pjk}).
- Velocidad media relativa respecto del adelantado (dV_{jk})

El procedimiento de reducción de datos de tiempos se aplicó tanto a la metodología estática como a la dinámica. Sin embargo, la reconstrucción detallada de las distancias y velocidades se realizó principalmente para el caso de la metodología dinámica, dado el mayor nivel de detalle alcanzable.

En el caso de la metodología estática, únicamente se midieron las velocidades medias de una muestra de vehículos adelantados y adelantantes, con el objeto de relacionarlas con la velocidad de operación en flujo libre en la misma zona, tal como se desarrollará más adelante. En este caso, se definieron una serie de referencias espaciales dibujando líneas transversales sobre la carretera observada. La velocidad media se calculó a partir del cociente entre la distancia y el tiempo de recorrido entre dos referencias conocidas.

En cuanto a la reconstrucción de las trayectorias en la metodología dinámica, se aplicó el procedimiento descrito a continuación. La distancia recorrida por el vehículo adelantado, es decir, por el vehículo flotante instrumentalizado, era conocida y proporcionada por el receptor GPS instalado a bordo.

Para la obtención de las distancias h_1 y h_3 se emplearon los distanciómetros laser instalados a bordo del vehículo instrumentalizado. Para ello, se identificaron los instantes t_1 y t_3 en los listados de datos de distancias de cada uno de los distanciómetros. En la Figura 7-23 se observa el resultado de la medida captada por los distanciómetros durante el tiempo en seguimiento y tras el adelantamiento. A partir de estos datos, también fue posible obtener las velocidades instantáneas al inicio y al final de la maniobra.

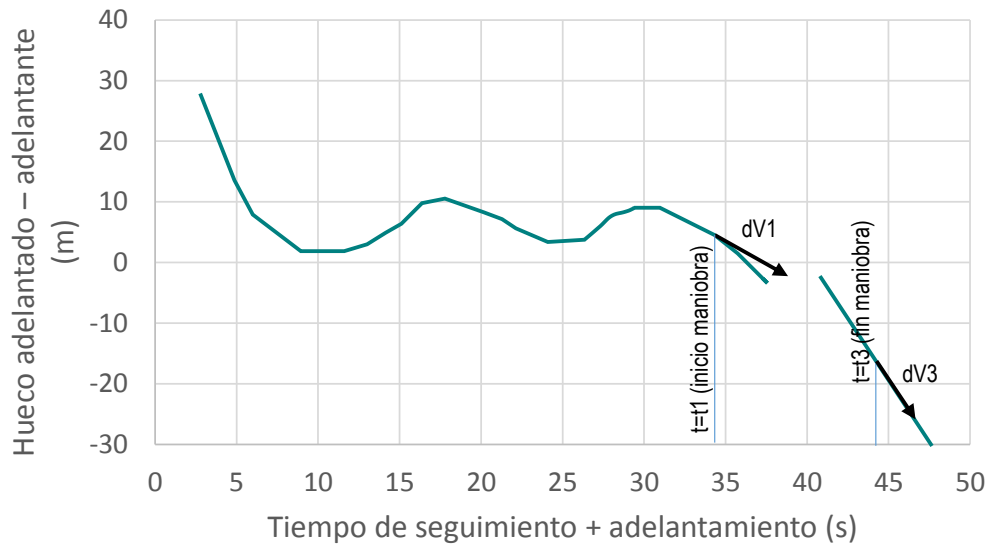


Figura 7-23. Medición del distanciómetro trasero (antes de la maniobra) y delantero (después de la maniobra)

Los distanciómetros empleados proporcionaron la distancia al objeto que se encuentra alineado con el dispositivo, siendo la divergencia del haz láser muy reducida. Por este motivo, en algunos casos no fue posible la captación del vehículo adelantante, debido a su posición en el carril o a la existencia de curvas horizontales en el instante de la medida. En estos casos se utilizó la técnica de la restitución de perspectivas para estimar su distancia.

Las siguientes ecuaciones relacionan las variables relativas a la trayectoria de los vehículos implicados en la maniobra, de modo que es posible obtener alguna de ellas a partir de las otras.

La distancia recorrida por el vehículo adelantante se calcula a partir de la Ecuación 7-5.

$$d_{13p} = d_{13i} + L_i + L_p + h_1 + h_3 \quad \text{Ecuación 7-5}$$

Del mismo modo, las velocidades medias de los vehículos adelantantes y adelantados se obtienen como se indica en la Ecuación 7-6.

$$\text{Adelantante: } V_{p13} = \frac{d_{13p}}{t_3 - t_1} \quad \text{Ecuación 7-6}$$

$$\text{Adelantado: } V_{i13} = \frac{d_{13i}}{t_3 - t_1}$$

7.3.4. Resumen

A continuación se resumen las distintas variables consideradas, indicando en qué metodología o metodologías experimentales fueron aplicables.

Código	Descripción	Unidades	Estática	Dinámica
Nivel tramo				
Carretera	Tramo de carretera	-		sí
V_d	Velocidad de diseño	km/h		sí
V_m	Velocidad límite	km/h		sí
IMD	Intensidad media diaria	vpd		sí

Código	Descripción	Unidades	Estática	Dinámica
<i>IH</i>	Intensidad horaria	vph		sí
<i>%HV</i>	Porcentaje de pesados	-		sí
<i>V85</i>	Percentil 85 de la velocidad de operación en flujo libre	km/h		sí
Nivel zona				
<i>PZL</i>	Longitud de zona de adelantamiento permitido	m		sí
<i>ASD</i>	Visibilidad disponible	m		sí
<i>Sección</i>	Sección transversal	con arcén / sin arcén		sí
Nivel maniobra: general				
<i>Ni</i>	Numero de vehículos adelantados	vehículos		sí
<i>Np</i>	Número de vehículos adelantantes simultáneos	vehículos		sí
<i>Tipoi</i>	Tipo de vehículo adelantado	L/P		sí
<i>Categoríai</i>	Categoría de vehículo adelantado	-		sí
<i>Tipop</i>	Tipo de vehículo adelantante	L/P		sí
<i>Categoríap</i>	Categoría de vehículo adelantante	-		sí
<i>Inicio</i>	Modo de inicio	lanzado/seguimiento		sí
<i>Fin</i>	Modo de finalización	completado/abortado		sí
<i>Li</i>	Longitud del vehículo adelantado	m		sí
<i>Lp</i>	Longitud del vehículos adelantante	m		sí
<i>Iluminación</i>	Condiciones de iluminación	diurna/nocturna		sí
Nivel maniobra: conductor				
<i>Edad</i>	Edad del conductor adelantante	años	no	sí
<i>Sexo</i>	Sexo del conductor adelantante	H/M	no	sí
<i>Ocupantes</i>	Número de ocupantes en el vehículo adelantante	ocupantes	no	sí
Nivel maniobra: decisión				
<i>Tcola</i>	Tiempo en cola	s	no	sí
<i>Gap</i>	Hueco dinámico en el sentido opuesto	s	no	sí
<i>rGAP</i>	Hueco dinámico rechazado equivalente en el sentido opuesto	s	no	sí
<i>dGAP</i>	Hueco en el sentido opuesto (en distancia)	m	no	sí
<i>Aceptación</i>	Aceptación del hueco	si/no	no	sí
<i>TTC</i>	Hueco residual	s	no	sí
<i>Opuesto</i>	Existencia de opuesto visible	si/no	no	sí
Nivel maniobra: tiempos				
<i>tj</i>	Instante <i>j</i>	s	sí	sí
<i>tj-tk</i>	Intervalo de tiempo entre <i>tj</i> y <i>tk</i>	s	sí	sí
Nivel maniobra: distancia recorrida				
<i>dpjk</i>	Distancia recorrida por el vehículo adelantante entre <i>tj</i> y <i>tk</i>	m	sí	sí
<i>dijk</i>	Distancia recorrida por el vehículo adelantado entre <i>tj</i> y <i>tk</i>	m	sí	sí
Nivel maniobra: huecos o distancias de seguridad				
<i>h1</i>	hueco al inicio de la maniobra	m	no	sí
<i>h3</i>	hueco al final de la maniobra	m	no	sí
Nivel maniobra: velocidades				
<i>Vpj</i>	Velocidad instantánea del vehículo adelantante en <i>tj</i>	km/h o m/s	no	sí
<i>dVj</i>	Velocidad instantánea relativa en <i>tj</i>	km/h o m/s	no	sí

Código	Descripción	Unidades	Estática	Dinámica
V_{ik}	Velocidad instantánea del vehículo adelantado en t_k	km/h o m/s	no	sí
V_{pjk}	Velocidad media del vehículo adelantante entre t_j y t_k	km/h o m/s	sí	sí
V_{ijk}	Velocidad media del vehículo adelantado entre t_j y t_k	km/h o m/s	sí	sí
dV_{jk}	Velocidad media relativa entre t_j y t_k	km/h o m/s	sí	sí

Tabla 7-3. Variables del estudio

8. Ejecución experimental

En este capítulo se resumen las actividades de toma de datos realizadas empleando las metodologías descritas.

8.1. Metodología estática

La metodología estática, basada en el uso del laboratorio móvil de tráfico, se empleó en 8 emplazamientos distintos, lo que permitió la observación de maniobras de adelantamiento en 18 zonas de adelantamiento. En 4 de ellas, se grabaron también adelantamientos en horario nocturno.

Tal como puede observarse, en algunas localizaciones, como la E3 y la E8, el alcance de las cámaras permitió grabar más de una zona simultáneamente. De esta forma se optimizó la toma de datos.

Código	Localización	Prueba	Fecha	Duración (h)	Iluminación	Maniobras	Tramo metodología dinámica
Casinos	CV-35 Pk 44+500	E1	2/16/2010	4:05	diurno	120	T2
Vilamarxant	CV-50 Pk 84+500	E2	3/11/2010	4:00	diurno	100	T3
Carlet 1	CV-50 Pk 37+000	E3	4/8/2010	2:55	diurno	8	T4
Carlet 2	CV-50 Pk 37+500	E3	4/8/2010	2:55	diurno	8	T4
Cheste	CV-50 Pk 77+000	E4	10/13/2011	2:50	diurno	26	T3
Riba-roja	CV-37 Pk 14+000	E5	10/20/2011	3:15	diurno	67	-
Marines	CV-25 Pk 5+000	E6	10/20/2011	3:00	diurno	83	-
Calles	CV-35 Pk 90+500	E7	11/8/2011	5:55	diurno	20	-
Algar de Palancia	N-225 Pk 5+000	E8	2/28/2012	4:30	diurno	55	T1
Algar de Palancia	N-225 Pk 5+000	E8	2/28/2012	4:30	nocturno	116	T1
Algar de Palancia	N-225 Pk 6+000	E8	2/28/2012	2:00	diurno	15	T1
Algar de Palancia	N-225 Pk 6+000	E8	2/28/2012	2:00	nocturno	30	T1

Tabla 8-1. Resumen de las sesiones de toma de datos mediante la metodología estática

Tal como se puede apreciar en la Tabla 8-1, la toma de datos mediante la metodología estática acumuló un total de 41 h 55 minutos (83 horas y 50 minutos, si se consideran por separado ambos sentidos de circulación), en las que se registraron 648 maniobras de adelantamiento. En gran parte de las localizaciones se realizó también el estudio empleando la metodología dinámica.

En la Tabla 8-2 se resumen las características de las zonas de adelantamiento observadas, incluyendo las velocidades de diseño (inferidas a partir de la mínima de las velocidades específicas

de los elementos del trazado en el tramo en el que se sitúa la zona) y la velocidad máxima permitida. Tal como se expresó en el apartado de metodología, la búsqueda de localizaciones abarcó una variedad significativa de velocidades de diseño (entre 70 y 120 km/h) y se centró en carreteras con sección 7/10 e intensidades medias diarias en el rango de 2.500 a 10.000 veh/día.

Código	Localización	Número de zonas de adelantamiento	IMD (veh/d)**	Sección transversal (***)	Velocidad de diseño (km/h)	Velocidad máxima permitida (km/h)	Longitud de la zona de adelantamiento (m) (sentido ascendente)	Longitud de la zona de adelantamiento (m) (sentido descendente)
E1 (Casinos)	CV-35 Pk 44+500	2*	5797	7/10	120	100	1265	1130
E2 (Vilamarxant)	CV-50 Pk 84+500	2*	4517	7/10	****	100	850	600
E3 (Carlet 1)	CV-50 Pk 37+000	2*	5091	7/10	90	100	265	230
E3 (Carlet 2)	CV-50 Pk 37+500	2*	5091	7/10	90	100	270	285
E4 (Cheste)	CV-50 Pk 77+000	2*	4517	7/10	80	100	755	990
E5 (Riba-roja)	CV-37 Pk 14+000	2*	7775	7/10	****	100	550	560
E6 (Marines)	CV-25 Pk 5+000	2*	10267	7/10	****	100	1000	1000
E7 (Calles)	CV-35 Pk 90+500	2*	2366	7/10	70	100	540	522
E8 (Algar de Palancia)	N-225 Pk 5+000	2*	5925	7/10	100	100	507	265
E8 (Algar de Palancia)	N-225 Pk 6+000	2*	5925	7/10	100	100	1050	1270
*Una zona por cada sentido de circulación								
**Datos de 2011 y valor medio del tramo								
***ancho calzada/ancho plataforma (m)								
***no se ha calculado. Las zonas de adelantamiento están entre 2 glorietas								

Tabla 8-2. Características de las localizaciones de la metodología estática

Por último, en la Figura 8-1 se muestra el mapa de localizaciones observadas mediante la metodología estática.



Figura 8-1. Mapa de localización de las zonas de adelantamiento observadas con la metodología estática

8.2. Metodología dinámica

La metodología dinámica se basa en la circulación del vehículo instrumentalizado descrito anteriormente. El vehículo ligero instrumentalizado se empleó en 10 sesiones de toma de datos, mientras que el camión fue alquilado para una única sesión de larga duración.

En total, el vehículo ligero circuló por seis tramos de carretera (denominados T1 a T6). En uno de ellos (T1, N-225) se hicieron dos sesiones de toma de datos nocturna. En otro (T3, CV-50), se realizó la toma de datos también mediante el camión instrumentalizado.

Código tramo	Localización	Código Prueba	Fecha	Duración (h)	Iluminación	Maniobras	Total	Vehículo
T1	N-225 Pk 0+000 a 15+000	D0	3/28/2011	1:25	diurno	26	89	turismo
T1	N-225 Pk 0+000 a 15+000	D4	2/6/2012	5:50	diurno	63		turismo
T1	N-225 Pk 0+000 a 15+000	D5	5/3/2012	2:00	nocturno	12	47	turismo
T1	N-225 Pk 0+000 a 15+000	D9	11/15/2012	2:30	nocturno	35		turismo
T2	CV-35 Pk 40+000 a 50+000	D1	4/11/2011	3:10	diurno	42	40	turismo
T3	CV-50 Pk 76+000 a 86+000	D2	5/5/2011	3:30	diurno	51	101	turismo
T3	CV-50 Pk 76+000 a 86+000	D8	11/8/2012	3:00	diurno	50		turismo
T4	CV-50 Pk 34+000 a 40+000	D3	5/8/2011	3:45	diurno	54	54	turismo
T5	CV-415 Pk 1+000 a 9+500	D6	9/13/2012	4:00	diurno	55	85	turismo
T5	CV-415 Pk 1+000 a 9+500	D7	11/8/2012	2:30	diurno	30		turismo
T6	CV-405 3+500 a 13+500	D10	11/20/2012	4:00	diurno	75	75	turismo
T3	CV-50 Pk 76+000 a 86+000	D11	10/2/2012	8:00	diurno	60	60	camión

Tabla 8-3. Resumen de las sesiones de toma de datos mediante la metodología dinámica

En la Tabla 8-3 se recogen los resultados de la toma de datos mediante el vehículo instrumentado. Con esta metodología se observaron un total de 551 maniobras de adelantamiento, siendo la práctica totalidad de las mismas mediante el vehículo ligero instrumentado.

En la Tabla 8-4 y en la Tabla 8-5 se resumen las principales características de los tramos. La velocidad de diseño oscila entre los 70 y los 120 km/h. Las velocidades del vehículo instrumentado fueron 60, 70, 80 o 90 km/h, en función de las velocidades de diseño de cada una de las localizaciones, y basándose en las velocidades de los vehículos que fueron adelantados en las sesiones de toma de datos mediante la metodología estática. La duración de la toma de datos alcanzó las 43 horas 40 minutos.

Los tramos escogidos tenían una longitud variable entre 6 y 15 km, y un número de zonas de adelantamiento de entre 10 y 22, lo que permitió realizar sucesivas pasadas por las mismas zonas de adelantamiento. Todos los tramos abarcan un rango de longitudes de adelantamiento comparable, contando solo alguno de ellos con zonas muy cortas (de menos de 200 m). El porcentaje de zonas de adelantamiento prohibido se mantiene aproximadamente constante, entre el 47% y el 59%.

Las características detalladas de estos tramos se incluyen el Anexo V.

Código	Localización	Número de zonas de adelantamiento	Longitud del tramo (km)	/MD (veh/d)*	Velocidad de diseño (km/h)	Sección transversal (**)	Velocidad máxima permitida (km/h)***	Velocidad vehículo instrumentalizado (km/h)
T1	N-225 Pk 0+000 a 15+000	17	15,0	5925	100	7/10	100	80
T2	CV-35 Pk 40+000 a 50+000	10	10,0	5797	120	7/10	100	80 y 90
T3	CV-50 Pk 76+000 a 86+000	13	10,0	4517	80	7/10	100	60 y 70
T4	CV-50 Pk 34+000 a 40+000	12	6,0	5091	90	7/10	100	60 y 70
T5	CV-415 Pk 1+000 a 9+500	18	8,5	5465	70	6/6	90	60
T6	CV-405 3+500 a 13+500	22	10,0	1534 2	70	7/10	80	60
*Datos de 2011 y valor medio del tramo								
**ancho calzada/ancho plataforma (m)								
***en ausencia de limitaciones puntuales								

Tabla 8-4. Características de los tramos de la metodología dinámica (velocidad y tráfico)

Código	Localización	Longitud mínima de las zonas (m)	Longitud máxima de las zonas (m)	Longitud de adelantamiento (m)	%NPZ*
T1	N-225 Pk 0+000 a 15+000	265	1284	12421	59%
T2	CV-35 Pk 40+000 a 50+000	435	1855	9622	52%
T3	CV-50 Pk 76+000 a 86+000	268	1215	8394	58%
T4	CV-50 Pk 34+000 a 40+000	228	1127	6401	47%
T5	CV-415 Pk 1+000 a 9+500	99	1250	8797	51%
T6	CV-405 3+500 a 13+500	103	904	7934	59%
*Porcentaje de zonas de no adelantamiento en el tramo (No-Passing Zones) , considerando ambos sentidos					

Tabla 8-5. Características de los tramos de la metodología dinámica (zonas de adelantamiento)

Por último, la Figura 8-2 representa los tramos seleccionados sobre un mapa. Si se compara con la Figura 8-1 puede advertirse que un gran número de las localizaciones seleccionadas para la metodología estática fueron también registradas mediante la dinámica, de modo que existía un solape entre las muestras obtenidas, con el objeto de que ambas metodologías pudieran validarse mutuamente.

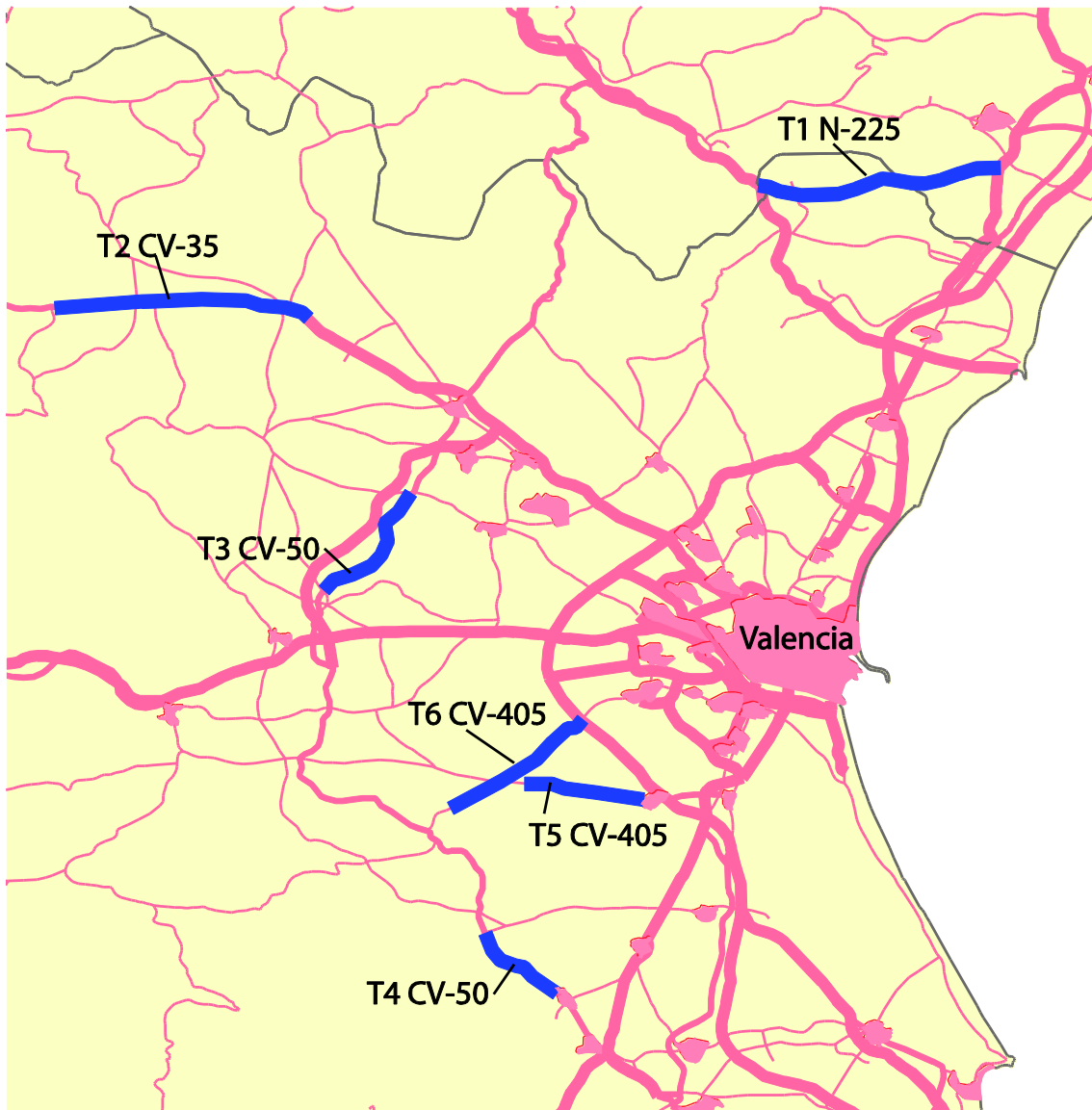


Figura 8-2. Mapa de localización de los tramos observados mediante la metodología dinámica

8.3. Medición de velocidades

La toma de datos complementaria para la medición de la velocidad de operación se llevó a cabo en 5 localizaciones ya estudiadas (con una muestra de maniobras significativa) mediante la metodología estática.

Prueba	Código	Localización	Número de vehículos con- tabilizados y medidos
V1	Vilamarxant	CV-50 Pk 84+500	108
V2	Cheste	CV-50 Pk 77+000	165
V3	Riba-Roja	CV-37 Pk 14+000	235
V4	Marines	CV-25 Pk 5+000	239
V5	Algar de Palancia	N-225 Pk 5+500	269
Total			1016

Tabla 8-6. Resumen de las sesiones de toma de datos de la medición de velocidades puntuales

Tal como se comentó en el apartado de metodología, que también puede verificarse en la Figura 8-3, las localizaciones de la medición de velocidades coinciden con parte de las localizaciones seleccionadas para la metodología estática.

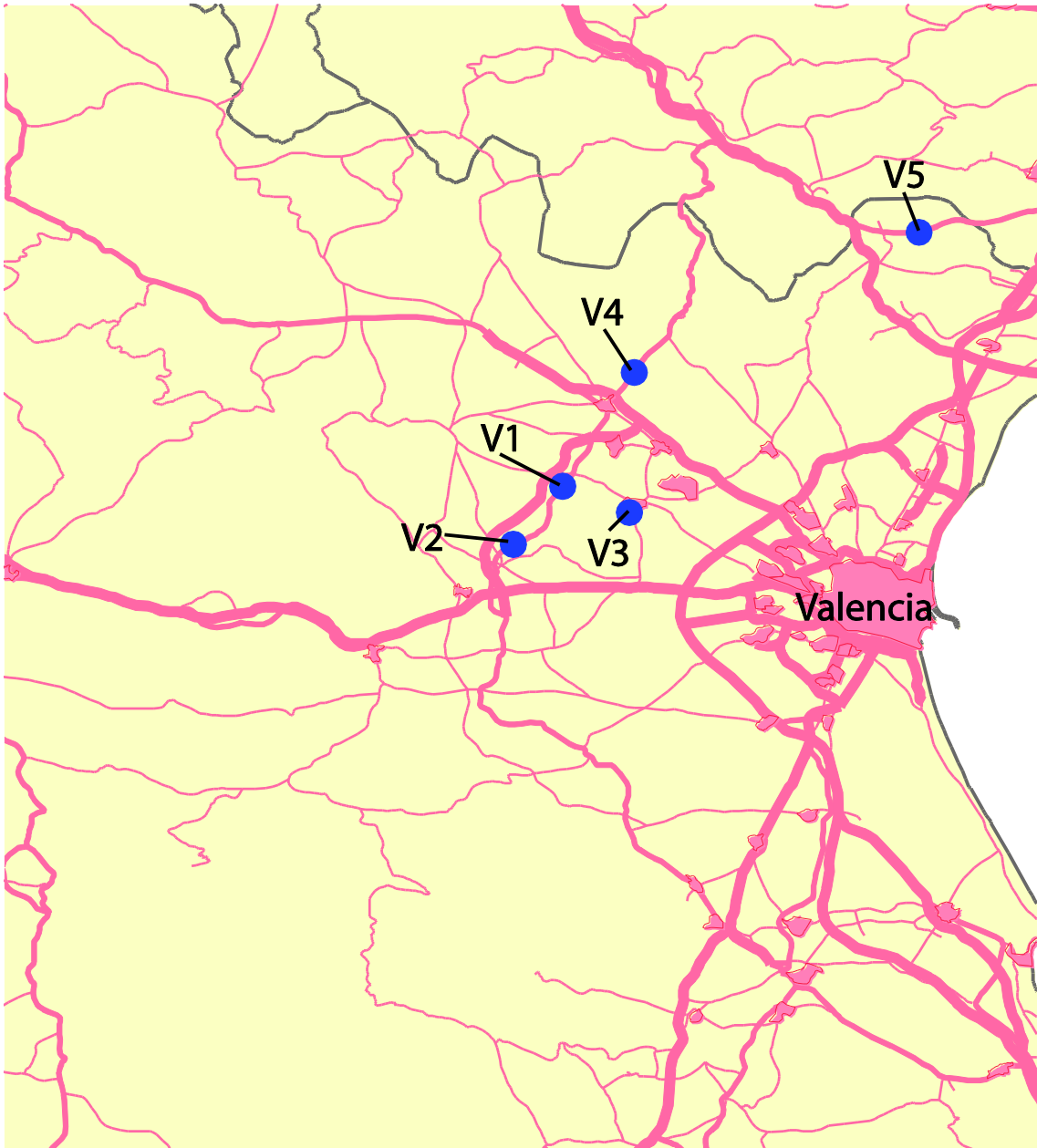


Figura 8-3. Mapa de localizaciones de mediciones de velocidad puntual

9. Análisis de la maniobra

El objeto de este apartado fue caracterizar cuantitativamente las distintas variables descriptivas, así como las correlaciones existentes entre ellas. Con todo ello, se formularon modelos para cada una de las fases del adelantamiento, llegando a describir el comportamiento de los conductores en el conjunto de maniobras observadas. Para ello, este apartado comienza con un análisis descriptivo de las distintas muestras de datos experimentales. A continuación se desarrolla un análisis estadístico de los distintos factores y su influencia en las distintas variables del adelantamiento, que da lugar a la formulación de modelos de decisión de adelantamiento y a modelos de evolución del vehículo adelantante. El objeto final de todo ello es un modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento.

9.1. Análisis descriptivo

Dado que se emplearon diversas metodologías (estática, dinámica y medición de velocidades), la descripción de cada una de las muestras se presenta, por el momento, de forma separada.

9.1.1. Metodología estática

Esta metodología ha permitido caracterizar 528 maniobras de adelantamiento, de un total de 648 maniobras detectadas (las diferencias se deben a maniobras que no fue posible caracterizar correctamente, al tener lugar muy lejos del punto de grabación). La composición y características de la muestra, en función de las variables descriptivas más importantes, se muestra en la Tabla 9-1 y en la Figura 9-1.

Tal como se aprecia en la Figura 9-1 y en la Tabla 9-1, la muestra obtenida mediante la metodología estática se compuso de un total de 528 maniobras de adelantamiento. En la mayor parte de las mismas, un vehículo ligero adelantó a un único vehículo lento. Las maniobras múltiples representaron un 9% del total. El vehículo adelantado fue un vehículo ligero en un 47% de los casos y en el 53%, un vehículo pesado. El 8% de las maniobras observadas tuvieron lugar en condiciones de iluminación nocturna, siendo todas ellas en la localización E8 (carretera N-225).

Criterio	Código	Valor		Número de casos
Localización	<i>Carretera</i>	E1	CV-35 Pk 44+500	120
		E2	CV-50 Pk 84+500	100
		E3	CV-50 Pk 37+000	16
		E4	CV-50 Pk 77+000	26
		E5	CV-37 Pk 14+000	67
		E6	CV-25 Pk 5+000	83
		E7	CV-35 Pk 90+500	20
		E8	N-225 Pk 5+000	96
Número de vehículos adelantados	<i>Ni</i>	1		480
		2		42
		3		6
Tipo de vehículo adelantado	<i>Tipo i</i>	ligero		279
		pesado		249
Tipo de vehículo adelantante	<i>Tipo p</i>	ligero		517
		pesado		11
Iluminación	<i>Iluminación</i>	diurna		484
		nocturna		44
Total				528

Tabla 9-1. Análisis descriptivo de la muestra obtenida con la metodología estática

Dentro del gran número de variables obtenidas mediante esta metodología, destacaron las mostradas en la Figura 9-1e. La medición de velocidades y distancias a partir del video fue un trabajo complejo y menos exacto que en la metodología dinámica, tal como se explicó en el apartado de reducción de datos. Por este motivo, solo se obtuvieron velocidades en aproximadamente el 30% de las maniobras. Por el contrario, la medición de tiempos fue mucho más sencilla durante el visionado de los videos. Por ello, se llegó a caracterizar en el 96% de las maniobras los tiempos de ocupación del carril izquierdo.

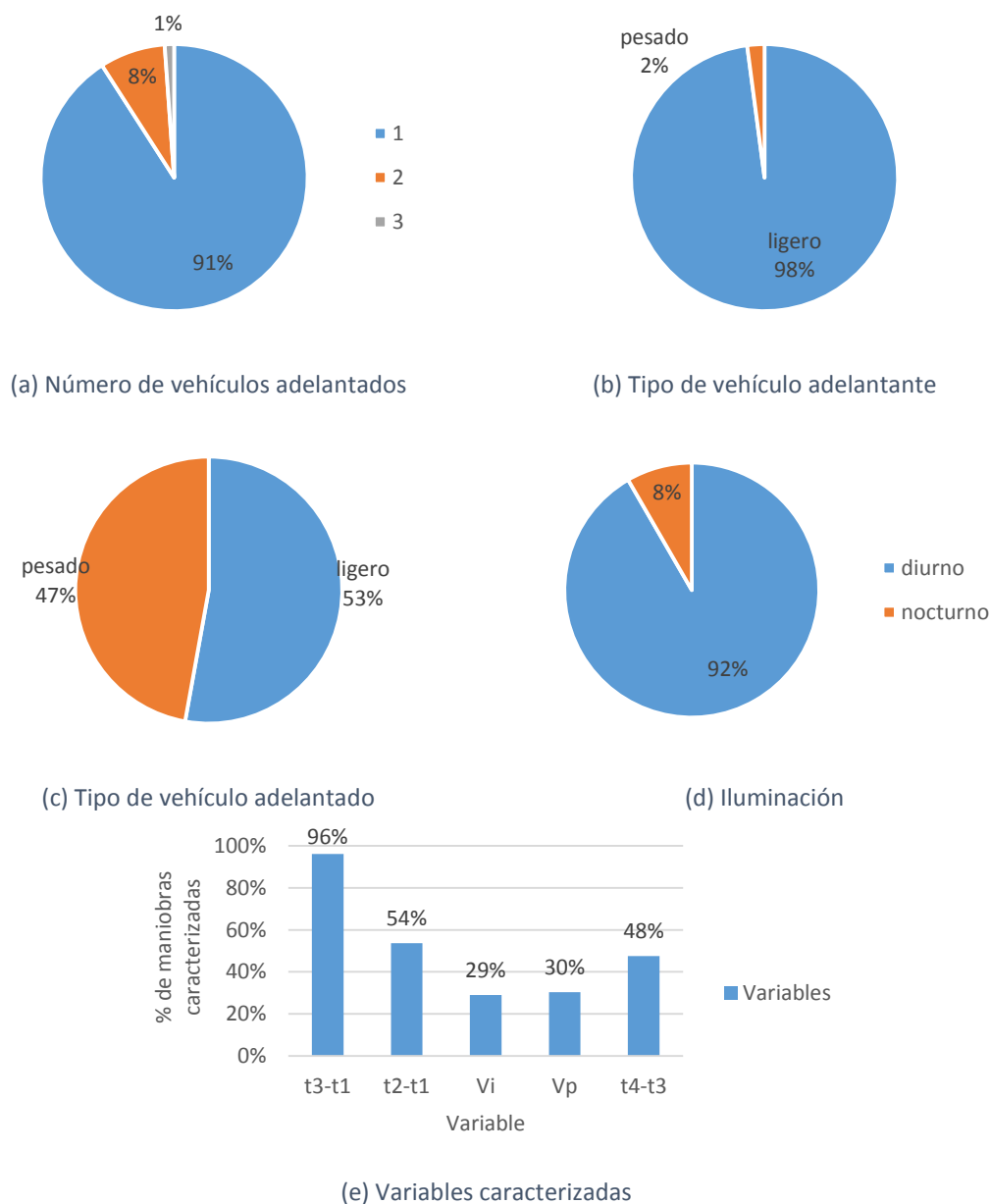


Figura 9-1. Análisis descriptivo de la muestra obtenida con la metodología estática

9.1.2. Metodología dinámica

De forma análoga, en la Tabla 9-2 y en la Figura 9-2 se describe la muestra obtenida mediante la metodología dinámica. En este caso, de las 551 observadas, se caracterizaron 521.

Se observaron 521 maniobras de adelantamiento empleando la metodología dinámica. En el 88% de las mismas se empleó el vehículo ligero instrumentalizado. En el 96% de las mismas el vehículo adelantante fue ligero. Las maniobras múltiples representaron un 15% de los casos. El 9% de las maniobras se observaron en horario nocturno, todas ellas en el tramo T1 (carretera N-225).

En el 92% de las maniobras se caracterizó el tiempo de ocupación del carril izquierdo, en el 66% de las mismas el hueco entre el adelantado y el adelantante ($h1$ y $h3$), en el 39%, las velocidades instantáneas iniciales y finales. Los parámetros del conductor (*Sexo* y *Edad*), pudieron registrarse en el 74% y el 69% de las observaciones, respectivamente.

Criterio	Código	Valor	Número de casos	
Localización	<i>Carretera</i>	T1	N-225 Pk 0+000 a 15+000	109
		T2	CV-35 Pk 40+000 a 50+000	42
		T3	CV-50 Pk 76+000 a 86+000	160
		T4	CV-50 Pk 34+000 a 40+000	54
		T5	CV-415 Pk 1+000 a 9+000	85
		T6	CV-405 3+500 a 11+500	71
Número de vehículos adelantados	<i>Ni</i>	1		443
		2		69
		3		9
Tipo de vehículo adelantado	<i>Tipo i</i>	ligero		461
		pesado		60
Tipo de vehículo adelantante	<i>Tipo p</i>	ligero		498
		pesado		23
Iluminación	<i>Iluminación</i>	diurna		474
		nocturna		47
Total				521

Tabla 9-2. Análisis descriptivo de la muestra obtenida con la metodología dinámica

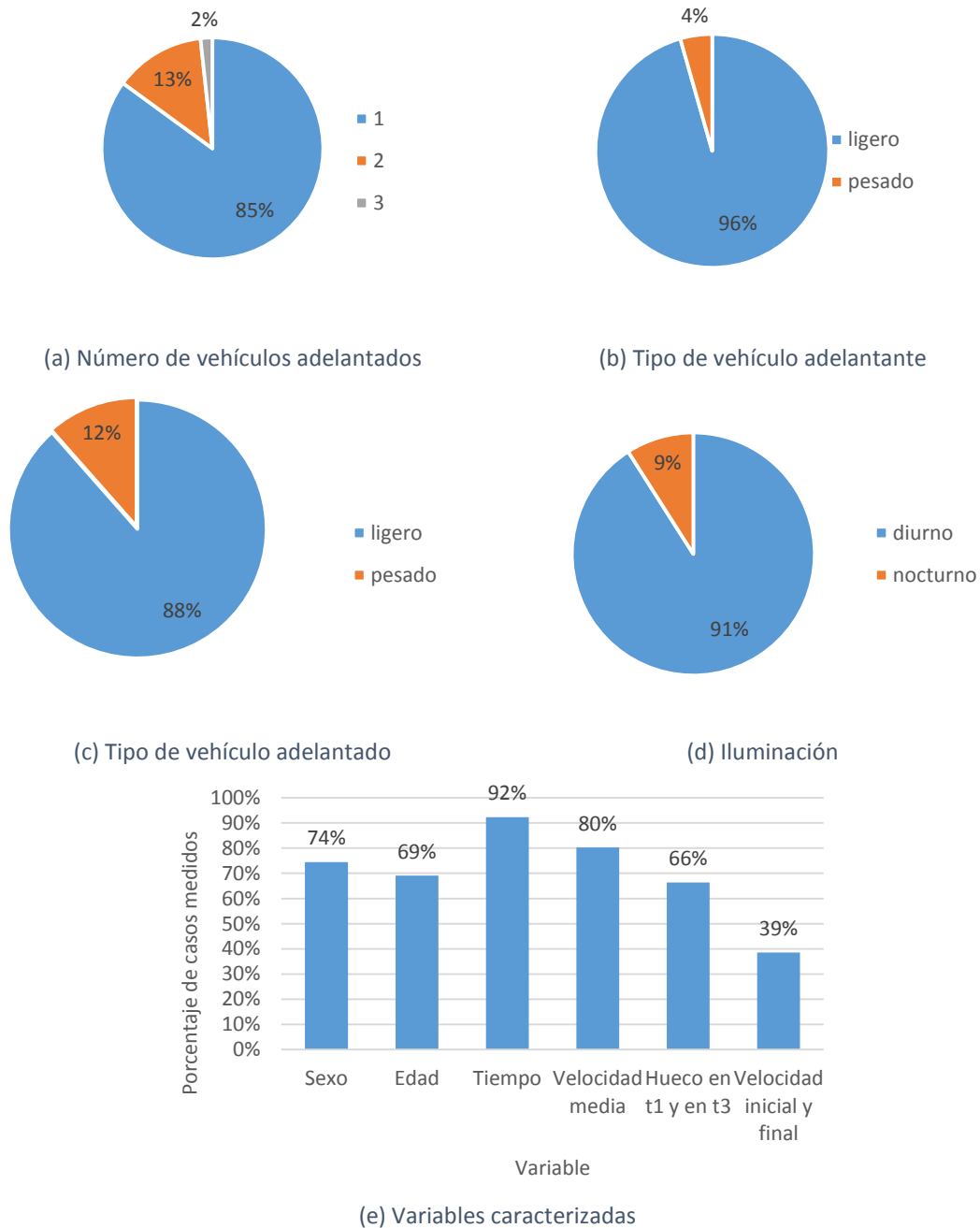


Figura 9-2. Análisis descriptivo de la muestra obtenida con la metodología dinámica

9.1.3. Medición de velocidades puntuales

Para el estudio de las velocidades puntuales, se instaló el dispositivo laser en 5 localizaciones. En cada una de ellas se obtuvieron las distribuciones de velocidad, tanto para el total de vehículos como para los vehículos ligeros circulando en flujo libre. En total, se han contabilizado 1.016 vehículos.

Además, en determinadas localizaciones se obtuvieron, a partir de las imágenes en forma de video, las velocidades de operación en flujo libre de una muestra de vehículos. En total, se midieron las velocidades en flujo libre de 714 vehículos.

9.2. Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico de las principales variables descriptivas de la maniobra. El análisis se dividió en dos partes, de acuerdo a las distintas fases de la maniobra: seguimiento (que afecta al deseo y a la decisión de adelantar) y adelantamiento (relacionado con la forma en la que los conductores llevan a cabo la maniobra). El resultado de esta sección fue un conjunto de modelos de adelantamiento, para caracterizar tanto las decisiones de adelantar como la distancia de visibilidad necesaria para ello.

En cada una de las fases, tras caracterizar cuantitativamente las variables dependientes, el análisis de los factores se estructuró en los siguientes grupos: vehículo (número y tipo de vehículos), conductor (características y comportamiento del conductor que adelanta) y carretera (geometría de la vía o condiciones del tráfico). Además, entre los factores externos, se consideró el efecto de las condiciones de iluminación (diurna o nocturna).

El análisis estadístico y la propuesta de modelos de adelantamiento que se presenta en esta sección se basaron tanto en los datos de la metodología dinámica (para la descripción detallada de las decisiones de adelantamiento y de evolución de velocidades durante la maniobra), como en los de metodología estática y de la medición de velocidades puntuales. Los parámetros básicos del análisis, así como la comprobación de los ajustes de normalidad o lognormalidad se encuentran en el Anexo VI.

9.2.1. Fase de seguimiento

9.2.1.1. Variables fundamentales

Durante la fase de seguimiento se distinguen las etapas de deseo de adelantar y de decisión de adelantar. Tal como se ha explicado previamente, el deseo de adelantar corresponde con la intención del conductor perseguidor de rebasar al vehículo líder. En caso de ser el deseo positivo, el conductor perseguidor evalúa la siguiente etapa, de decisión. A partir de este momento, el conductor decide si acepta o rechaza cada uno de los huecos u oportunidades de adelantar que va encontrando durante el seguimiento.

El deseo y decisión de adelantar son variables o procesos no observables con ninguna metodología naturalística (o semi-naturalística), como la aplicada en este trabajo. Sin embargo, la observación de aceptación o rechazo de huecos sí que es directamente observable. Esta variable ha sido empleada para la modelización conjunta de los procesos de deseo y decisión de adelantar.

9.2.1.1.1. Hueco

El proceso de decisión de adelantar (condicionado a que el deseo de adelantar sea positivo) se hace observable por la aceptación o el rechazo de huecos. Tal como se desarrolló en el apartado de reducción de datos, existen diversas definiciones de hueco. En este análisis se van a emplear, de forma comparativa, los huecos en unidades de tiempo (*Gap_t*, o huecos rechazados equivalentes, medidos desde el punto de vista del conductor perseguidor y adelantante) y en unidades de distancia (*dGap*).

La Figura 9-3 recoge las distribuciones de frecuencia de la muestra de huecos caracterizada en la metodología dinámica, distinguiendo las mismas en función del tipo de vehículo adelantado y en función de la aceptación del hueco.

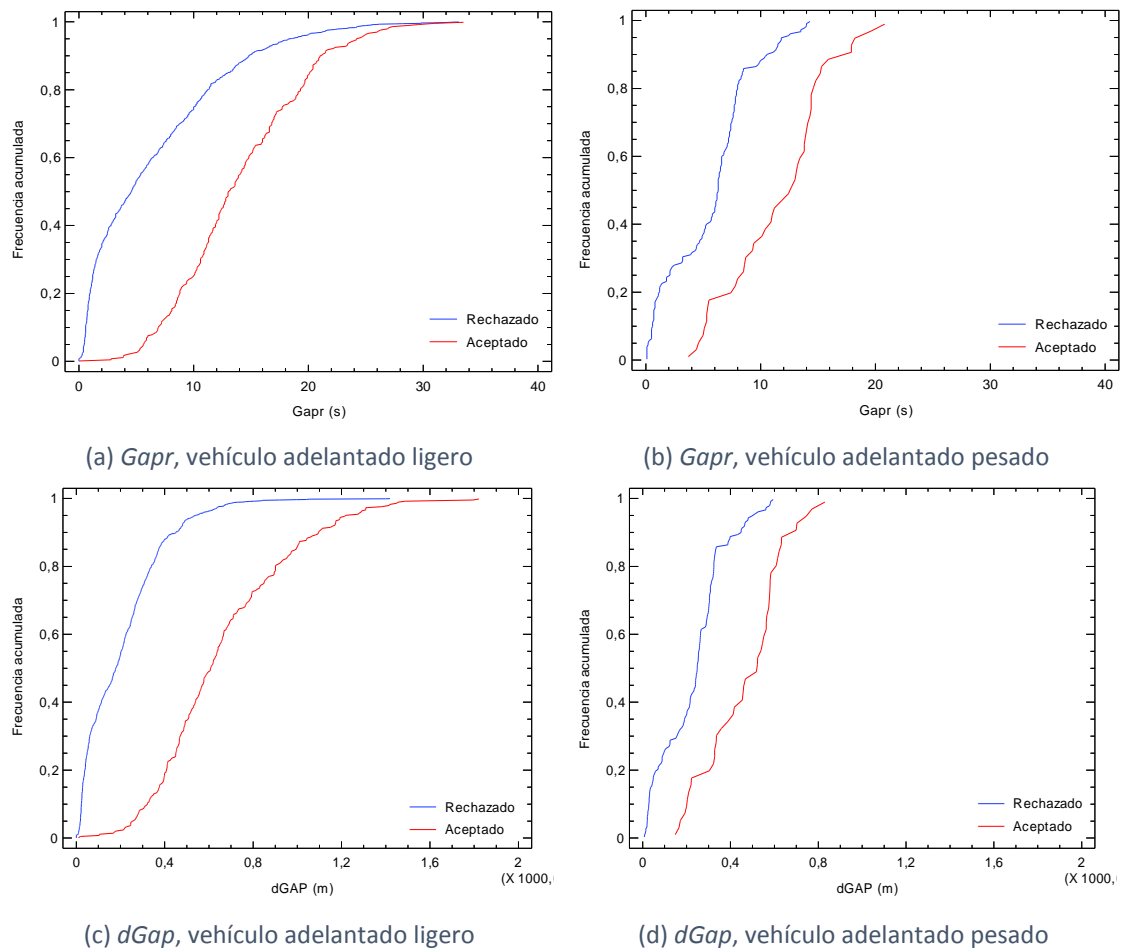


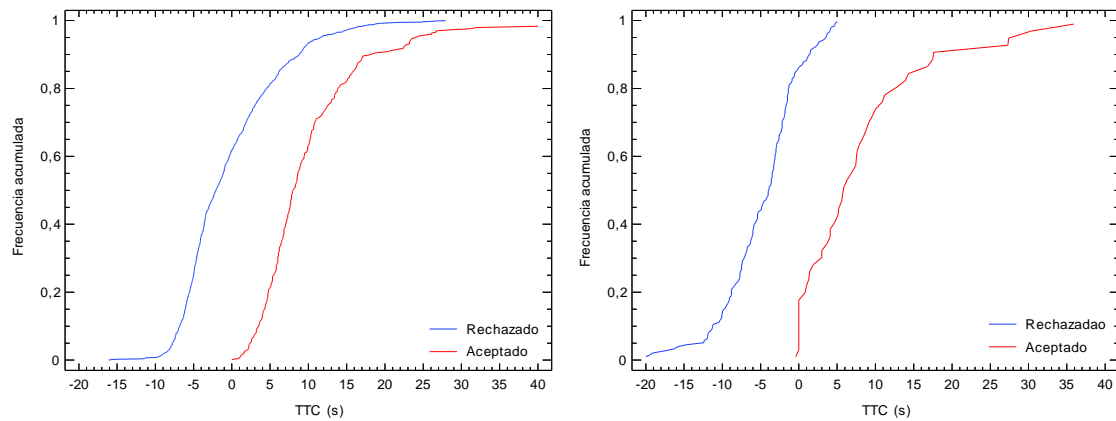
Figura 9-3. Distribuciones de frecuencia acumulada de huecos

Tal como se observa, los huecos aceptados son claramente superiores a los rechazados, mostrando un comportamiento razonable por parte de los conductores. Sin embargo, existe un rango de huecos, ya sea en unidades de tiempo o de distancia, en el que unos conductores (en determinadas circunstancias) aceptan, y otros (en otras circunstancias) rechazan. Por este motivo, el análisis mostrado a continuación pretende indentificar los factores que contribuyen a la aceptación o al rechazo de huecos.

9.2.1.1.2. Hueco residual

De forma análoga, también se ha caracterizado el hueco residual, o *TTC*. La Figura 9-4 muestra las distribuciones de frecuencia acumulada, en función de la aceptación del hueco y del tipo de vehículo adelantado.

Tal como puede apreciarse, los huecos aceptados concluyen con un hueco residual mucho más elevado. De hecho, en gran parte de los huecos rechazados, el hueco residual es negativo, lo que indica que no existía espacio (o tiempo) suficiente para completar la maniobra. Sin embargo, existe un rango de valores de *TTC* presentes tanto en los huecos aceptados como en los rechazados.



(a) Vehículo adelantado ligero

(b) Vehículo adelantado pesado

Figura 9-4. Distribuciones de frecuencia acumulada de huecos residuales

9.2.1.2. Factores

A continuación se enumeran los distintos factores cuyo efecto se estudiará en el siguiente apartado, por medio de la modelización del proceso de decisión de adelantar. Al tratarse la variable fundamental del hueco crítico (o del hueco residual crítico), no es posible estudiar la influencia de los distintos factores por medio del análisis de la varianza o de modelos de regresión convencionales, puesto que la variable dependiente no puede medirse.

Los distintos factores se agrupan en función de si pertenecen al conductor (Tabla 9-3 y Tabla 9-4), al vehículo (Tabla 9-5) o a la carretera (Tabla 9-6).

Factor	Código	Nivel	Recuento
Sexo	Sexo	Hombre	1063
		Mujer	422
Aceptación	Aceptación	Aceptados	361
		Rechazados	1371

Tabla 9-3. Factores de aceptación de huecos relativos al conductor (cualitativos)

Factor	Código	Estadístico	Valor
Edad (Años)	Edad	Mínimo	20.0
		Media	42.5
		Máximo	70.0
		SD	12.6
Tiempo en cola (s)	Tcola	Mínimo	0.0
		Media	61.0
		Máximo	310.5
		SD	62.4

Tabla 9-4. Factores de aceptación de huecos relativos al conductor (cuantitativos)

Factor	Código	Nivel	Recuento
Tipo de vehículo adelantado	Tipoi	Ligero	1518
		Pesado	214
Ocupantes	Ocupantes	1	1060
		2	342
		3	53

Tabla 9-5. Factores de aceptación de huecos relativos al vehículo

Factor	Código	Nivel	Recuento
Velocidad de diseño (km/h)	<i>Vd</i>	70	896
		80	286
		90	129
		100	341
		120	80
Visibilidad opuesto	<i>Opuesto</i>	Con Opuesto	1098
		Sin opuesto	634
Sección transversal	<i>Sección</i>	Con arcén	1451
		Sin arcén	281

Tabla 9-6. Factores de aceptación de huecos relativos a la carretera

Tal como se observa en la caracterización de los factores, la muestra obtenida comprende un rango amplio de decisiones de adelantamiento. El total de observaciones asciende a 1732, de las que 361 fueron aceptadas. Al considerar las distintas variables caracterizadas, este número total decrece, puesto que no fue posible la medición de las mismas en todos los casos. En cuanto a las características de conductor, se han abarcado edades comprendidas entre los 20 y los 70 años y demoras (medidas como tiempo en cola) de entre cero (maniobras lanzadas) hasta 310 s. En cuanto a las variables derivadas del vehículo, destaca el tipo de vehículo adelantado (ligero en el 88% de los casos) la presencia de un vehículo opuesto (en un 37% de los casos), o el número de ocupantes, igual a 1 en la mayoría de ocasiones. En cuanto a la carretera, se han abarcado distintas velocidades de diseño, entre 70 y 120 km/h.

En la fase de decisión, debido al tamaño y naturaleza de las observaciones, no fue posible analizar el efecto de las condiciones de iluminación diurna y nocturna, así como el de la anchura y existencia de arcenes, algo que si se llevará a cabo en el estudio de la fase de adelantamiento.

9.2.1.3. Modelos de elección binaria

El proceso de decisión de aceptación o rechazo de huecos puede modelarse como una elección binaria. Habitualmente, los modelos de elección binaria, como el modelo logit o el modelo probit, se definen a partir de una función de utilidad Y^* .

Para un individuo i , el valor de la función de utilidad en la decisión j (Y_{ij}) no es observable. Sin embargo, se podría expresar por medio de la Ecuación 9-1.

$$Y_{ij}^* = \beta \cdot X_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad \text{Ecuación 9-1}$$

Donde, en este caso, i representa a un conductor y j a un hueco. El término $\beta \cdot X_{ij}$ es una función lineal de las variables independientes o factores que determinan el proceso de decisión. El término ε_{ij} es el error.

La decisión de la aceptación o rechazo de un hueco sí que es una función observable Y_{ij} , tal como se recoge en la Ecuación 9-2.

$$Y_{ij} = \begin{cases} Y_{ij} = 1: \text{accept if } Y_{ij}^* > 0 \\ Y_{ij} = 0: \text{reject if } Y_{ij}^* < 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 9-2}$$

Dependiendo de la función de distribución que se asigne al error, el modelo puede ser probit (el error se distribuye según una normal estándar) o logit (el error se distribuye según una función logística). Estos modelos se han empleado con anterioridad en numerosos estudios de aceptación de huecos (Farah et al. 2010, Devarasetty et al. 2012, Kaysi and Abbany 2007).

La calibración de los modelos de decisión consiste en la estimación de los parámetros β de la Ecuación 9-1. Para este análisis se asumió, en general, un modelo probit, pues al término de error se le asignó una distribución normal estándar. Con este supuesto, la probabilidad de aceptar un hueco es la derivada de la Ecuación 9-3, donde Φ es la distribución normal estándar, de media igual a 0 y desviación estándar igual a 1.

$$P(Y_{ij} = 1) = P(Y_{ij}^* > 0) = \Phi(\beta \cdot X_{ij}) \quad \text{Ecuación 9-3}$$

No obstante, en dos de los modelos de mayor significancia estadística se aplicó, a modo comparativo, un modelo logit. Las diferencias entre ambos tipos de modelo fueron prácticamente despreciables.

La estimación de los parámetros del modelo se realizó por medio del método de máxima verosimilitud, implementado en el software estadístico R. Para este procedimiento, se asume que se dispone de una muestra de n observaciones aleatorias del fenómeno $\{y_i\}_{i=1}^n$. La estimación por máxima verosimilitud de los parámetros β es aquella que tiene la mayor probabilidad de dar como resultado la muestra observada, en función de las variables explicativas x .

Asumiendo que la probabilidad de observar $y_i = 1$ es p y la de observar $y_i = 0$ es $1-p$, la probabilidad de observar la muestra completa $\{y_i\}_{i=1}^n$ se define por la función definida en la Ecuación 9-4, correspondiente al producto de probabilidades.

$$L(y|x_i, \beta) = \prod_{i \in l} p \prod_{i \in m} 1 - p = \prod_{i \in l} \Phi(x_i \beta) \prod_{i \in m} 1 - \Phi(x_i \beta) \quad \text{Ecuación 9-4}$$

Donde l corresponde a las observaciones con $y_i = 1$ y m a las observaciones con $y_i = 0$.

La Ecuación 9-4 puede sustituirse por la Ecuación 9-5, ya que cuando $y = 1$, se obtiene el primero de los términos, y cuando $y = 0$, se obtiene el segundo.

$$L(y|x_i, \beta) = \prod_{i=1}^n \Phi(x_i \beta)^{y_i} [1 - \Phi(x_i \beta)]^{1-y_i} \quad \text{Ecuación 9-5}$$

El cálculo de la máxima probabilidad se realiza sobre el logaritmo de la función expresada en la Ecuación 9-5, que da como resultado la Ecuación 9-6.

$$LL(y|x_i, \beta) = \sum_{i=1}^n \{y_i \ln \Phi(x_i \beta) + (1 - y_i) \ln [1 - \Phi(x_i \beta)]\} \quad \text{Ecuación 9-6}$$

Los valores de β que maximizan la Ecuación 9-6 se corresponden con la estimación por máxima verosimilitud del modelo.

La Tabla 9-7 resume los distintos modelos formulados.

Modelo	Tipo	Variable dependiente	Factores	Sub-muestra
1	probit	Aceptación	<i>dGap, Opuesto</i>	Ligeros (<i>Tipoi</i> = 0)
2			<i>Gapr, Opuesto</i>	
3			<i>dGap, Opuesto, Sexo</i>	
4			<i>Gapr, Opuesto, Tcola, Sexo, Vd</i>	
5			<i>dGap, Opuesto, Tipoi</i>	Carretera = CV-50
6			<i>TTC, Opuesto</i>	Ligeros (<i>Tipoi</i> = 0)
7			<i>TTC, Opuesto, Tcola, Sexo, Vd</i>	
8			<i>dGap, Opuesto, Sección</i>	Vd = 70 km/h
1-logit	logit		<i>dGap, Opuesto</i>	Ligeros (<i>Tipoi</i> = 0)
3-logit	logit		<i>dGap, Opuesto, Sexo</i>	Ligeros (<i>Tipoi</i> = 0)

Tabla 9-7. Modelos de decisión de adelantamiento planteados

En la Tabla 9-7, los modelos 1 y 2 incorporaron únicamente la variable hueco (ya sea *Gapr* o *dGap*) y la variable binaria de presencia de un vehículo opuesto, siendo ambas variables estadísticamente significativas para un 95% de confianza. Para ello, se empleó el test de la razón de verosimilitudes. Este test compara el cociente entre el logaritmo de la máxima probabilidad de un modelo con las variables explicativas y uno sólo con una constante, con una distribución Chi-cuadrado con tantos grados de libertad como variables explicativas.

En el modelo 1 se empleó el hueco en unidades de distancia y en el modelo 2, en unidades de tiempo, tal como se desarrolló en el apartado de reducción de datos. En los modelos 3 y 4 se incorporaron todos los factores explicativos, si bien únicamente se han mantenido aquellos cuyo efecto era estadísticamente significativo (al 95% de confianza).

Los modelos 1 a 4 se aplicaron únicamente a las maniobras de seguimiento y adelantamiento a vehículos ligeros. Por el contrario, el modelo 5 se aplicó a ambos tipos de vehículo líder, pero únicamente en la sub-muestra de maniobras que tuvieron lugar en el tramo T3 (Carretera CV-50 entre los PK 76+000 y 86+000). De este modo, se aisló cualquier efecto derivado de la geometría de la carretera.

Los modelos 6 y 7 se aplicaron a la muestra de vehículos líder ligeros, y emplearon el concepto de hueco residual (*TTC*), en lugar del hueco propiamente dicho. El modelo 6 únicamente añadió la variable de visibilidad del vehículo opuesto, mientras que el modelo 7 añadió todas las variables cuyo efecto fue estadísticamente significativo al 95% de confianza.

El modelo 8 se formuló únicamente para estudiar el efecto de la sección transversal (existencia o no de arcenes). Por último, los modelos 1 y 3 se compararon con sus correspondientes modelos logit, en lugar de probit.

La Tabla 9-8 resume los distintos parámetros de bondad del ajuste de los modelos planteados, una vez estimados por medio del procedimiento de máxima verosimilitud implementado en el software R. Por su parte, la Tabla 9-9 recoge los valores de los coeficientes de cada variable en cada modelo, incluyendo su error estándar y la significancia estadística. En esta tabla, es posible interpretar el signo y la magnitud del efecto de cada uno de los factores.

Modelo	Null.dev.	Res.dev.	null DF	Factores	AIC	Perc-dev
1	1544,9	897,8	1517	2	903,8	42%
2	1544,9	1200,4	1517	2	1206,4	22%
3	1494,5	844,4	1484	3	852,4	43%
4	1494,5	1104,0	1484	5	1116,0	26%
5	338,4	177,1	284	3	185,1	48%
6	1522,2	1042,9	1503	2	1048,9	31%
7	1475,3	950,7	1472	5	962,7	36%
8	724,1	477,7	895	3	485,7	34%
1-logit	1544,9	881,6	1517	2	887,6	43%
3-logit	1494,5	831,9	1484	3	839,9	44%

Donde:

Null dev.: Desviación de un modelo que solo tiene un término constante.

Res. dev.: Desviación que queda una vez ajustado el modelo.

null D.F.: grados de libertad del modelo que solo tiene un término constante (igual a $n - 1$, siendo n el número de observaciones).

Factores: número de variables explicativas del modelo.

AIC (Akaike Information Criteria): medida de la calidad relativa del ajuste, igual a 2 veces el número de parámetros menos dos veces el logaritmo del máximo valor de la función de probabilidad del modelo estimado.

Perc. dev.: Porcentaje de desviación explicada, es el cociente entre la desviación explicada por el modelo (Null dev. – Res.dev.) y la desviación del modelo que solo tiene un término constante (Null.dev.).

Tabla 9-8. Bondad del ajuste de los modelos de decisión binaria

	Coeficiente (SD)							
	Constante	Hueco	Opuesto	Tcola	Sexo	Vd	Tipoi	Sección
1	-1,442***	0,002·dGap ***	-0,918***					
2	-0,436***	0,025·Gapr***	-1,185***					
3	-1,436***	0,003·dGap***	-0,894***		-0,374***			
4	-1,460***	0,032·Gapr***	-1,118***	-0,002**	-0,243*	0,013***		
5	-1,429**	0,005·dGap***	-1,313***				-0,708*	
6	-0,854***	0,091·TTC***	-0,642***					
7	-2,112***	0,096·TTC***	-0,604***	-0,003**	-0,170*	0,017***		
8	-1,641***	0,003·dGap***	-0,603***					
1-logit	-2,820***	0,006·dGap***	-1,654***					0,392
3-logit	-2,770***	0,006·dGap***	-1,624***		-0,727***			

Niveles de significancia: *** 0,000; ** 0.01; * 0,05

Tabla 9-9. Coeficientes de los modelos de aceptación de huecos

Tal como se aprecia en la Tabla 9-8, los modelos basados en huecos en unidades de distancia (*dGap*), es decir, los modelos 1, 3 y 5 presentaron el mayor valor del porcentaje de desviación explicada y el menor índice AIC (son directamente comparables los modelos 1 y 2 y los modelos 3 y 4). En el caso del modelo 3, se alcanzó el mejor ajuste de los modelos aplicados a la submuestra de vehículos líder ligeros, siendo el modelo capaz de explicar el 43% de la variabilidad hallada en las decisiones de aceptación de huecos.

Paralelamente, se analizó la capacidad de predicción de todos los modelos estimados sobre la muestra empleada para su calibración, y del modelo 1 en una muestra distinta, para poder validar el modelo de decisión binaria. En el caso de la muestra empleada para la calibración de los modelos 1, 2, 3, 4, 6 y 7, este análisis permitió estudiar la influencia de la elección de la probabilidad de corte, es decir, de la probabilidad a partir de la cual un hueco debe ser aceptado. Los

resultados de este análisis se muestran en la Figura 9-5. En ella se observa que los modelos 1 y 3 alcanzaron, para una probabilidad de corte igual a 0,4, una fiabilidad de prácticamente el 90%. Es decir, la predicción del modelo (aceptar o rechazar un hueco) acertó en 9 de cada 10 casos.

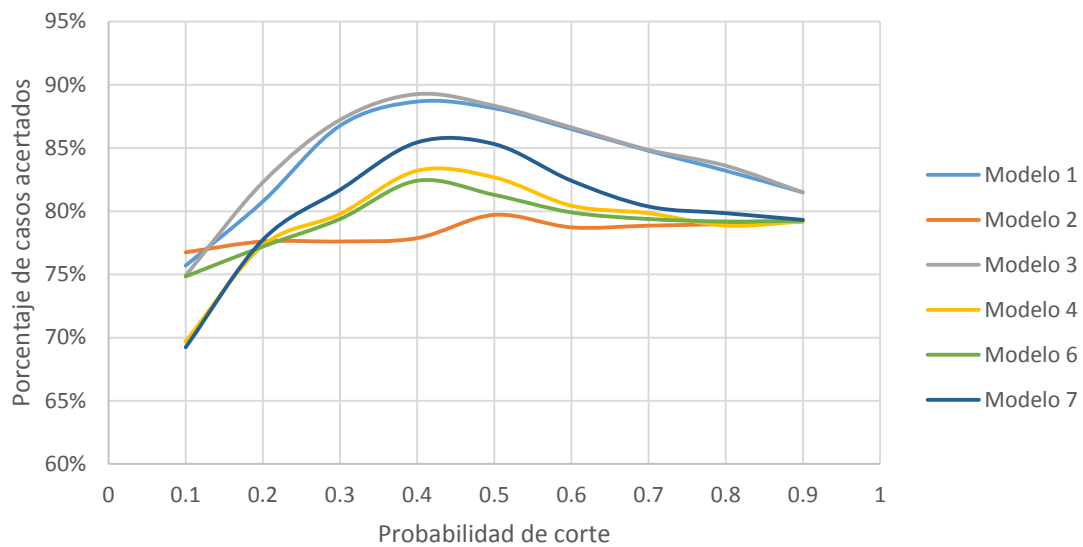


Figura 9-5. Capacidad de predicción de los modelos en función de la probabilidad de corte

Una vez calibrados los modelos, se ha analizado el efecto de cada uno de los factores en la probabilidad de aceptación de huecos, empleando los modelos cuyo ajuste fue mejor.

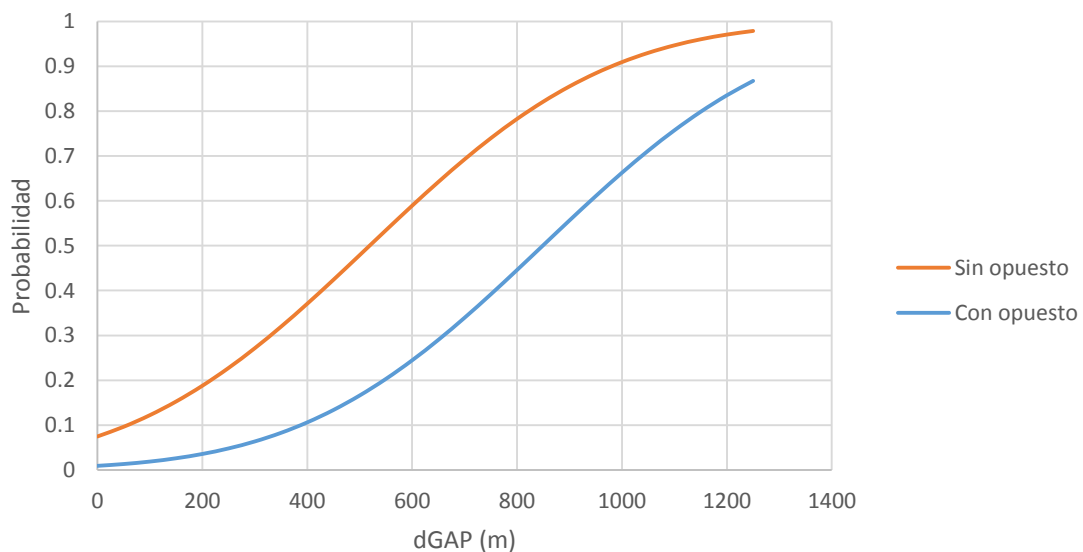


Figura 9-6. Efecto del tamaño de hueco (dGAP) y de la visibilidad del vehículo opuesto en la aceptación (modelo 1)

De la Figura 9-6 se puede concluir, como es lógico, que la probabilidad de aceptar un hueco aumenta con el tamaño del mismo. Sin embargo, otra importante conclusión es el efecto que la visibilidad de un vehículo opuesto tiene en las decisiones del conductor que desea adelantar. La presencia de un vehículo en sentido opuesto visible hace que la probabilidad de aceptar un hueco se reduzca de forma significativa (aproximadamente a la mitad en el rango de huecos comprendido entre 500 y 800 m). Por otra parte, la existencia de huecos muy grandes que han sido rechazados, hace que la desviación no explicada por el modelo sea aún muy elevada. Estos

casos, que corresponderían, muy probablemente, a conductores que no deseaban adelantar, hacen que las gráficas de probabilidad de aceptación de huecos queden muy tendidas.

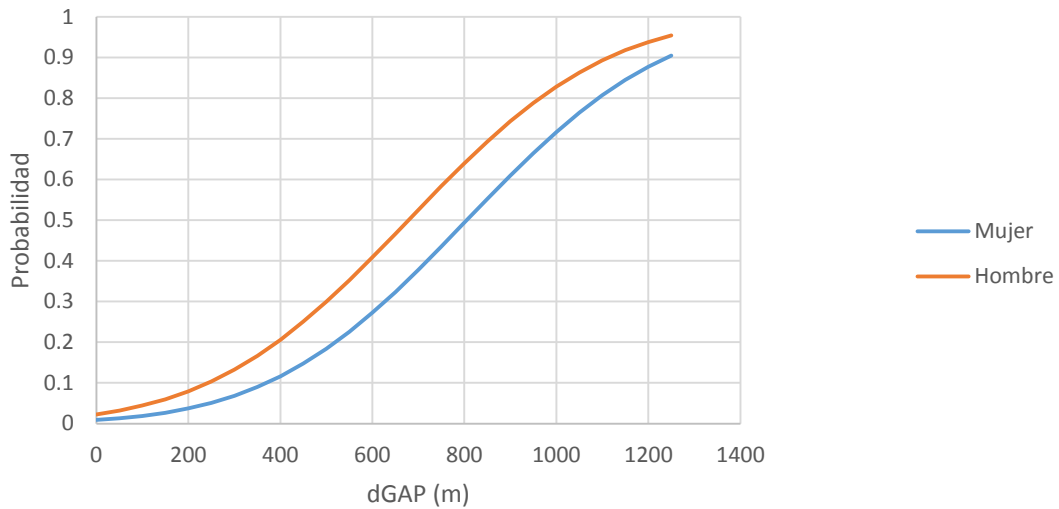


Figura 9-7. Efecto del tamaño del hueco (dGAP) y del sexo del conductor adelantante (Modelo 3, Opuesto = 0.63) en la aceptación de huecos

El efecto del sexo del conductor adelantante fue significativo en todos los casos en los que se ha incluido (modelos 3, 4, y 7). En general, la probabilidad de aceptar un hueco es ligeramente mayor en el caso de los hombres, tal como se observa en la Figura 9-7.

Otros factores cuya influencia fue muy reducida (y no se halló de forma repetida en los diversos modelos) fueron la demora y la velocidad de diseño. En este caso, un aumento en la demora se asocia a menores probabilidades de aceptar un hueco, y una velocidad de diseño alta provoca un ligero aumento en la citada probabilidad.

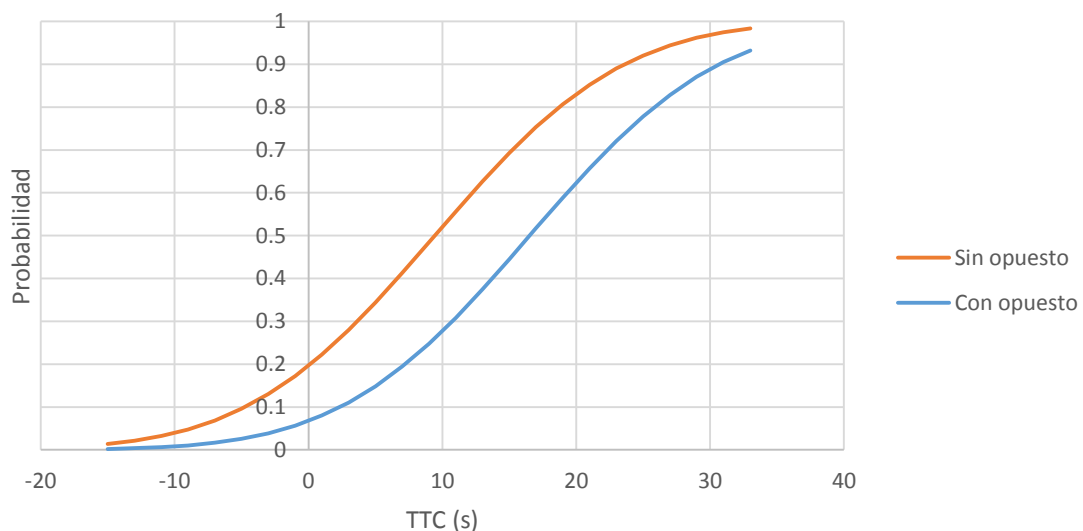


Figura 9-8. Efecto del tamaño de hueco residual (TTC) y la visibilidad de vehículos opuestos en la aceptación de huecos

Del mismo modo, la Figura 9-8 muestra el efecto del tamaño del hueco residual (TTC) y la visibilidad del vehículo opuesto, en la probabilidad de aceptar un hueco. La importancia de esta gráfica radica en la obtención de una distribución de huecos residuales críticos, que fue de gran

utilidad para la modelización de la distancia de visibilidad de adelantamiento, tal como se verá más adelante.

En cuanto al efecto del tipo de vehículo adelantado (Modelo 5) se detectó que, en las mismas condiciones, la probabilidad de adelantar a un pesado es inferior a la de un ligero. En cuanto a la sección transversal (Modelo 8) no se detectaron efectos estadísticamente significativos, si bien en este caso no se trata de la misma carretera con ambos tipos de sección, sino de dos carreteras con velocidades de diseño comparables, por lo que podría haber otros factores intervinientes en el análisis.

Con carácter adicional, el modelo 1 fue validado empleando una muestra de huecos distinta a la empleada para su calibración. Esta muestra de huecos se observó por medio de la metodología estática en la localización E8. En ella, se midieron 34 huecos, tal como se explica en el apartado de reducción de datos (20 de ellos aceptados, 21 de ellos con vehículos opuestos visibles). La aplicación del modelo obtuvo como resultado un porcentaje de casos correctamente predichos igual al 91%, es decir, superior al obtenido en la muestra de calibración. Este resultado valida la obtención del modelo de aceptación de huecos. No se aplicó esta calibración en otros modelos ya que algunas variables, como la demora o el sexo del conductor adelantante, no se pudieron medir empleando la metodología estática.

9.2.2. Fase de adelantamiento

Este apartado se centró en la ejecución de la maniobra, es decir, en lo que sucede una vez aceptado un hueco. En este momento, se inicia una maniobra de adelantamiento, formada por el cambio de carril, el rebase del vehículo lento y la vuelta al carril propio.

9.2.2.1. Variables fundamentales

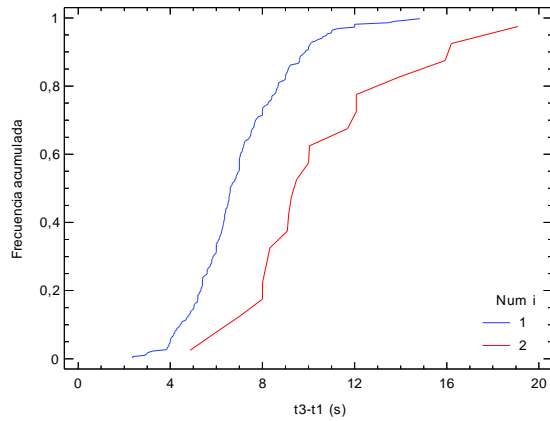
A continuación se describen las variables más significativas de las maniobras de adelantamiento, y cuya obtención se explicó en los apartados de diseño experimental y de reducción de datos. Estas variables son el tiempo de ocupación del carril izquierdo, la velocidad media durante el citado tiempo, las distancias de seguridad entre el vehículo adelantado y el adelantante y las velocidades instantáneas, tanto al inicio como al final de la maniobra.

Entre los objetivos de este estudio se encontraba la evaluación de criterios de distancia de visibilidad de adelantamiento. Estos criterios se basan en la distancia de visibilidad mínima necesaria, no siendo posible observar estos valores en los datos experimentales, ya que se trata de valores críticos. La estimación de la distancia de visibilidad de adelantamiento se realizó a partir de modelos, desarrollados en los apartados siguientes.

9.2.2.1.1. Tiempo de ocupación del carril izquierdo (t_3-t_1)

Esta variable es una de las de mayor importancia, puesto que describe la duración de la invasión del carril destinado al tráfico, que es la duración del potencial conflicto que supone un adelantamiento.

En la Figura 9-9 se muestran las distribuciones de frecuencia del valor de esta variable, para cada una de las sub-muestras indicadas.



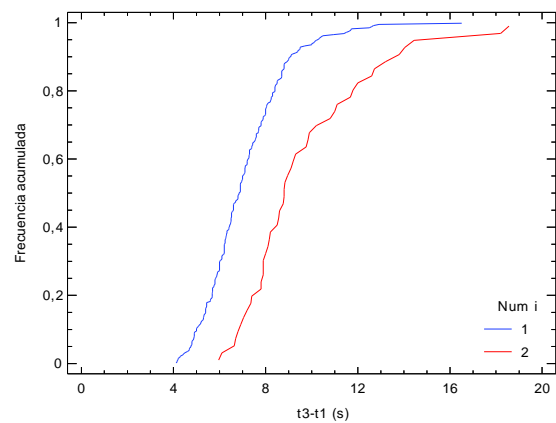
(a) Metodología estática

Tipoi = 0 (ligero)

Tipop = 0 (ligero)

$Ni = 1, n = 243, m = 7,0 \text{ s}, SD = 2,1 \text{ s}$

$Ni = 2, n = 20, m = 10,4 \text{ s}, SD = 3,6 \text{ s}$



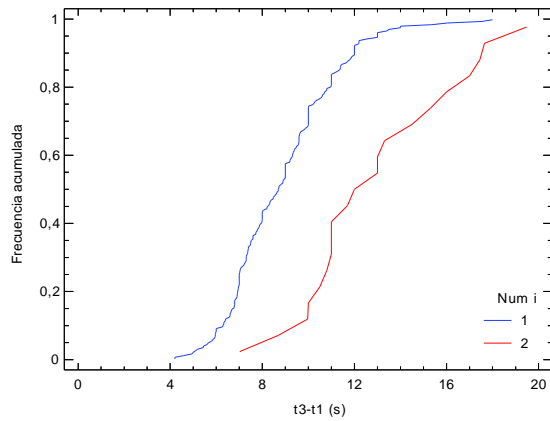
(b) Metodología dinámica

Tipoi = 0 (ligero)

Tipop = 0 (ligero)

$Ni = 1, n = 299, m = 7,1 \text{ s}, SD = 1,8$

$Ni = 2, n = 48, m = 9,8 \text{ s}, SD = 2,8$



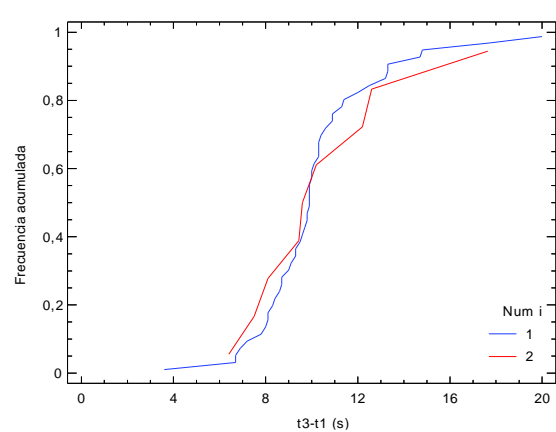
(c) Metodología estática

Tipoi = 1 (pesado)

Tipop = 0 (ligero)

$Ni = 1, n = 213, m = 8,9 \text{ s}, SD = 2,4 \text{ s}$

$Ni = 2, n = 21, m = 12,8 \text{ s}, SD = 3,3 \text{ s}$



(d) Metodología dinámica

Tipoi = 1 (pesado)

Tipop = 0 (ligero)

$Ni = 1, n = 48, m = 10,1 \text{ s}, SD = 2,8 \text{ s}$

$Ni = 2, n = 9, m = 10,4 \text{ s}, SD = 3,4 \text{ s}$

Figura 9-9. Distribuciones de frecuencia de los tiempos $t3-t1$ en distintas sub-muestras

De las distribuciones de frecuencia se apreció que el tiempo requerido para adelantar a más de un vehículo es más elevado; lo mismo sucede al adelantar a un vehículo pesado, comparado con un vehículo ligero. La influencia de la metodología se verificó comparando las distribuciones de sub-muestras equivalentes, cada una de las cuales se observó con una metodología diferente. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en los tiempos de ocupación del carril izquierdo ($t3-t1$), en adelantamientos simples realizados por ligeros a ligeros, tras la realización del test ANOVA (p-valor igual a 0,6351). Sin embargo, en el caso de vehículos ligeros adelantando a pesados, sí se detectaron diferencias estadísticamente significativas al 95% de confianza (p-valor igual a 0,0010 en el test ANOVA). Las maniobras observadas por el camión instrumentalizado fueron, de media, 1,3 s más largas. Estas diferencias deben tenerse en cuenta de cara a la utilización de los datos del camión instrumentalizado, y pueden deberse a que el vehículo empleado era de 16,5 m de longitud, mientras que en la muestra obtenida mediante la metodología estática hay una variabilidad amplia de longitudes de vehículos pesados, acotada superiormente por 16,5 m.

Paralelamente, en el caso de las maniobras simples, y tanto en las sub-muestras formadas por vehículos adelantados ligeros y pesados, se verificó la normalidad (y log-normalidad) de las variables. La conclusión de este análisis fue que el tiempo $t3-t1$ se ajusta con una distribución asimétrica log-normal, en ambos casos, tal como se verifica mediante el test Kolmogorov-Smirnov (K-S), con un 95% de confianza estadística. (p-valor de 0.4728 y 0.6214 en el caso de adelantados ligeros y pesados, respectivamente). Las medias, en escala natural, fueron de 7,0 y de 9,1 s, en el caso de vehículos ligeros y pesados, y las desviaciones estándar de 1,9 y 2,4 s, respectivamente. Empleando el mismo test no puede afirmarse que las variables sean simétricas y se distribuyan de forma normal.

9.2.2.1.2. Otras variables en unidades de tiempo

Además del tiempo de ocupación del carril izquierdo, se han medido otras variables significativas. Entre ellas destaca el tiempo $t1-t0$ (tiempo desde el inicio del hueco hasta el inicio de la maniobra, correspondiente a la fase de percepción y decisión), el tiempo $t2-t1$ (tiempo desde el inicio de la maniobra hasta la posición en paralelo del vehículo adelantado y adelantante). Ambas distribuciones de frecuencia se recogen en la Figura 9-10.

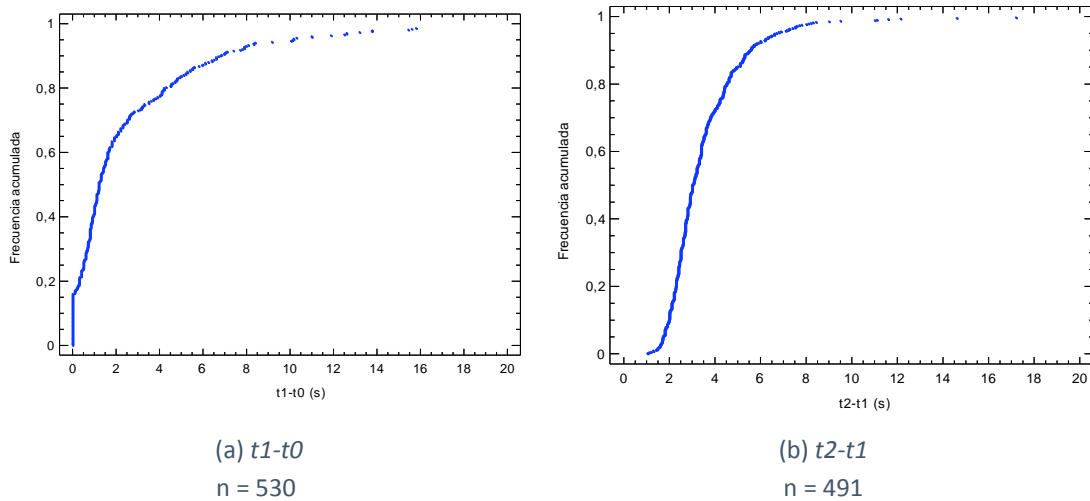
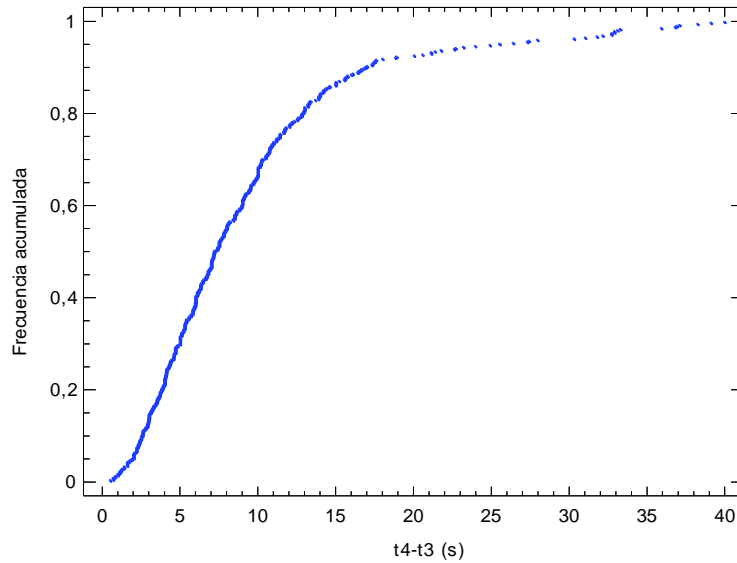


Figura 9-10. Distribuciones de frecuencia de los tiempos $t1-t0$ y $t2-t1$

Por último, destaca también el tiempo existente entre el instante de finalización de la maniobra y el instante de cruce con un vehículo que se acerca en sentido opuesto. En la Figura 9-11 se muestra la distribución de frecuencias acumuladas de esta variable. En este caso, solo se ha considerado la sub-muestra formada por maniobras realizadas en presencia de un vehículo opuesto visible. De toda la distribución, el análisis se centró, en apartados posteriores, en la caracterización de la cola inferior de la misma, pues en ella se hayan los valores críticos de esta variable.

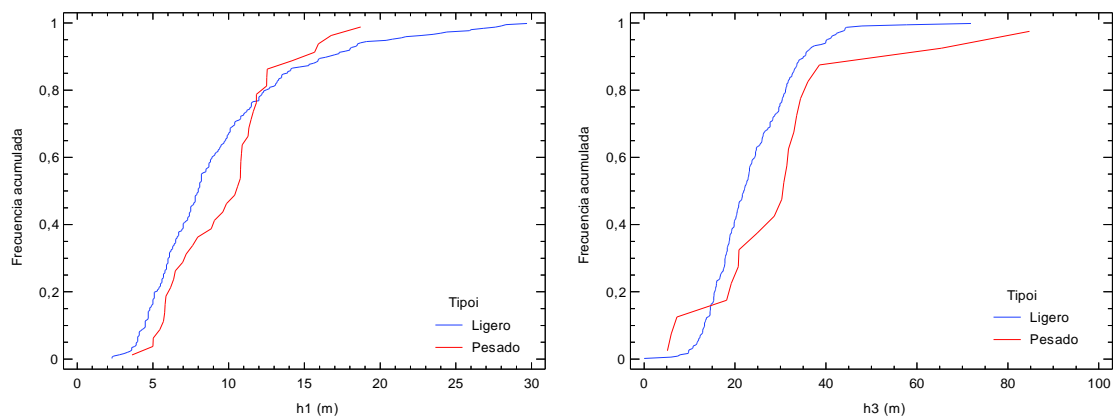


n=487

Figura 9-11. Distribución de frecuencias de t4-t3

9.2.2.1.3. Distancias de seguridad ($h1$ y $h3$)

Las distancias de seguridad entre el vehículo adelantante y el adelantado, al inicio y al final de la maniobra, se obtuvieron para la gran parte de las maniobras observadas mediante la metodología dinámica. Basándose en el procedimiento de medición de las mismas, desarrollado en el apartado de reducción de datos, únicamente se computó para las maniobras simples.



(a) $h1$

Tipoi = ligero, $n = 279$, $m = 9,4$ m, $SD = 3,5$ m
Tipoi = pesado, $n = 40$, $m = 9,8$ m, $SD = 5,2$ m
 Lognormal ligero-pesado $m = 9,4$ m y $SD = 4,92$ m

(b) $h3$

Tipoi = ligero, $n = 273$, $m = 23,4$ m, $SD = 9,2$ m
Tipoi = pesado, $n = 20$, $m = 30,0$ m, $SD = 18,6$ m
 Lognormal ligero $m = 23,6$ m y $SD = 9,4$ m
 Lognormal pesado $m = 31,6$ m y $SD = 25,5$ m

Figura 9-12. Distribuciones de frecuencia de las variables $h1$ y $h3$

En la Figura 9-12 se observan las distribuciones de frecuencia acumuladas de las variables $h1$ y $h3$. Como se observa, las distancias al finalizar la maniobra fueron mucho más elevadas que al iniciarla. Además, se realizó el test K-S para verificar la normalidad (o log-normalidad) de las variables $h1$ y $h3$, obteniendo como resultado que ambas variables se distribuyen de forma log-normal con un 95% de confianza (p-valores de 0,2065 y 0,6609). Una vez verificado que se ajustaban a distribuciones lognormal, el test ANOVA demostró la inexistencia de diferencias significativas en $h1$ entre vehículos adelantados ligeros y pesados (p-valor igual a 0,837), algo que sí

se detectó en el caso de $h3$ (p-valor igual a 0,008), siendo de media el hueco $h3$ 7 m más elevado tras adelantar a un vehículo pesado.

9.2.2.1.4. Velocidades

Dentro de las magnitudes en unidades de velocidad, se analizaron las siguientes variables: velocidad media del vehículo adelantado, velocidad media del vehículo adelantante y velocidades instantáneas del vehículo adelantante, tanto al final como al inicio de la maniobra.

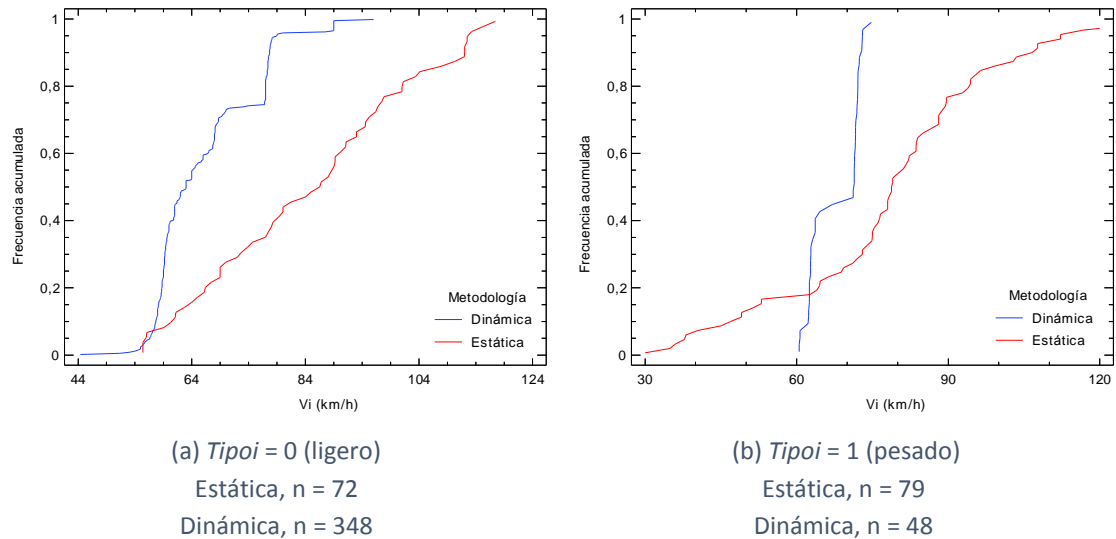
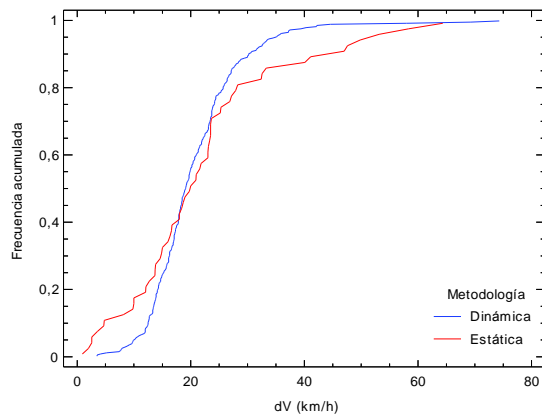


Figura 9-13. Distribuciones de frecuencia de las velocidades del vehículo adelantado, en función de la metodología empleada

La Figura 9-13 muestra las distribuciones de las velocidades del vehículo adelantado. En cada gráfica se compararon las velocidades V_i que se midieron con la metodología estática con las que se fijaron para la metodología dinámica. Tal como se aprecia, las velocidades fueron inferiores en el caso de la metodología dinámica, puesto que estas se escogieron en valores redondeados a 10 km/h de percentiles bajos de las velocidades de los vehículos adelantados que habían sido previamente observados en la metodología estática. Sin embargo, conviene destacar que en todos los casos las velocidades con la metodología dinámica se mueven dentro de valores normales para la metodología estática.

En la Figura 9-14 se observan las distribuciones de frecuencia de la velocidad relativa media del vehículo adelantante. Ambas variables se distribuyen de forma log-normal, tal como demuestran los test K-S realizados (p-valor igual a 0,907 y a 0,860, respectivamente). Igualmente, no se detectaron diferencias entre ambas metodologías para cada uno de los casos, tras la realizar el test ANOVA (p-valor de 0,278 para vehículos ligeros y de 0,567 para vehículos pesados).

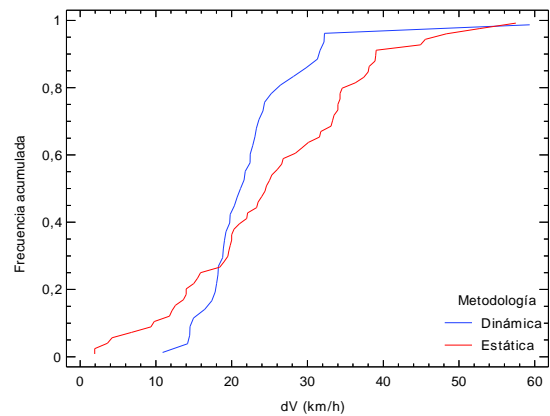


(a) *Tipo* = 0 (ligero)

Estática, n = 67

Dinámica, n = 298

Lognormal: m=21,1 km/h y SD = 11,3 km/h



(b) *Tipo* = 1 (pesado)

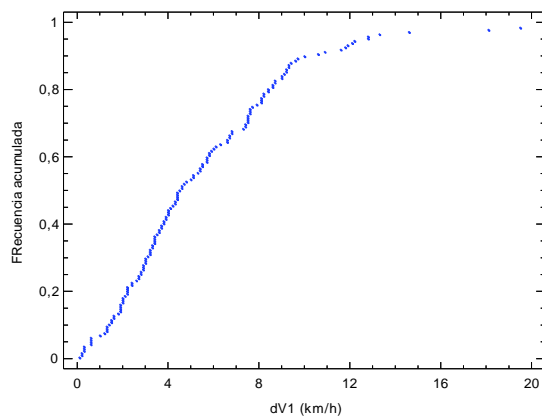
Estática, n = 76

Dinámica, n = 48

Lognormal: m=24,5 km/h y SD = 9,80 km/h

Figura 9-14. Distribuciones de frecuencia de la velocidad relativa media del vehículo adelantante

En la Figura 9-15, por último, se representan las distribuciones de velocidad relativa inicial (*dV1*) y final (*dV3*) del adelantante. En este caso, solo se disponían suficientes datos para el caso de maniobras realizadas por ligeros adelantando a ligeros. Ambas variables (*dV1* y *dV3*) se distribuyen de forma log-normal, al 95% de confianza, de acuerdo a los test K-S (p-valor de 0,1012 y 0,3952, respectivamente).

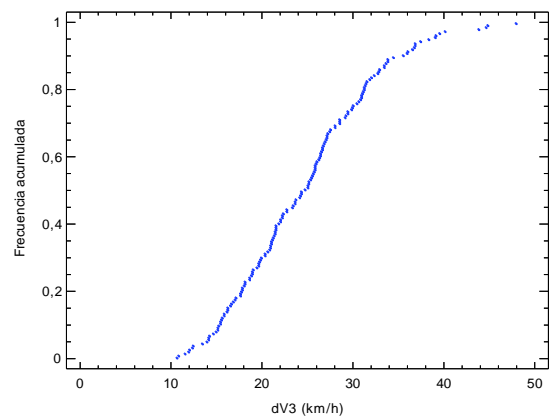


(a) metodología dinámica

Tipo = 0 (ligero)

n = 162, m = 6,1 km/h, SD = 7,0 km/h

Lognormal, m = 5,3 km/h, SD = 3.5 km/h



(b) metodología dinámica

Tipo = 0 (ligero)

n = 178, m = 24,7 km/h, SD = 8,1 km/h

Lognormal, m = 24,3 km/h, SD = 7,7 km/h

Figura 9-15. Distribuciones de frecuencia de las velocidades relativas *dV1* y *dV3*

Por último, en este apartado también se han incluido las velocidades de operación de los vehículos en zonas de adelantamiento. Tal como se ha descrito, estas velocidades fueron obtenidas mediante un dispositivo láser instalado en el centro de la zona de adelantamiento, lugar donde se habrá alcanzado la velocidad máxima.

En la Tabla 9-10 se observan las velocidades de operación (media y percentil 85), así como las velocidades de operación en flujo libre de los vehículos ligeros, en cada una de las localizaciones estudiadas.

Localización	Velocidad (km/h)			Velocidad en flujo libre (km/h) Solo vehículos ligeros		
	Recuento	Media	Percentil 85	Recuento	Media	Percentil 85
Vilamarxant (V1)	108	77	88	55	81	93
Cheste (V2)	165	80	93	102	82	98
Riba-roja (V3)	235	74	86	161	76	88
Marines (V4)	239	79	88	156	80	89
Algar (V5)	269	90	104	116	98	112
Casinos***	-	-	-	45	105	120
Carlet***	-	-	-	79	85	99
Total	1016	82	96	714	85	101

***medidas a partir de las imágenes de video

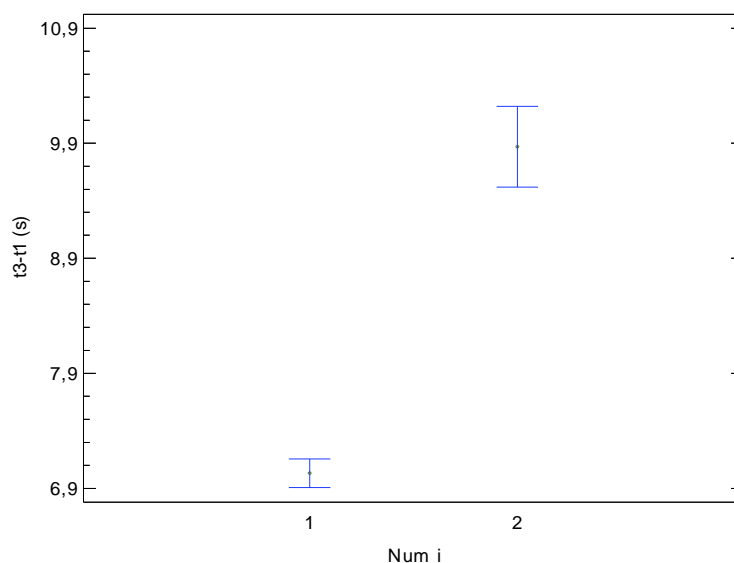
Tabla 9-10. Velocidades de operación en zonas de adelantamiento

9.2.2.2. Factores

A continuación se analiza la influencia de determinados factores en las variables descriptivas de la fase de adelantamiento. En general, la influencia de factores categóricos se realizó empleando el test ANOVA (Análisis de la varianza) y la de factores numéricos continuos mediante modelos de regresión lineal.

9.2.2.2.1. Vehículo

El tiempo necesario para adelantar aumenta significativamente (en 3 s, de media, desde 6,9 hasta 9,9 s) cuando el número de vehículos a adelantar pasa de uno a dos (Figura 9-16), tal como muestra el test ANOVA (p-valor de 0,000).

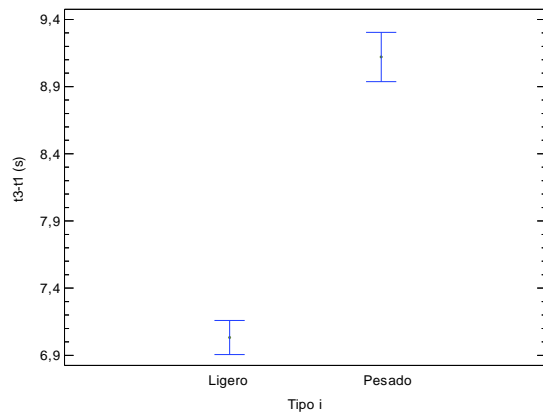


$N_i = 1, n = 542, m = 7,0 \text{ s}, SD = 1,9 \text{ s}$

$N_i = 2, n = 68, m = 9,9 \text{ s}, SD = 3,1 \text{ s}$

Figura 9-16. Efecto de N_i en t_3-t_1 (vehículo adelantado ligero)

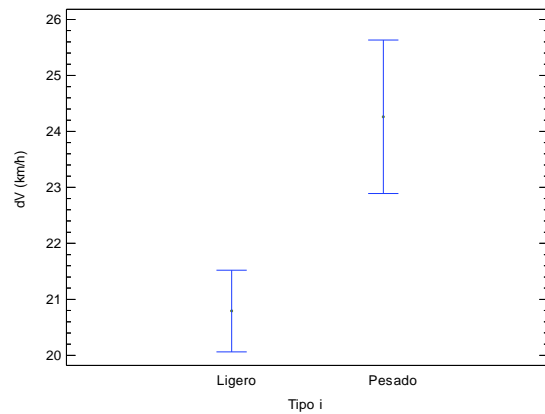
En la Figura 9-17 se comparan las principales variables que describen el adelantamiento, para los casos de vehículo adelantado ligero y pesado, respectivamente. Tanto el tiempo de ocupación del carril contrario, como la velocidad media del adelantante y la distancia de seguridad al finalizar la maniobra fueron superiores cuando el vehículo adelantado es pesado.



(a) $t3-t1$

ANOVA p-valor = 0,000

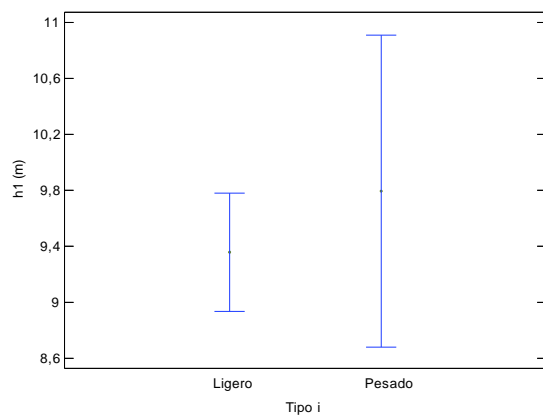
ligero: n = 542 m = 7,0 s, SD = 1,9 s
 pesado: n = 261 m = 9,1 s SD = 2,5 s



(b) dV

ANOVA p-valor = 0,001

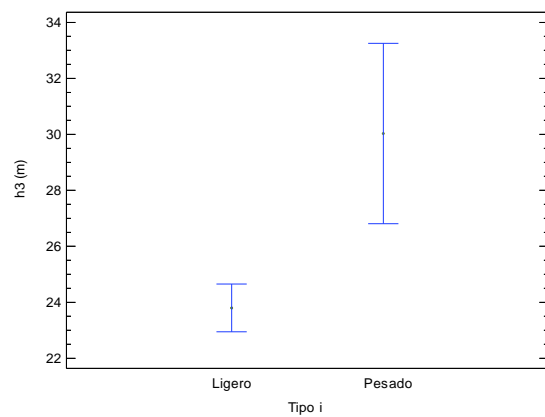
ligero: n = 352 m = 20,8 km/h, SD = 9,6 km/h
 pesado: n = 99 m = 24,3 km/h SD = 10,9 km/h



(c) $h1$

ANOVA p-valor = 0,861

ligero: n = 279 m = 9,4 m, SD = 5,3 m
 pesado: n = 40 m = 9,8 m SD = 3,6 m



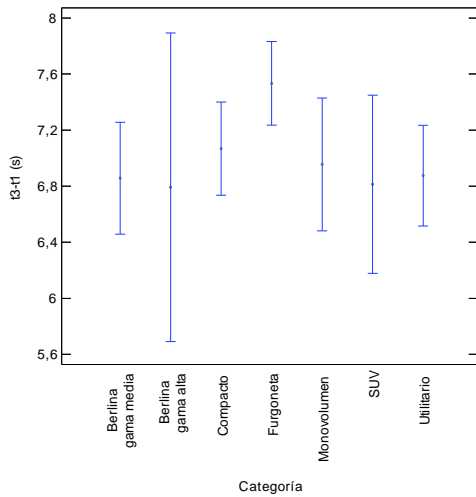
(d) $h3$

ANOVA p-valor = 0,010

ligero: n = 284 m = 23,8 m, SD = 9,5 m
 pesado: n = 20 m = 30,0 m SD = 18,6 m

Figura 9-17. Efecto del tipo de vehículo adelantado (maniobras simples)

Tal como se observa en la Figura 9-18, la categoría del vehículo adelantante no afectó de forma significativa ni al tiempo de ocupación del carril izquierdo ni a la velocidad media durante la maniobra. Tampoco se observó ningún efecto del número de pasajeros en las variables descriptivas de la maniobra.



(a) $t3-t1$

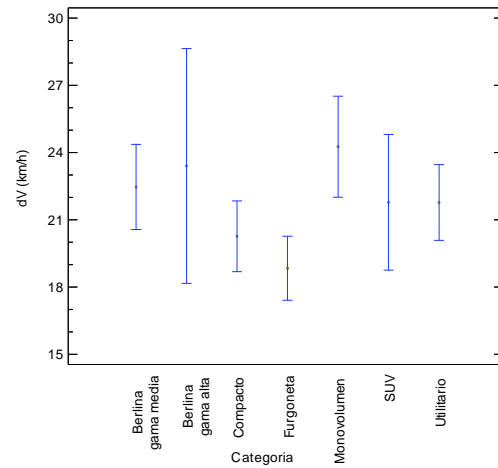
ANOVA p-valor = 0,470

Tamaños muestrales:

Berlina gama media: n = 38

Berlina gama alta: n = 5

Compacto: n = 55



(b) $Vp-Vi$

ANOVA p-valor = 0,096

Furgoneta: n = 68

Monovolumen: n = 27

SUV: n = 15

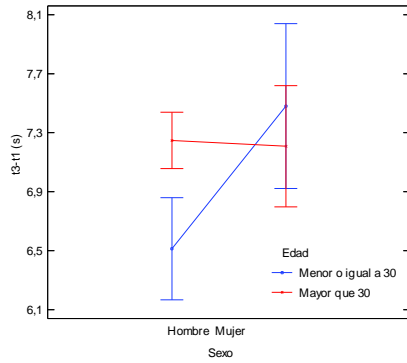
Utilitario: n = 47

Figura 9-18. Efecto de la categoría del vehículo adelantado en $t3-t1$ y en dV (maniobras simples)

9.2.2.2.2. Conductor

Este apartado analiza la influencia del conductor que adelanta (sexo, edad y su interacción) así como de la demora sufrida por el seguimiento, en la realización del adelantamiento.

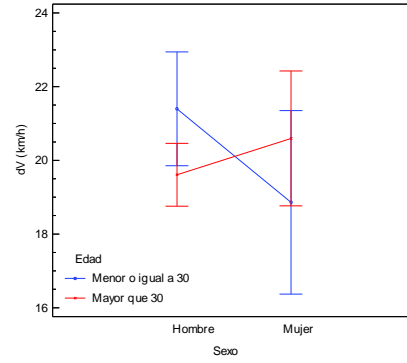
La Figura 9-19 muestra los gráficos de interacción para las variables $t3-t1$ y dV , siendo los factores el sexo y la edad (agrupada) del conductor del vehículo adelantante. Puede observarse que el tiempo de ocupación del carril izquierdo fue significativamente inferior en el caso de hombres de edad inferior a 30 años. El resto de grupos presentan tiempos medios $t3-t1$ similares. En el caso de la velocidad, pese a no haberse encontrado diferencias estadísticamente significativas al 95% de confianza, sí que se observa una tendencia que muestra que los conductores varones jóvenes alcanzaron velocidades ligeramente superiores.



(a) $t3-t1$

ANOVA p-valores

edad: 0,445, sexo: 0,113, interacción: 0,088



(b) dV

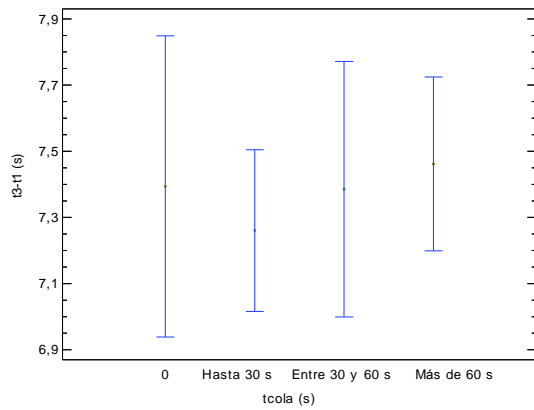
ANOVA p-valores

edad: 0,9191, sexo: 0,6337, interacción: 0,1459

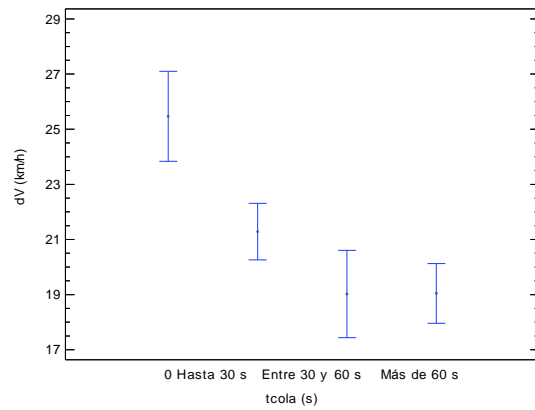
medias					
$t3-t1$ (s)	< 30	> 30	dV (km/h)	< 30	> 30
hombre	6,5	7,2	hombre	21,4	19,6
mujer	7,5	7,2	mujer	20,6	18,67

Figura 9-19. Efecto del sexo y de la edad del conductor adelantante en $t3-t1$ y en Vp (maniobras simples)

La Figura 9-20, por su parte, muestra la influencia de la demora, calculada como tiempo en seguimiento hasta el inicio de la maniobra. El primer grupo de maniobras tiene una demora igual a cero, lo que coincide, generalmente, con maniobras lanzadas en las que el vehículo adelantante no llega a igualar su velocidad a la del adelantado. Tal como puede observarse, no existió una influencia clara de la demora en el tiempo de ocupación del carril contrario. Sin embargo, las velocidades medias del adelantado decrecieron al aumentar la demora, mostrando el efecto contrario a la impaciencia, es decir, el hecho de que los conductores sufrieron más demora adelantaron más espacio.



(a) $t3-t1$
ANOVA p-valor = 0,7964
 $n = 273$ $m = 7,4$ s SD = 1,9 s



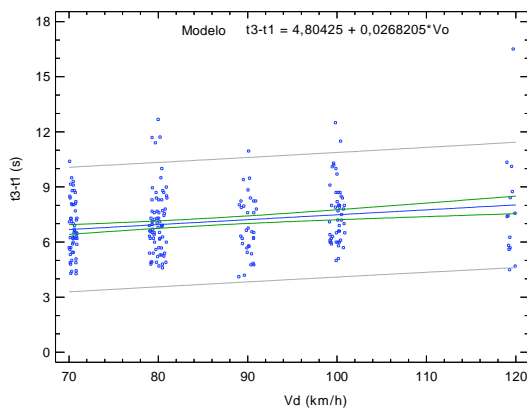
(b) $Vp-Vi$
ANOVA p-valor = 0,0148
Tcola = 0:
 $n = 33$, $m = 25,5$ km/h, SD = 13,1 km/h
Tcola = Hasta 30s:
 $n = 103$, $m = 21,3$ km/h, SD = 8,3 km/h
Tcola = Entre 30 y 60 s:
 $n = 45$, $m = 19,0$ km/h, SD = 5,9 km/h
Tcola = Más de 30 s:
 $n = 93$, $m = 19,0$ km/h, SD = 6,0 km/h

Figura 9-20. Efecto de la demora en $t3-t1$ y en Vp (maniobras simples)

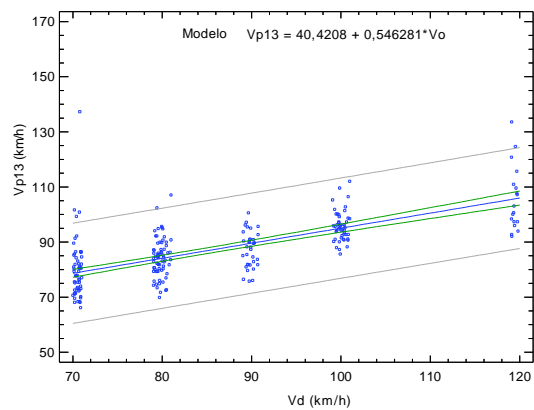
9.2.2.2.3. Carretera

Entre las características de la vía cuya influencia se estudió en esta investigación se encuentra la velocidad de diseño y la visibilidad disponible, en la medida que esta condicionaba la visibilidad del vehículo opuesto.

En la Figura 9-21 se observa la relación entre la velocidad de diseño del segmento de carretera donde tiene lugar la maniobra y el tiempo de ocupación del carril contrario y la velocidad media. Tal como puede apreciarse, no existe ninguna correlación entre la velocidad de diseño y el tiempo $t3-t1$ (R^2 igual a 6%). Por el contrario, el modelo de regresión lineal de Vp en función de la velocidad de diseño sí que mostró una correlación entre las variables, siendo el coeficiente R^2 igual al 47%.



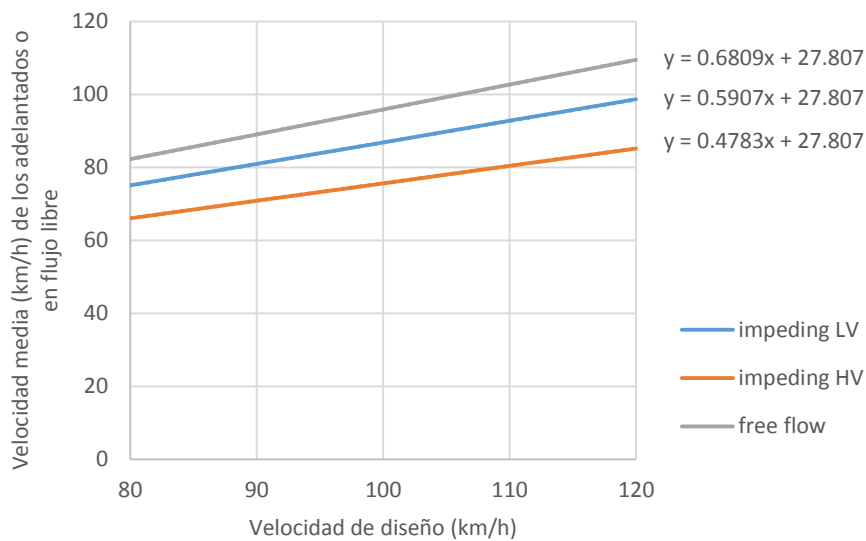
(a) modelo de $t3-t1$: $n = 299$ $R^2 = 6\%$



(b) modelo de $Vp13$: $n = 298$ $R^2 = 47\%$

Figura 9-21. Efecto de la velocidad de diseño en $t3-t1$ y en Vp (maniobras simples)

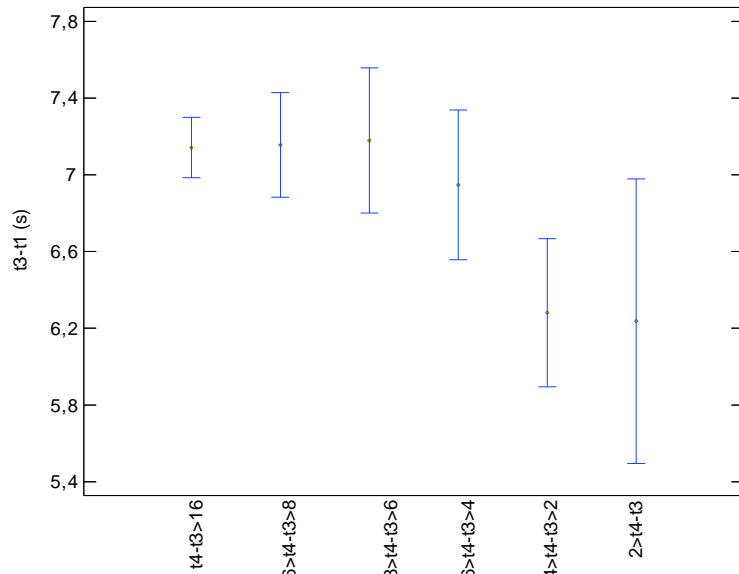
En la Figura 9-22 se ha estimado un modelo de regresión lineal para estimar la velocidad de los vehículos adelantados y la velocidad en flujo libre, en función de la velocidad de diseño. El valor del coeficiente R2 fue del 30%.



R2 = 30%
 SD res = 15,7 km/h
 MAerror = 12,0 km/h

Figura 9-22. Relación entre las velocidades del vehículo adelantado, velocidades en flujo libre y velocidad de diseño

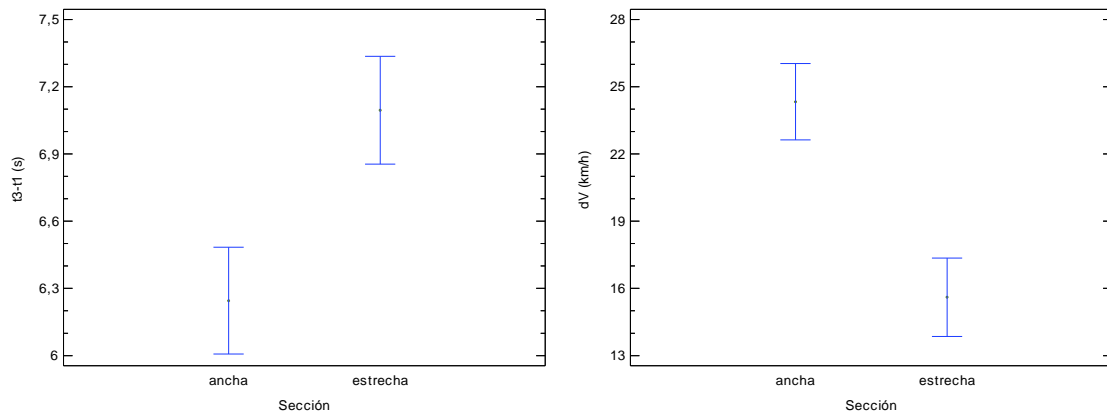
Con el objeto de estudiar la relación entre la visibilidad y proximidad del vehículo opuesto, se analizó la relación existente entre los tiempos $t4-t3$ y $t3-t1$, así como entre $t4-t3$ y la velocidad Vp . En concreto, se compararon las maniobras con un tiempo $t4-t3$ inferior a un umbral "X", con el resto de maniobras. Posteriormente, se fue variando el valor de ese umbral. Los resultados aparecen en la Figura 9-23. En ella, se observa que las mayores diferencias en $t3-t1$ entre el grupo de maniobras con $t4-t3$ inferior al umbral y el resto de maniobras aparecieron para umbrales de $t4-t3$ pequeños. En los umbrales 4 y 6 s, la significancia estadística de estas diferencias es mayor, siendo en estos casos el tiempo medio de ocupación del carril izquierdo claramente inferior cuando el vehículo opuesto está cerca (el número de observaciones por debajo del umbral 2 s fue muy bajo para que se diera esta diferencia). En la diferencia de velocidades dV , las mayores diferencias también se detectaron en este rango de umbrales de $t4-t3$, si bien no fueron estadísticamente significativas y no se han representado en la Figura.



Grupo	> 16 s	entre 8 y 16 s	entre 6 y 8 s	entre 4 y 6 s	entre 2 y 4 s	< 2 s
n	288	96	50	47	48	13
media (s)	7,1	7,1	7,2	6,9	6,3	6,2

Figura 9-23. Efecto del tiempo t_4-t_3 en t_3-t_1

Igualmente, dentro de los efectos derivados de las características de la carretera, se estudió la influencia de la sección transversal (existencia o no de arcenes) en la maniobra de adelantamiento. Para ello, se definió una sub-muestra con los tramos T5 y T6, ya que ambos cuentan con la misma velocidad de diseño pero T5 tiene una sección transversal sin arcenes y T6 dispone de ellos.



(a) t_3-t_1

ancha: $n = 59$, $m = 6,2$ s, $SD = 1,3$ s
 estrecha: $n = 58$, $m = 7,1$ s, $SD = 1,4$ s
 ANOVA p-valor = 0,001

(b) dV

ancha: $n = 59$, $m = 24,3$ km/h, $SD = 9,6$ km/h
 estrecha: $n = 58$, $m = 15,6$ km/h, $SD = 9,0$ km/h
 ANOVA p-valor = 0,000

Figura 9-24. Efecto de la sección transversal

Tal como se observa en Figura 9-24, en condiciones comparables, la duración de la maniobra se redujo un segundo, circulando 8,7 km/h más rápido, en el caso de disponer de arcenes en la carretera. No se apreciaron diferencias en otras variables debidas a la sección transversal.

9.2.2.2.4. Condiciones de iluminación

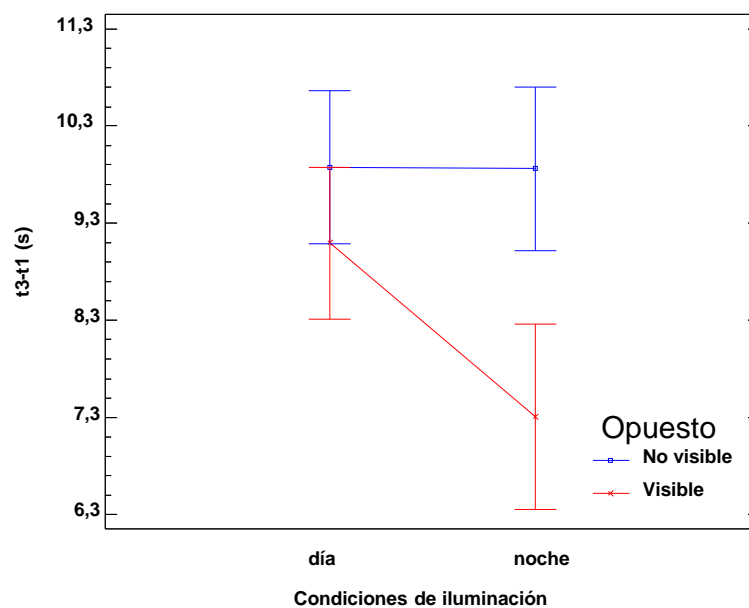
Hasta este apartado, todos los análisis realizados emplearon la muestra formada por maniobras en condiciones de iluminación diurna. Sin embargo, el presente estudio realizó una toma de datos experimental en horario nocturno, llevada a cabo en el tramo T1 y en la localización E8.

Dentro de la muestra de maniobras en horario nocturno que se obtuvo durante la ejecución experimental, se han aislado únicamente las maniobras que tuvieron lugar en dos zonas de adelantamiento (una localización formada por dos zonas de 1050 m y 1270 m de longitud, en la carretera N-225). De este modo, las maniobras son directamente comparables, puesto que, de hecho, las grabaciones se realizaron el mismo día.

Tradicionalmente, la hipótesis de partida es que por la noche es más seguro adelantar, ya que los faros de un vehículo opuesto pueden anticipar su presencia incluso antes de que el vehículo, en la misma posición, fuera visible por el día. Esta hipótesis queda recogida incluso en la normativa americana de diseño (AASHTO, 2004 y AASHTO, 2011), y también fue verificada por Farber (1969).

En este estudio se analizó la forma de adelantar de los conductores bajo las condiciones de iluminación diurna y nocturna (en ausencia de otras fuentes de iluminación en el entorno de la carretera). En concreto, se analizó la influencia de la iluminación en el tiempo de adelantamiento, bajo la hipótesis de que un comportamiento más conservador se refleja por tiempos de ocupación del carril izquierdo más elevados.

Tal como se observa en la Figura 9-25, el efecto de las condiciones de iluminación no fue significativo de manera individual. Sin embargo, la interacción de este efecto con la visibilidad de un vehículo opuesto en el momento de llevar a cabo el adelantamiento muestra que, en ausencia de vehículos opuestos, no hay cambios significativos en los tiempos de adelantamiento. Sin embargo, en presencia de vehículos opuestos, el tiempo de ocupación del carril izquierdo se redujo de forma significativa.



ANOVA p-valores:

Condiciones: 0,1414, Opuesto: 0,0067, Tipo i: 0,0178, interaccion condiciones*Opuesto: 0.1394

t_3-t_1 (s)	Tamaño muestral		t_3-t_1 (s)	Medias	
	día	noche		día	noche
Con opuesto	16	11	Con opuesto	9,1	7,3
Sin opuesto	16	14	Sin opuesto	9,9	9,9

Figura 9-25. Efecto de las condiciones de iluminación en el tiempo t_3-t_1

Este resultado no contradice la hipótesis tradicional, pero esta solo sería válida para situaciones en ausencia de vehículos opuestos. En presencia de los mismos, estos resultados indicarían que

es más difícil percibir su alejamiento y velocidad de aproximación (por el deslumbramiento), lo que provocaría que los adelantamientos fueran más rápidos.

El reducido tamaño de la muestra condiciona, no obstante, la extrapolación de los resultados.

9.2.2.3. Modelos

Tal como se ha comentado, el objetivo final del análisis es la formulación y calibración de modelos de distancia de visibilidad de adelantamiento, definida como la suma de las siguientes componentes:

1. La distancia recorrida por el vehículo adelantante en su ocupación del carril izquierdo: d_{13p} (en t_3-t_1)
2. La distancia recorrida por el vehículo opuesto en el mismo periodo de tiempo d_{13o} (en t_3-t_1).
3. El margen de seguridad existente entre el vehículo adelantante y el opuesto.

La distancia de visibilidad de adelantamiento, que posteriormente se emplea para la evaluación de criterios existentes, no puede ser medida directamente mediante las metodologías experimentales, pues representa un valor crítico (realmente, una distribución de frecuencias de valores críticos). Las observaciones contienen únicamente valores de distancia de visibilidad superiores al crítico, que han sido aceptados por los conductores.

Por ello, en este apartado se desarrollaron modelos para cada una de las componentes de la distancia de visibilidad de adelantamiento.

9.2.2.3.1. Vehículo adelantado

Hasta el momento, todos los modelos y estudios sugieren emplear un modelo de velocidad constante para caracterizar la trayectoria del vehículo adelantado.

9.2.2.3.2. Vehículo adelantante

La trayectoria del vehículo adelantante es la que requiere la mayor atención, ya que es el vehículo que debe variar significativamente su velocidad, desplazándose al carril izquierdo para rebasar al vehículo lento y regresar a su propio carril por delante de él.

La distancia longitudinal necesaria para ello constituye uno de los principales componentes de la distancia de visibilidad, y es un criterio necesario para conocer la longitud mínima que deberá tener una zona de adelantamiento.

La caracterización de la trayectoria del vehículo adelantante se basó en las observaciones realizadas desde el vehículo instrumentalizado, dado su mayor nivel de detalle y precisión.

Las variables características de la maniobra que se utilizaron para la calibración de los modelos fueron las que se enumeran a continuación:

- Instante t_1 , de inicio de la maniobra (cuando el vehículo adelantante comienza a invadir el carril izquierdo), hueco h_1 entre el adelantante y el adelantado y velocidad relativa dVp_1 .
- Instante t_2 , en el que el vehículo adelantante se encuentra en paralelo con el adelantado.
- Instante t_3 , de finalización de la maniobra (cuando el vehículo adelantante deja de invadir el carril izquierdo), hueco h_3 entre el adelantante y el adelantado y velocidad relativa dVp_3 .

A partir del registro GPS, basándose en el esquema de la Figura 9-26, se calculó la distancia recorrida por el adelantante, tanto hasta t_2 como hasta t_3 , es decir, d_{12p} y d_{13p} , recorridas en los intervalos de tiempo t_2-t_1 y t_3-t_1 , respectivamente.

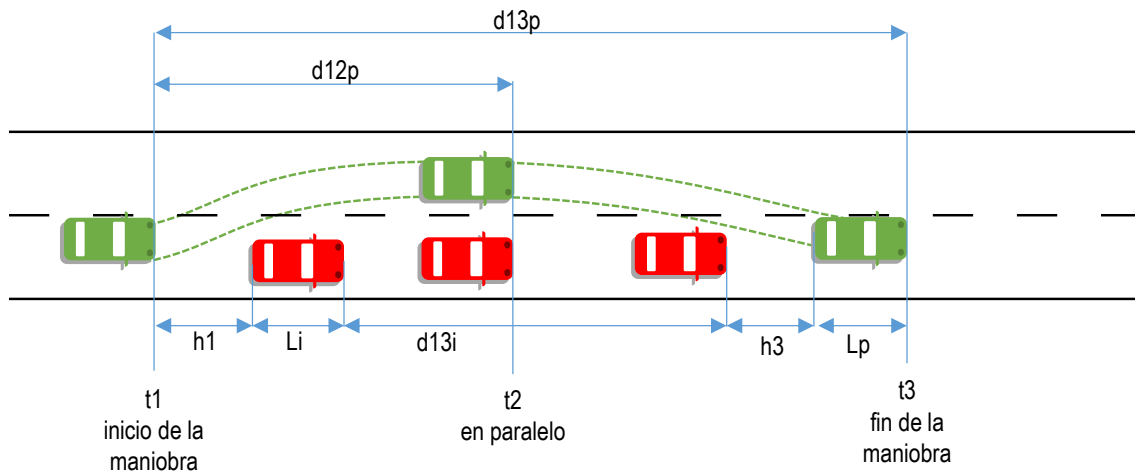


Figura 9-26. Variables del adelantamiento

La muestra de maniobras se resume en la Tabla 9-11, y el valor de las principales variables, en la Tabla 9-12. En este punto, se distinguió entre la muestra de maniobras empleada para la modelización de maniobras lanzadas y de maniobras que parten del seguimiento. Esto se debe, principalmente, a las diferencias existentes en el comportamiento del vehículo adelantante en ambos casos. En las maniobras que parten del seguimiento siempre se realiza una aceleración por parte del adelantante, mientras que en las maniobras lanzadas esta aceleración es inexistente o muy leve, por lo que los modelos que explicaron las trayectorias fueron diferentes.

Localización	Fecha	Vd (km/h)	Número de maniobras
N-225	06/02/2012	100	62
CV-415 (i)	13/09/2012	70	55
CV-415 (ii)	08/11/2012	70	30
CV-50 (iii)	08/11/2012	80	49
CV-405	20/11/2012	70	71

Tabla 9-11. Tamaño de muestra para modelos de trayectoria del adelantante

Sub-muestra		Variable								
		d_{12p} (m)	d_{13p} (m)	t_2-t_1 (s)	t_3-t_1 (s)	h_1 (m)	V_{p1} (km/h)	h_3 (m)	V_{p3} (km/h)	V_i (km/h)
Maniobra en seguimiento	media	61,2	163,8	2,9	7,1	7,5	71,1	21,2	88,8	65,5
	SD	19,0	42,0	0,9	1,8	3,7	10,4	8,2	11,1	8,3
Maniobra lanzada	media	70,2	162,5	2,7	6,3	27,8	n/a	25,2	n/a	64,3
	SD	22,1	44,5	0,8	1,6	14,2	n/a	14,0	n/a	8,4

Tabla 9-12. Resumen de las variables para modelos de trayectoria del adelantante

Formulaciones alternativas

A continuación se formularon distintos modelos, partiendo de modelos ya existentes en la bibliografía, o a partir de nuevos supuestos. El proceso de adelantamiento depende de la decisión del conductor, de su vehículo y de las condiciones impuestas a ambos. Lo habitual es que la aceleración no siga ninguno de los modelos aquí formulados. Sin embargo, el objetivo que se persiguió fue el de encontrar el modelo o modelos cuya calibración fuera lo más ajustada posible

a los datos observados, de modo que posteriormente fuera posible emplearlos en distintas aplicaciones, como es el caso de la estimación de la distancia de visibilidad de adelantamiento, pero también en modelos de simulación de tráfico o en análisis de seguridad vial. La Tabla 9-13 recoge los principales modelos hallados en la bibliografía, así como algunos nuevos. La obtención de sus ecuaciones se detalla en el Anexo VII.

Modelo (referencias)	Formulación	Parámetros
1: Velocidad uniforme Polus et al, 2000 AASHTO, 2004 El Bassiouni and Sayed, 2010	$a = 0$ $V = V_{pm13}$	a : tasa de aceleración del vehículo adelantante. V_{pm13} : velocidad media del vehículo adelantante durante el tiempo t_3-t_1 .
2: Aceleración uniforme Rocci, 1993	$a = a(\text{uniform})$ $V = V_{p1} + a \cdot t$	a : tasa de aceleración del vehículo adelantante. V_{p1} : velocidad inicial del vehículo adelantante.
3: Dos fases de aceleración uniforme	$\text{si } t < t_{12}: \\ a = a_{12} \\ v = V_{p1} + a_{12} \cdot t$ $\text{si } t > t_{12}: \\ a = a_{23} \\ v = V_{p1} + a_{12} \cdot t_{12} + a_{23} \cdot (t - t_{12})$	a_{12} : tasa de aceleración del vehículo adelantante antes de la posición en paralelo (de t_1 a t_2). a_{23} : tasa de aceleración del vehículo adelantante después de la posición en paralelo (de t_2 a t_3). V_{p1} : velocidad inicial del vehículo adelantante.
4: Aceleración uniforme hasta velocidad final Glennon, 1988 Hassan et al., 1996 Wang and Cartmell, 1999 El Khoury et al, 2007 AASHTO, 2011	$\text{si } t < t_f: \\ a = a \\ V = V_{p1} + a \cdot t$ $\text{si } t > t_f: \\ a = 0 \\ V = V_{p1} + a \cdot t_f$	a : tasa de aceleración del vehículo adelantante. t_f : finalización del tiempo de aceleración. V_{p1} : velocidad inicial del vehículo adelantante.
5: Aceleración variable, función lineal del tiempo	$a = mt + n$ $V = V_{p1} + m \cdot t^2 + n \cdot t$	a : tasa de aceleración del vehículo adelantante. m : variación de la aceleración por aumento de una unidad de tiempo. n : aceleración en el instante inicial. V_{p1} : velocidad inicial del vehículo adelantante.
6 Aceleración variable (función lineal de la velocidad)	$a = mv + n$ $V = \frac{n + m \cdot V_{p1}}{m} \cdot e^{-m \cdot t} - \frac{n}{m}$	a : tasa de aceleración del vehículo adelantante. m : variación de la aceleración por aumento de una unidad de velocidad. n : aceleración a velocidad 0. V_{p1} : velocidad inicial del vehículo adelantante.
t es la escala de tiempo durante la maniobra, siendo $t = t_1 = 0$ s el comienzo del adelantamiento		

Tabla 9-13. Formulación de modelos de trayectoria del vehículo adelantante

Estos modelos asumieron que el vehículo adelantante circulaba a velocidad constante, tal como tienen en cuenta todos los estudios hallados en la bibliografía, y tal como se tomaron los datos mediante el vehículo instrumentalizado.

Calibración

Debido a la aleatoriedad observada en la maniobra de adelantamiento, la calibración de los modelos cinemáticos de la trayectoria de cada uno de los vehículos adelantantes se realizó de forma individualizada. Posteriormente, se analizó la distribución de frecuencias de los parámetros obtenidos en la calibración individual.

La calibración se realizó de forma separada para las maniobras de adelantamiento que parten del seguimiento y para las lanzadas. El primer grupo lo formaron las maniobras que parten del seguimiento, siendo la muestra de 151 maniobras. El segundo grupo lo formaron las maniobras lanzadas, sumando un total de 29 maniobras. Las maniobras lanzadas fueron menos frecuentes y la medición de distancias por medio de los distanciómetros laser fue más complicada, ya que las trayectorias eran menos oblicuas y los huecos mucho más grandes.

Para maniobras en seguimiento, se calibraron todos los modelos mostrados en la Tabla 9-13. El objetivo de la calibración de cada modelo en cada maniobra fue el de obtener los valores de los parámetros del modelo que proporcionan la menor desviación entre la trayectoria observada y la trayectoria medida. Este proceso se basó en minimizar la función F .

$$F(X_i, M_i) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{d13p_{modelo}(M_i) - d13p_{observado}}{d13_{observado}} \\ \frac{d12p_{modelo}(M_i) - d12p_{observado}}{d12_{observado}} \\ \frac{Vp1_{modelo}(M_i) - Vp1_{observado}}{Vp1_{observado}} \\ \frac{Vp3_{modelo}(M_i) - Vp3_{observado}}{Vp3_{observado}} \end{array} \right\} \quad \text{Ecuación 9-7}$$

Donde:

- $X_i = (d13p_{observado}, d12p_{observado}, Vp1_{observado}, Vp3_{observado})$ es un vector de las desviaciones en cada una de las cuatro variables que describen la maniobra i : distancias $d12p$ y $d13p$ y velocidades $Vp1$ y $Vp3$.
- $d13p_{modelo}, d12p_{modelo}, Vp1_{modelo}$ and $Vp3_{modelo}$ son funciones de M_i , dependiendo del modelo escogido.
- $M_i = (mi1, mi2, \dots, miK)$ es un vector de los K parámetros del modelo para la maniobra i .

Cada uno de los componentes de F mide la diferencia entre el valor estimado de la variable y el valor observado. Dado que el número de parámetros del modelo (inferior a 4) es superior al número de ecuaciones (4), el sistema se resolvió por mínimos cuadrados. El objetivo de la resolución fue minimizar la función F .

$$M_i / \min(f_1(X_i, M_i)^2 + f_2(X_i, M_i)^2 + f_3(X_i, M_i)^2 + f_4(X_i, M_i)^2) \quad \text{para } i=1 \dots N \quad \text{Ecuación 9-8}$$

Para cada modelo, se analizaron las distribuciones de probabilidad de los parámetros, una vez agregadas las soluciones a todas las maniobras. Dichas distribuciones se muestran en la Tabla 9-14. El ajuste a las distribuciones de probabilidad que se muestran se verificó, en todo caso, empleando el test Chi-Cuadrado. También se muestran las correlaciones significativas (con un nivel de confianza del 95%) cuyo coeficiente es mayor a 0,5. En la tabla, la velocidad inicial del

adelantante siempre se ha expresado en términos relativos respecto de la del adelantado (coeficiente), ya que la velocidad del adelantado estaba prefijada en la toma de datos en valores constantes para cada carretera.

Modelo	Parámetro	Distribución y valores
1: Velocidad uniforme	V_{p1}/V_i	Lognormal p-valor = 0,292 media=1,203 SD=0,059
2: Aceleración uniforme	V_{p1}/V_i	Lognormal p-valor = 0,826 media=1,101 SD=0,050
	a (m/s ²)	Lognormal p-valor = 0,185 media=0,770 SD=0,476
	correlaciones (coeficientes)	no significativas
3: Dos fases de aceleración uniforme	V_{p1}/V_i	Lognormal p-valor = 0,204 media=1,078 SD=0,052
	a_{12} (m/s ²)	Normal p-valor = 0,723 media=1,186 SD=0,740
	a_{23} (m/s ²)	Normal p-valor = 0,850 media=0,402 SD=0,536
	correlaciones (coeficientes)	$a_{12} - a_{23}$ (-0,5661)
4: Aceleración uniforme hasta velocidad final	V_{p1}/V_i	lognormal p-valor = 0,248 media=1,076 SD=0,045
	a (m/s ²)	lognormal p-valor = 0,980 media=1,315 SD=0,681
	t_f (s)	normal p-valor = 0,645 media=4,310 SD=1,727
	correlaciones (coeficientes)	$a - t_f$ (-0,6575)
5: Aceleración variable como función lineal del tiempo	V_{p1}/V_i	lognormal p-valor = 0,493 media=1,081 SD=0,051
	m (m/s)	normal p-valor = 0,764 media=-0,131 SD=0,181
	n (m/s ²)	normal p-valor = 0,841 media=1,152 SD=0,750
	correlaciones (coeficientes)	$m - n$ (-0,9002)
6: Aceleración variable como función lineal de la velocidad	V_{p1}/V_i	normal p-valor = 0,478 media=1,080 SD=0,048
	m (1/s ²)	normal p-valor = 0,331 media=-0,189 SD=0,289
	n (m/s ²)	normal p-valor = 0,425 media=5,130 SD=6,445
	correlaciones (coeficientes)	$m - n$ (-0,9856)

Tabla 9-14. Resultados de la calibración de modelos de trayectoria del adelantante (en seguimiento)

En la Figura 9-27 se muestra el error cuadrático medio (porcentual) ($RMSE_j$) para cada una de las variables empleadas en la calibración y para cada uno de los modelos. El error se calculó como se indica en la Ecuación 9-9, y fue la variable empleada para medir el grado de ajuste del modelo a los datos observados.

$$RMSE_j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_{ij})^2}$$

Donde f_{ij} es el error relativo de la variable j en la maniobra i , correspondiente al término de la función F , $f(X_i, M_i)$.

Al incrementar la complejidad del modelo, los errores $RMSE$ decrecen, siendo los modelos 3, 4 y 5 los que menor error presentan en el conjunto de variables.

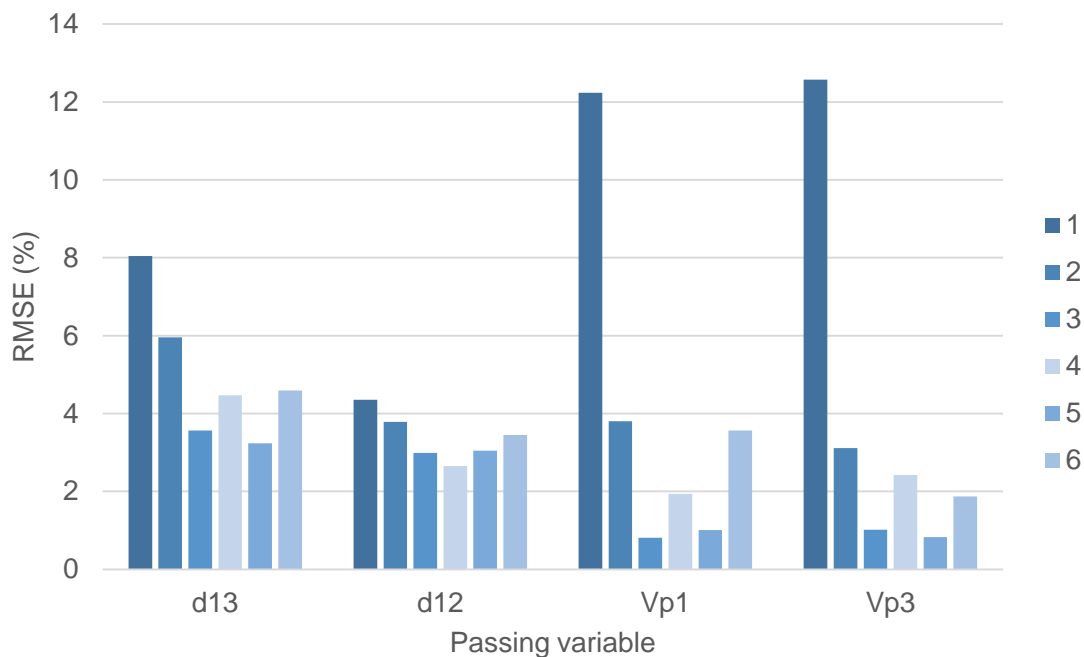


Figura 9-27. Error cuadrático medio

En cada modelo calibrado, los valores estimados para la aceleración fueron verificados, con el objeto de comprobar si representaban valores normales para vehículos. Para ello se emplearon tasas de aceleración (o deceleración por freno motor) basadas en la bibliografía: Rakha et al. (2004), Sparks et al. (1993), Liebermann (1982) y Fitzpatrick et al. (2012).

Estas tasas de aceleración de referencia se emplearon para determinar si la aceleración estimada por el modelo excedía los valores razonables, comprendidos entre las dos líneas de las gráficas de la Figura 9-28. Cualquier valor fuera de este rango no se tuvo en cuenta, constituyendo una estimación errónea y no pudiendo formar parte de la distribución de probabilidad de ese parámetro.

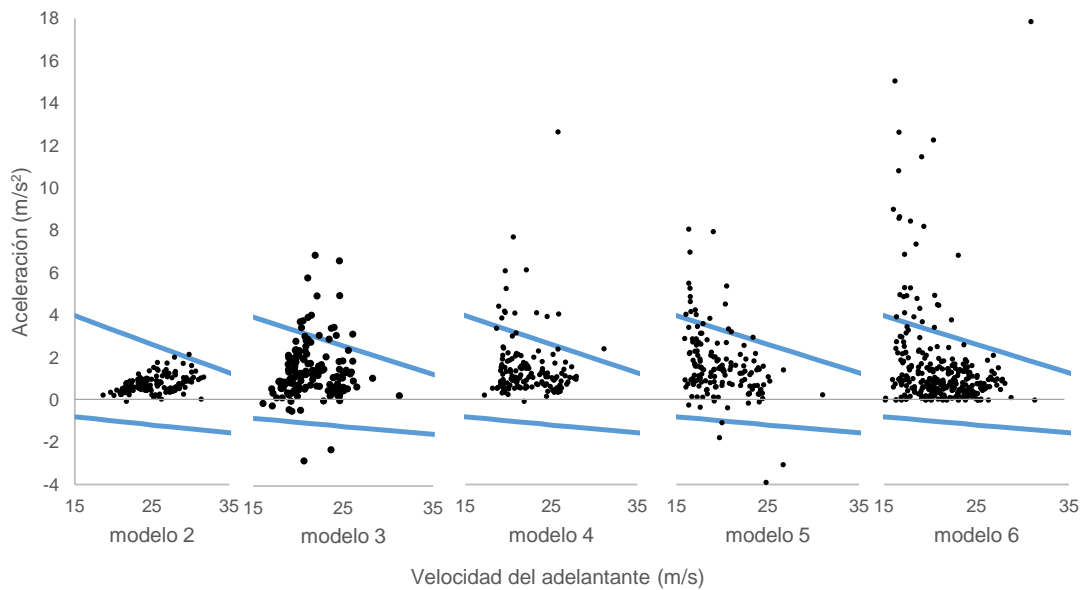


Figura 9-28. Tasas de aceleración obtenidas con los modelos planteados

Al aumentar la complejidad del modelo, el número de soluciones con valores de aceleración no válidos se incrementa, tal como se observa en la Figura 9-29. Estos resultados podrían indicar un efecto de sobre-determinación de los modelos, que se ajustaron de forma muy adecuada en los puntos de control, pero entre ellos dieron resultados inverosímiles.

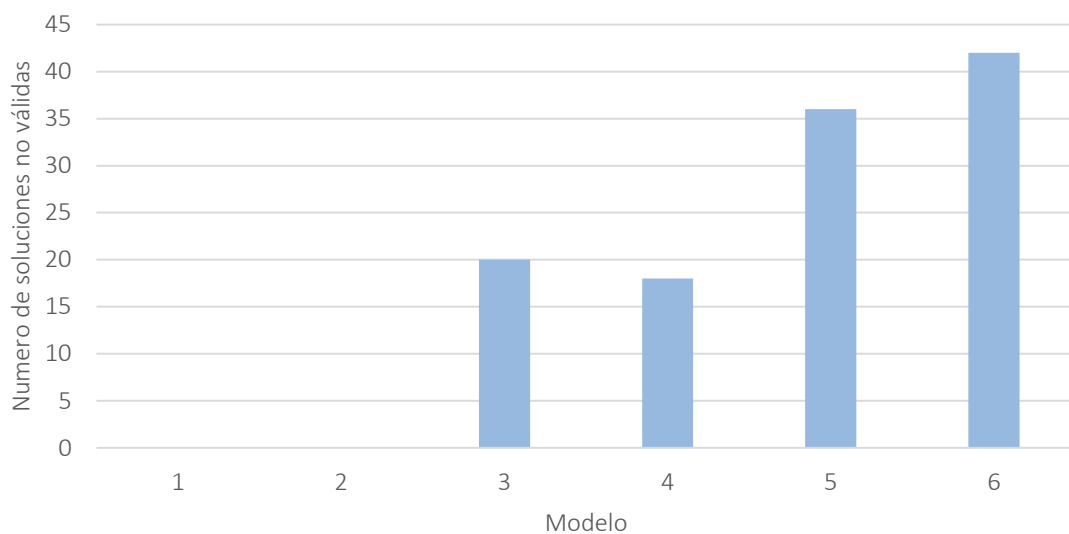


Figura 9-29. Numero de soluciones no válidas para los modelos planteados

Las maniobras lanzadas representan un comportamiento muy distinto del de las maniobras en seguimiento. En general, la distancia recorrida en el carril izquierdo es inferior, lo que se traduce en menores distancias de visibilidad necesarias, por lo que no suelen incluirse en modelos de evolución de vehículos (Glennon, 1988; Hassan et al., 1996; AASHTO, 2004). Las maniobras lanzadas no implican una aceleración del vehículo adelantante (o implican una aceleración mucho más reducida).

Debido al reducido tamaño de muestra de maniobras lanzadas (pues son menos frecuentes), solo se calibró el modelo 1, teniendo en cuenta, además, las siguientes razones:

- Una trayectoria mantenida a velocidad constante se asemeja a la definición teórica de maniobra lanzada: el vehículo ni acelera ni frena, sino que simplemente mantiene su velocidad rebasando al vehículo lento.
- Dado que en maniobras lanzadas los huecos $h1$ y $h3$ son mucho más elevados, la medición mediante los distanciómetros laser fue más complicada, y en bastantes ocasiones imposible. Por ello, el número de variables disponibles para la calibración se reduce. A pesar de ello, los valores de $h1$ y $h3$ se estimaron a partir del video, mediante la técnica de restitución de perspectivas. Esta metodología impidió, sin embargo, estimar con precisión las velocidades instantáneas en $t1$ y en $t3$.

La calibración del modelo 1 se realizó a partir de los datos de 29 maniobras observadas desde el vehículo instrumentalizado. La Tabla 9-15 muestra los resultados de la estimación. El valor del error *RMSE* fue del 5%, tanto para la distancia $d12p$ como para la $d13p$.

Modelo	Parámetro	Distribución y valores
1: Velocidad uniforme	V_{pm13}/V_i	Normal m = 1,425 s = 0,103 p-valor = 0,231

Tabla 9-15. Resultados de la calibración del modelo de trayectoria del adelantante (lanzado)

Interpretación

La interpretación de los resultados de la calibración permitió conocer con profundidad el comportamiento del conductor adelantante y se centró, por su mayor complejidad, en maniobras que parten del seguimiento.

Los modelos más simples (como el modelo 1) no fueron capaces de estimar la variación de velocidades durante la ocupación del carril izquierdo, aunque si estimaron algo mejor la distancia total recorrida durante la maniobra. El modelo 1 fue muy poco exacto a la hora de estimar los valores de las velocidades iniciales y finales (*RMSE* superior a 10%). La calibración del modelo 1 mostró que la velocidad del vehículo adelantante, en el caso de haber sido constante, fue un 20% superior a la del adelantado.

Los modelos 2, 3 y 4 obtuvieron unos resultados mejores, en función del valor de *RMSE*, para estimar adecuadamente las distancias $d12p$ y $d13p$, así como las velocidades V_{p1} y V_{p3} . El modelo 2 asumió una aceleración constante y el modelo 3 incorporó dos fases con dos valores distintos de la tasa de aceleración. El modelo 4 asumió dos fases, igualmente, pero la segunda de ellas se consideró como de aceleración nula y velocidad constante. El *RMSE* en todas las variables empleadas en la calibración fue inferior al 5%.

Los modelos 5 y 6 incorporan una variación lineal de la aceleración (en función del tiempo y de la velocidad, respectivamente). Los modelos 5 y 6 obtuvieron valores bajos *RMSE*, pero el número de soluciones no válidas se incrementó de forma significativa.

En los modelos 2 a 6, la velocidad inicial fue entre un 7% y un 10% superior a la del vehículo adelantado, lo cual sugiere que existe una fase de aceleración inicial previa, desarrollada en el carril propio y contenida en el tiempo $t1-t0$, o incluso antes del inicio del hueco. Posteriormente, se realiza una aceleración. El modelo 2 estimó una aceleración media de $0,77 \text{ m/s}^2$. El modelo 3 estimó una primera fase a $1,18 \text{ m/s}^2$ hasta la posición en paralelo, y una segunda fase con un valor de $0,4 \text{ m/s}^2$. El modelo 4 presentó una aceleración media de $1,3 \text{ m/s}^2$ hasta el 75% del tiempo $t3-t1$ (de media), a partir de la cual se continúa con aceleración nula.

En la Figura 9-30 se observa la evolución de velocidades del vehículo adelantante en cada uno de los modelos. Dado que la calibración se realizó de forma individual, se muestra el área cubierta entre los percentiles 15 y 85 del tiempo de ocupación del carril contrario. El eje horizontal representa dicho tiempo normalizado, es decir, asumiendo que todas las maniobras duran lo mismo.

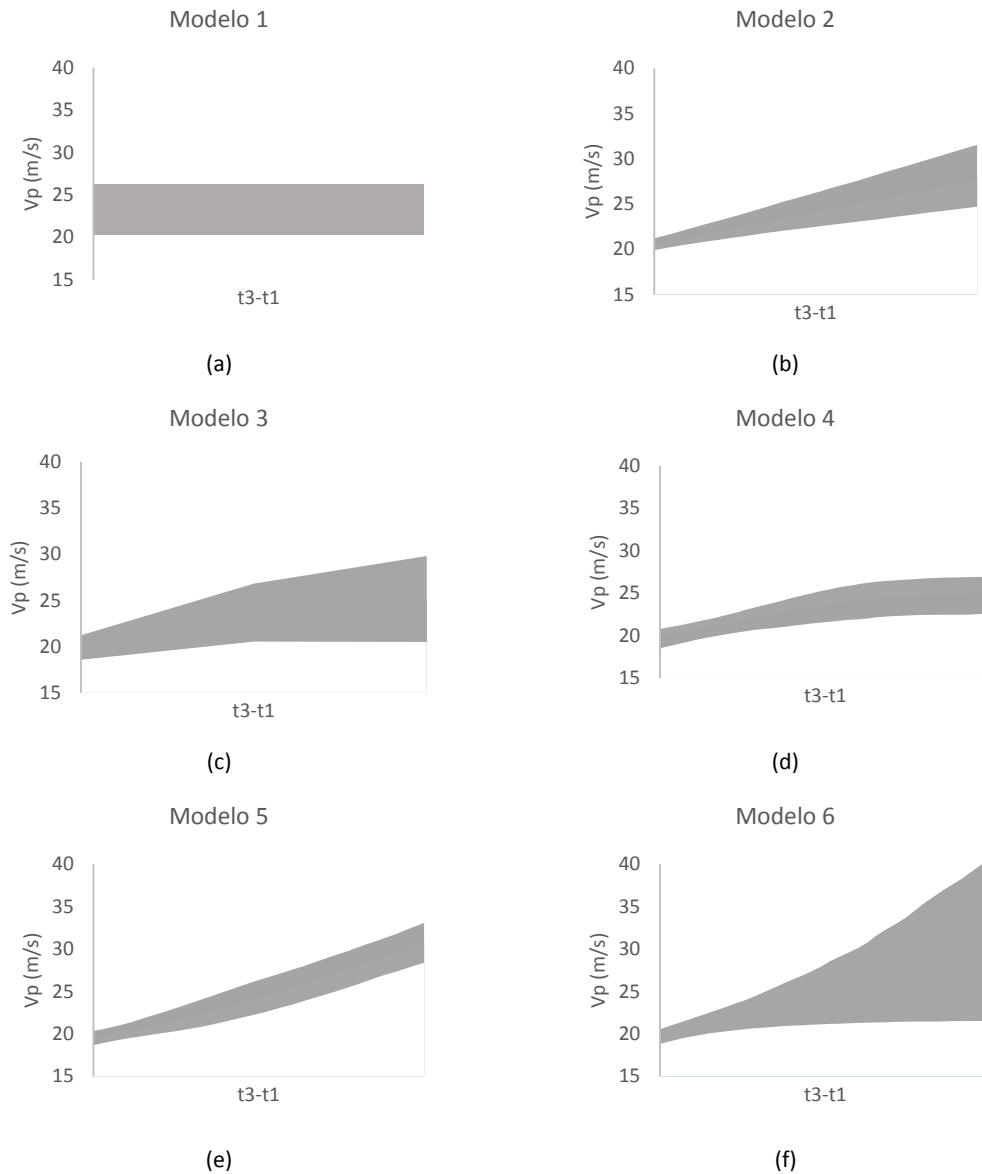
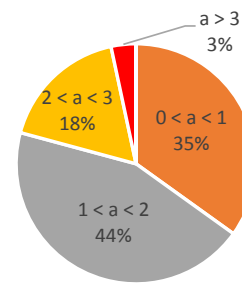
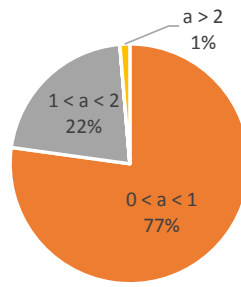
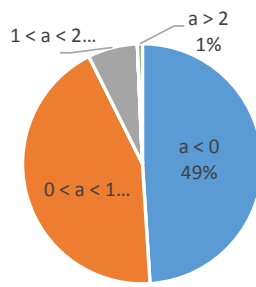


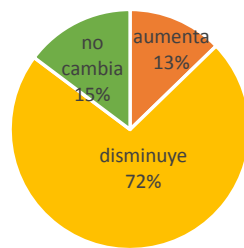
Figura 9-30. Modelos de aceleración calibrados. Percentil 15 y 85.

Teniendo en cuenta los resultados de la calibración, y asumiendo que podrían existir varios modelos válidos, se constituyó una muestra de todas las maniobras en seguimiento empleadas en la calibración, escogiendo para cada una de ellas el modelo de mejor ajuste. De este modo, los porcentajes de modelos 2, 3, 4, 5 y 6 fueron el 11%, 28%, 29%, 19% y 13%, respectivamente. Con este procedimiento, todas las maniobras lanzadas, por su parte, se representaron mediante el modelo 1.

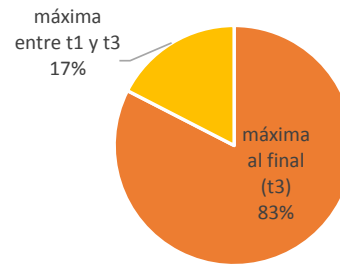
Para el conjunto de maniobras en seguimiento, los valores extremos y medias de la aceleración son los mostrados en la Figura 9-31.



(a) Aceleración mínima (m/s^2) (b) Aceleración media (m/s^2) (c) Aceleración máxima (m/s^2)



(d) Variación en aceleración



(e) Posición con velocidad máxima

Figura 9-31. Valores de aceleración extremos, media y variación en la muestra de maniobras en seguimiento

El 49% de los vehículos que adelantaron deceleró en algún momento durante la maniobra. El resto de vehículos desarrolló una aceleración mínima entre 0 y 1 m/s^2 . Los valores medios de la aceleración se encontraron entre 0 y 1 m/s^2 en el 77% de los casos. Las tasas máximas superaron los 3 m/s^2 solo en el 3% de los casos, estuvieron entre 2 y 3 m/s^2 en el 18%, entre 1 y 2 m/s^2 en el 44% y entre 0 y 1 m/s^2 en el resto. El 72% de los conductores disminuyó la tasa de aceleración durante la maniobra, aunque el 83% alcanzó la velocidad máxima en el final de la misma.

La utilización de uno u otro modelo (o una combinación de ellos) dependería en cada caso de la necesaria precisión y de la simplicidad o velocidad de cálculo. En este sentido, debería valorarse en cada caso qué variable o variables se deben determinar.

9.2.2.3.3. Vehículo opuesto

La práctica totalidad de modelos de distancia de visibilidad existentes considera que la velocidad del vehículo opuesto es constante. El valor de dicha velocidad es, en general, igual a la velocidad de diseño, a la de operación o a la máxima permitida. Sin embargo, en el fenómeno real, es habitual que el vehículo opuesto aparezca desde una curva, cuya velocidad de operación es inferior a la de una recta. La trayectoria habitual de un vehículo opuesto es la de aceleración desde la velocidad de paso por curva hasta la velocidad deseada en la recta.

Por este motivo, se compararon las dos formulaciones distintas para el modelo de evolución de velocidades del vehículo opuesto: constante e idéntica al valor de la velocidad deseada (asimilada al percentil 85 de la velocidad de operación en flujo libre en rectas), e igual a la velocidad en flujo libre (percentil 85) acelerando desde la velocidad de paso por curva.

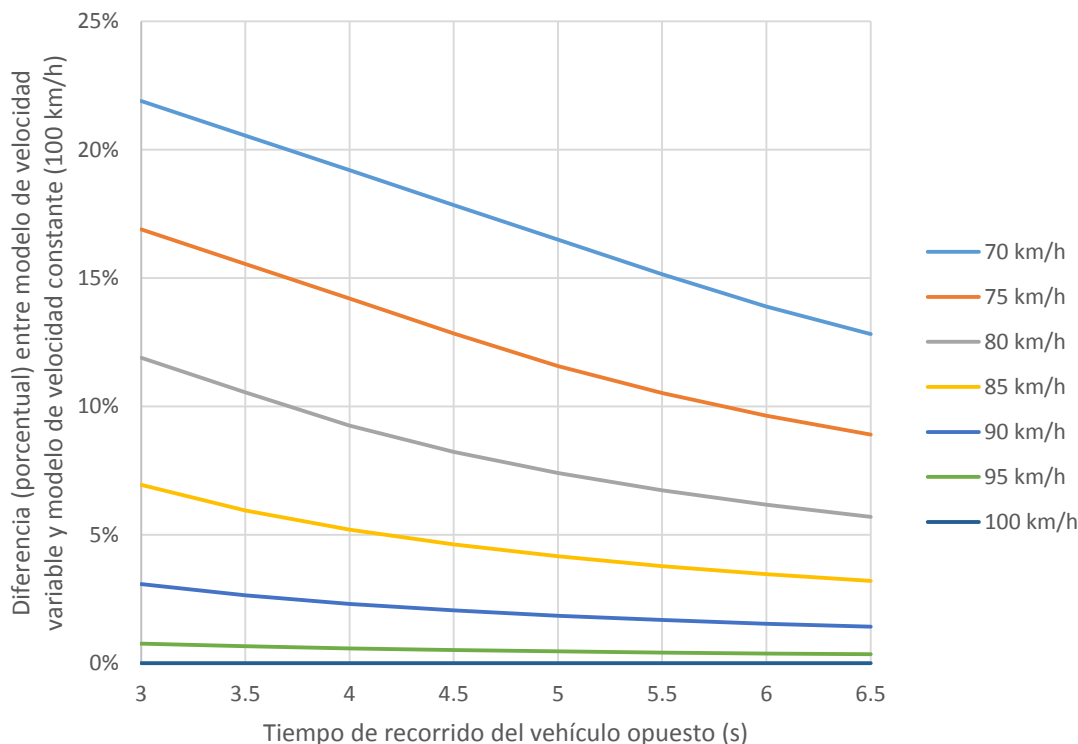


Figura 9-32. Efecto de la velocidad del opuesto en el cálculo de la distancia recorrida por el mismo en t_3-t_1 , para distintas velocidades de operación en curva (km/h)

La Figura 9-32 muestra el porcentaje de la diferencia de distancias recorridas por el opuesto considerando dos modelos. El primero de ellos incluye la aceleración desde distintas velocidades de operación en curva (líneas en colores) hasta 100 km/h y el segundo asume que la velocidad del opuesto es igual a 100 km/h (línea horizontal con diferencia nula).

Dependiendo de la diferencia existente entre la velocidad en flujo libre en el centro de la recta y la existente en las curvas, es posible que el modelo que incluye un movimiento uniformemente acelerado proporcione distancias hasta un 20% más cortas que el modelo que asume velocidad constante. Sin embargo, estas diferencias se reducen a menos del 5% cuando la diferencia de velocidades de operación es de hasta 10 km/h (siendo el error en la estimación de la distancia de visibilidad de adelantamiento todavía menor, pues es la suma de dos componentes más).

Por este motivo, y por la ausencia de tales diferencias de velocidad cuando la zona de adelantamiento está limitada por curvas verticales u otros elementos distintos a una curva en planta, no se ha considerado este efecto en la formulación del modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento.

9.3. Modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento

A partir de los resultados del análisis previo, se formuló un modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento. La distancia de visibilidad de adelantamiento se obtiene sumando los siguientes elementos, tal como se ha comentado:

1. Distancia recorrida por el vehículo adelantante, durante la ocupación del carril izquierdo. Esta distancia se obtuvo de un modelo de evolución de la velocidad del vehículo

adelantante, calibrado a partir de observaciones experimentales. En este caso, se escogió el modelo 2, al tratarse del modelo más sencillo posible que obtuvo un error reducido en las variables empleadas en la calibración.

2. Distancia recorrida, en el mismo tiempo que la anterior, por un vehículo que se acerca en sentido opuesto. En este caso, se empleó un modelo de velocidad constante, a pesar que en determinadas ocasiones (si la diferencia entre la velocidad de flujo libre en rectas y curvas es muy grande) sería conveniente emplear un modelo de aceleración uniforme.
3. Distancia de seguridad, calculada como la distancia recorrida por el adelantante y el opuesto durante el hueco residual crítico, obtenido a partir de las distribuciones experimentales de huecos residuales aceptados y rechazados.

9.3.1. Posición crítica

A lo largo de una maniobra de adelantamiento, la distancia de visibilidad necesaria para completarla va decreciendo, hasta llegar a un valor nulo una vez se ha regresado al carril propio. Por el contrario, a lo largo de la maniobra, la distancia necesaria para abortarla va aumentando, siendo nula antes de iniciar la ocupación del carril contrario. Si en cada instante de ocupación del carril contrario se tiene en cuenta el mínimo entre la distancia de visibilidad para completar y la distancia de visibilidad para abortar, existe un punto en el que la distancia de visibilidad es máxima. A este punto se le conoce como posición crítica, o punto de no retorno, pues a partir de este instante es mejor (y requiere menor tiempo o distancia de visibilidad) completar la maniobra que abortarla.

Sin embargo, en la realidad, la hipótesis según la cual existe y puede localizarse la posición crítica en ese punto de máxima distancia de visibilidad, no pudo verificarse, dado que apenas se observaron maniobras abortadas. Este hecho impidió poder modelar la finalización o aborto de la maniobra como un proceso de elección binaria, ya que no existían datos de maniobras abortadas. Además, los datos sugirieron que tal posición crítica se encuentra más retrasada que en el punto en el que se igualan las distancias de visibilidad, es decir, más cerca del inicio de la maniobra. De ser abortada una maniobra, se abortará en una fase muy temprana de la misma.

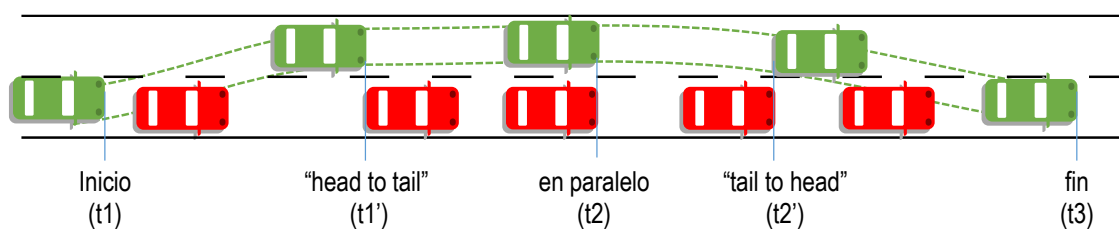


Figura 9-33. Posiciones críticas para el cálculo del modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento

Ante la ausencia de datos de deceleraciones movilizadas durante el aborto de una maniobra, se calcularon los requisitos de tiempo para completar la maniobra y de distancias de visibilidad de adelantamiento necesarias en diversas etapas, delimitadas por las posiciones relativas del vehículo adelantado y adelantante.

9.3.2. Hueco residual crítico

Hasta este momento se han descrito las trayectorias del vehículo adelantante y del opuesto, para el cálculo de la distancia de visibilidad de adelantamiento. Sin embargo, cuando se finaliza una maniobra de adelantamiento en condiciones de seguridad, debe existir una distancia de seguridad entre el vehículo adelantante y el opuesto. Esta distancia corresponde con el tiempo definido como hueco residual crítico.

El valor del hueco residual crítico no es observable, pues corresponde con un umbral que un conductor determinado aceptaría bajo unas circunstancias concretas. Sin embargo, en el apartado de modelos de decisión de adelantamiento (aceptación de huecos) se obtuvo una función de probabilidad del hueco residual crítico a partir de las observaciones correspondientes a los huecos residuales rechazados y a los huecos residuales aceptados. En la Figura 9-8 se muestra la distribución mencionada. Aquella distribución incluía todos los huecos residuales observados, incluyendo un gran número de los mismos en los que no existía un deseo de adelantar claro (huecos residuales muy grandes que fueron rechazados). Por este motivo, y ante la imposibilidad de descartar estas situaciones, se ha eliminado el 15% de los huecos más grandes, en cada uno de los dos grupos (aceptados y rechazados). Con ello, se eliminaron huecos residuales rechazados superiores a 5 s y huecos residuales aceptados superiores a 15 s.

El resultado (mostrado en la Figura 9-34) es una distribución de huecos críticos menos dispersa, concentrada principalmente entre 0 y 10 s, resultado de la estimación de un modelo probit, de la misma forma que se describió anteriormente.

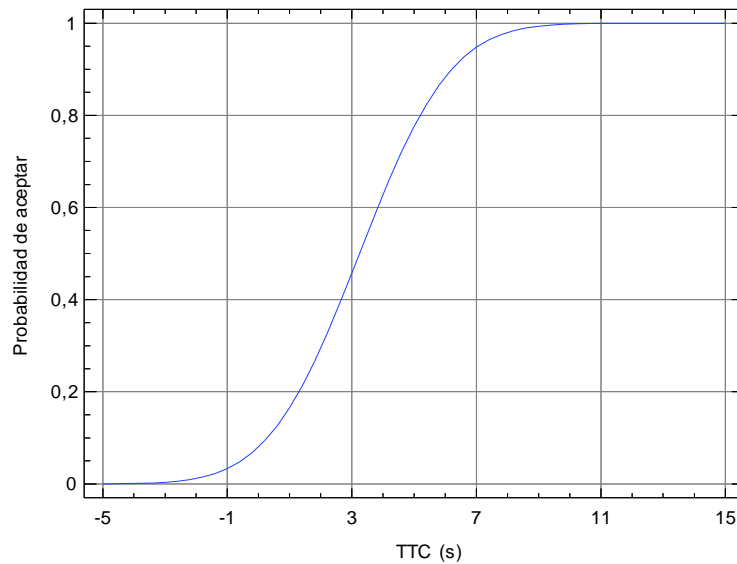


Figura 9-34. Distribución de huecos residuales críticos para el modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento

9.3.3. Ecuaciones

Las ecuaciones del modelo se presentan a lo largo de esta sub-sección. La Ecuación 9-10 se emplea para calcular el tiempo necesario para completar la maniobra desde su inicio. El tiempo necesario desde de los instantes definidos en la Figura 9-33 se obtiene de las ecuaciones 8-11 a 8-13.

$$t_3 - t_1 = \frac{-(V_{p1} - V_i) + \sqrt{(V_{p1} - V_i)^2 + 2a(L_i + L_p + h_1 + h_3)}}{a}$$

Ecuación 9-10

$$t_{1'} - t_1 = \frac{-(V_{p1} - V_i) + \sqrt{(V_{p1} - V_i)^2 + 2a(h_1)}}{a}$$

Ecuación 9-11

$$t_2 - t_1 = \frac{-(V_{p1} - V_i) + \sqrt{(V_{p1} - V_i)^2 + 2a(L_i + h_1)}}{a}$$

Ecuación 9-12

$$t_{1'} - t_1 = \frac{-(V_{p1} - V_i) + \sqrt{(V_{p1} - V_i)^2 + 2a(L_i + L_p + h_1)}}{a}$$

Ecuación 9-13

En la Ecuación 9-14 y en la Ecuación 9-15, se muestran las ecuaciones para obtener la distancia recorrida por el vehículo adelantante. En la Ecuación 9-16 y en la Ecuación 9-17, la recorrida por el vehículo opuesto.

$$d_{1xp} = V_{p1} \cdot (tx - t_1) + \frac{1}{2}a \cdot (tx - t_1)^2$$

Ecuación 9-14

donde x puede tomar los valores 1, 1', 2 y 2'.

$$dx_{3p} = d_{13p} - d_{1xp}$$

Ecuación 9-15

$$dx_{3o} = V_o \cdot (t_3 - tx)$$

Ecuación 9-16

donde x puede tomar los valores 1, 1', 2 y 2'.

$$t_3 - tx = t_3 - t_1 - (tx - t_1)$$

Ecuación 9-17

La Ecuación 9-18 se emplea para estimar la distancia de seguridad entre el adelantado y el adelantante, en el momento de finalizar la maniobra.

$$d_{34} = (t_4 - t_3)_{critico} \cdot (V_o + V_{p3})$$

Ecuación 9-18

donde:

$$V_{p3} = V_{p1} + a \cdot (t_3 - t_1)$$

Por último, la Ecuación 9-19 permite calcular la distancia de visibilidad de adelantamiento.

$$PSD(x) = dx_{3p} + dx_{3o} + d_{34}$$

Ecuación 9-19

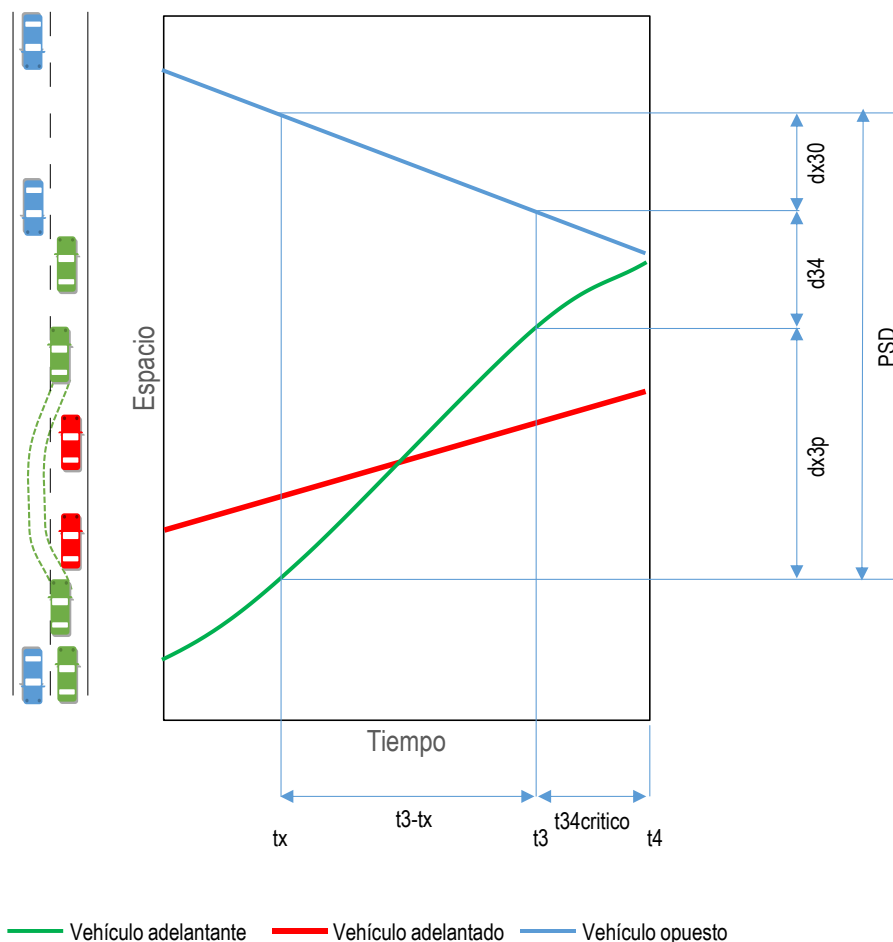


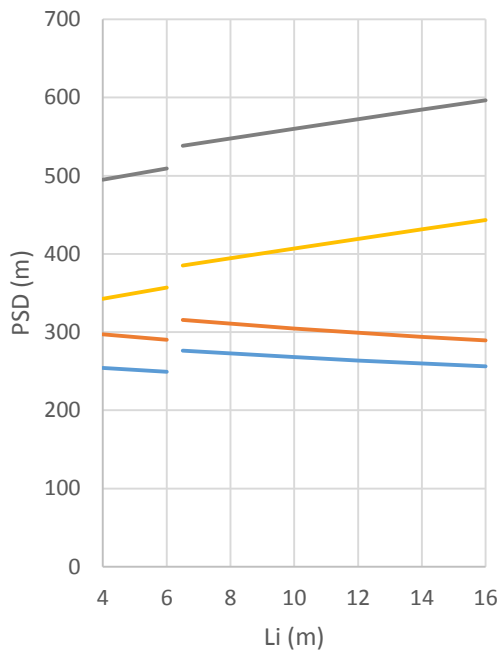
Figura 9-35. Distancia de visibilidad de adelantamiento

A continuación se estudió la sensibilidad del modelo a distintos parámetros, incluyendo la velocidad y el tipo de vehículo adelantado (ligero o pesado). El análisis de sensibilidad del modelo se realizó empleando una formulación determinista, empleando en este caso valores fijos e iguales a la media de cada una de las variables de entrada.

Posteriormente, se llevó a cabo la aplicación del modelo, para lo que se tuvieron en cuenta las distribuciones de probabilidad de cada una de las variables. Con ello, se planteó el modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento de forma probabilista, obteniendo como resultado una distribución de probabilidad de la distancia de visibilidad. Este procedimiento es más útil que la formulación determinista, ya que aporta, además de un valor de distancia de visibilidad, la probabilidad de que sea excedido, proporcionando de esta forma información acerca del riesgo existente. Todo ello se aborda con detalle en la sección 10.1 por medio del análisis de fiabilidad.

9.3.4. Análisis de sensibilidad

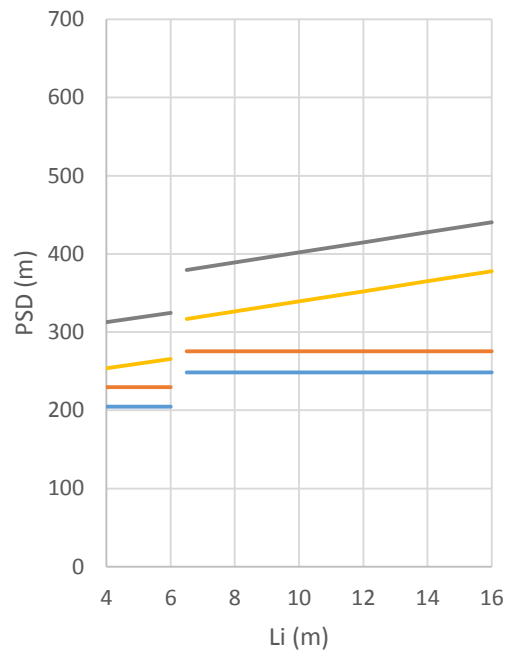
El efecto del tipo de vehículo adelantado (a través de todas las variables afectadas por dicha característica) se muestra en la Figura 9-36 y en la Figura 9-37. En ellas, se empleó como relación entre la velocidad de diseño y velocidad del vehículo adelantado el modelo propuesto en la Figura 9-22. Además, el valor del hueco h_3 medio fue de 30,0 m, en lugar de 23,9 m, tal como se observó en la Figura 9-12. El rango de longitudes comprendido entre 4 y 6 m correspondió con vehículos ligeros, y las longitudes superiores, con vehículos pesados.



— PSD1 — PSD1' — PSD2 — PSD2'

(a) En seguimiento

$Vd = 100 \text{ km/h}$, o $V85 = 112 \text{ km/h}$

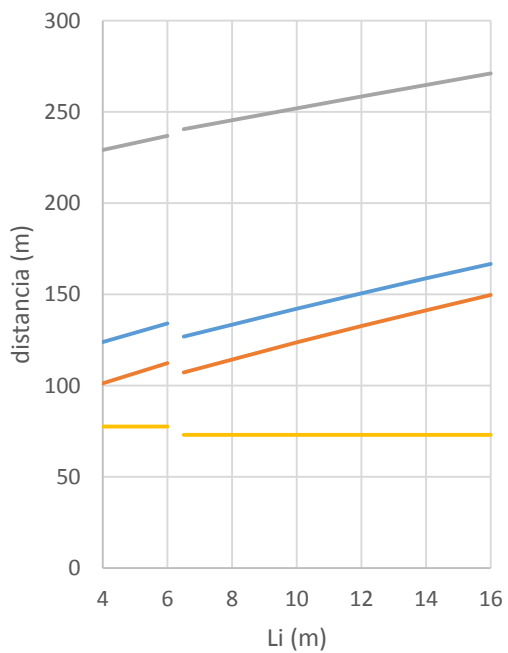


— PSD2 — PSD1 — PSD2' — PSD1'

(b) Lanzado

$Vd = 100 \text{ km/h}$ o $V85 = 112 \text{ km/h}$

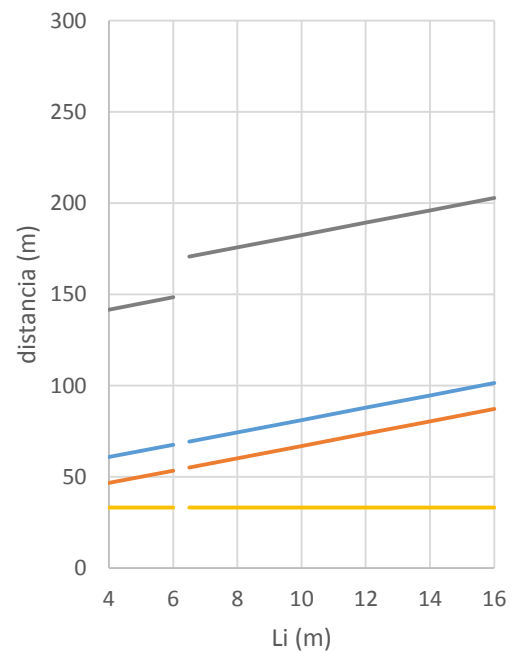
Figura 9-36. Efecto del tipo de vehículo adelantado y del modo de inicio en la distancia de visibilidad



— d13p — d11' — d12p — d12'p

(a) En seguimiento

$Vd = 100 \text{ km/h}$, o $V85 = 112 \text{ km/h}$



— d12p — d13p — d12'p — d11'

(b) Lanzado

$Vd = 100 \text{ km/h}$ o $V85 = 112 \text{ km/h}$

Figura 9-37. Efecto del tipo de vehículo adelantado y del modo de inicio en la distancia recorrida en el carril izquierdo

Tal como se observa, la distancia de visibilidad y la distancia recorrida en el carril izquierdo son superiores cuando se incrementa la longitud del vehículo a adelantar. En el salto que existe alrededor de los 6 m se observa una disminución de la distancia, pero únicamente se debe a que los vehículos pesados circulan a mayor velocidad. Las distancias recorridas hasta la posición 1' ("head to tail") no dependen de la longitud del vehículo. La distancia de visibilidad desde las posiciones 1 y 1' aumenta conforme lo hace la longitud, en cambio, en las posiciones 2 y 2' ("tail to head") disminuye, pues el vehículo adelantante circula a mayor velocidad.

En todos los casos, la maniobra más crítica, en cuanto a distancia requerida, es la maniobra que parte del seguimiento, pues las maniobras lanzadas requieren menor distancia de visibilidad y menor recorrido en el carril izquierdo.

En cuanto al efecto de la velocidad de diseño y de operación en flujo libre, el análisis de sensibilidad muestra un aumento en todas las variables de salida del modelo cuando el nivel de velocidades es superior. En este caso únicamente se representan las maniobras que parten del seguimiento. En la Figura 9-38 se observa dicha tendencia. Se ha empleado como referencia la velocidad de diseño del tramo, si bien se puede usar igualmente la velocidad de operación en flujo libre. En ambos casos, las velocidades de los vehículos se ajustan a las relaciones obtenidas en la Figura 9-22.

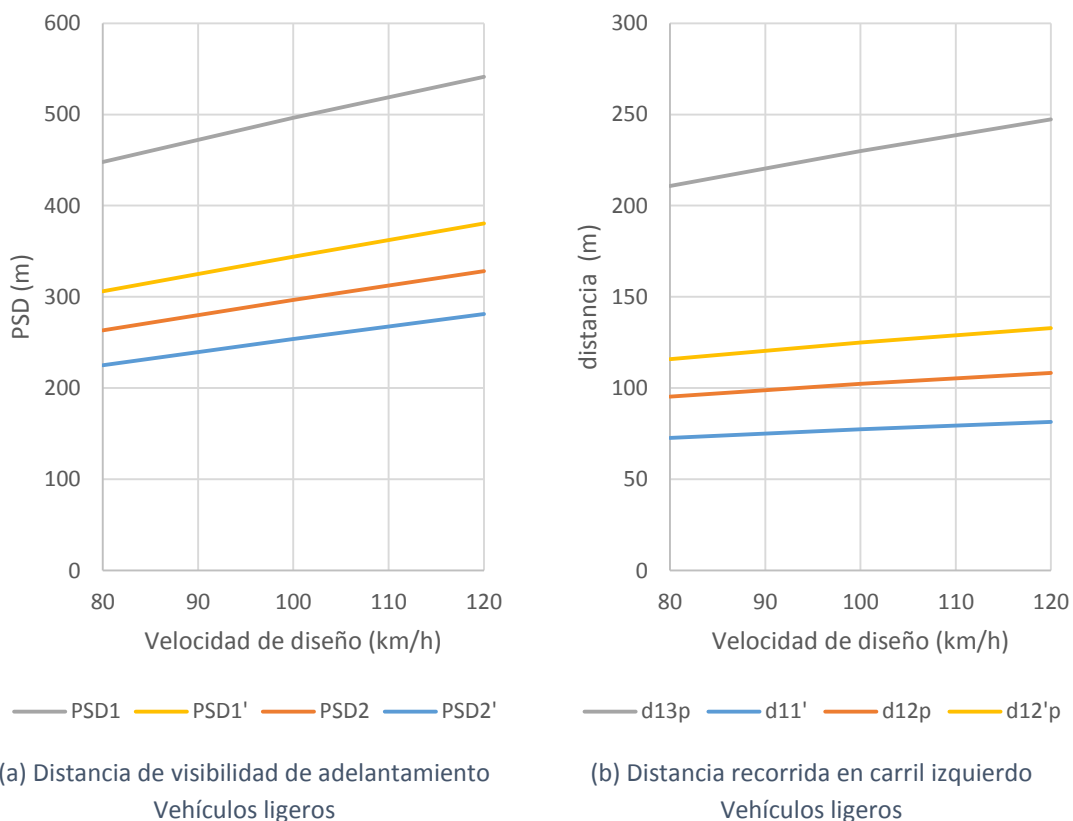


Figura 9-38. Efecto de la velocidad en la distancia de visibilidad y en la distancia recorrida

9.3.5. Aplicación del modelo

A continuación se va a aplicar el modelo a un conjunto de escenarios representativos de la realidad. Para ello, la formulación empleada será probabilística, es decir, el modelo se alimentará de las distribuciones observadas y medidas de las variables de entrada y tendrá como resultado las distribuciones de las variables de salida: distancia de visibilidad de adelantamiento y distancia recorrida por el vehículo adelantante.

La mayor parte de las mismas se han obtenido del análisis desarrollado en apartados anteriores. En concreto, las distribuciones de V_i , $h1$, $h3$ corresponden con las representadas en el apartado de análisis descriptivo, las distribuciones de V_p/V_i y a son el resultado de la calibración de modelos de trayectoria del vehículo adelantante y $TTC_{crítico}$ se obtuvo mediante el modelo de decisión binario correspondiente.

En cuanto a las longitudes de los vehículos implicados, se realizó un muestreo de más de 300 vehículos (ligeros y pesados). Dentro de cada tipo, se categorizaron los vehículos, asignando a cada categoría longitudes características de los vehículos del parque real. Por último, teniendo en cuenta la proporción relativa de cada categoría en el total de vehículos circulando se obtuvo una distribución global de longitudes, tanto para vehículos ligeros como para pesados, que se muestra en la Figura 9-39.

En la Tabla 9-16 se muestran las distribuciones de todas las variables de entrada. El modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento se aplicó a un conjunto de escenarios representativos de las situaciones observadas. Principalmente, esto se tradujo a la consideración de un rango amplio de velocidades de diseño (60 a 120 km/h) (en consonancia a ello, las velocidades de operación en flujo libre se situarían entre 83 y 125 km/h – percentil 85). Además, en cada uno de los casos se ha estudiado el adelantamiento a vehículos ligeros y el adelantamiento a vehículos pesados.

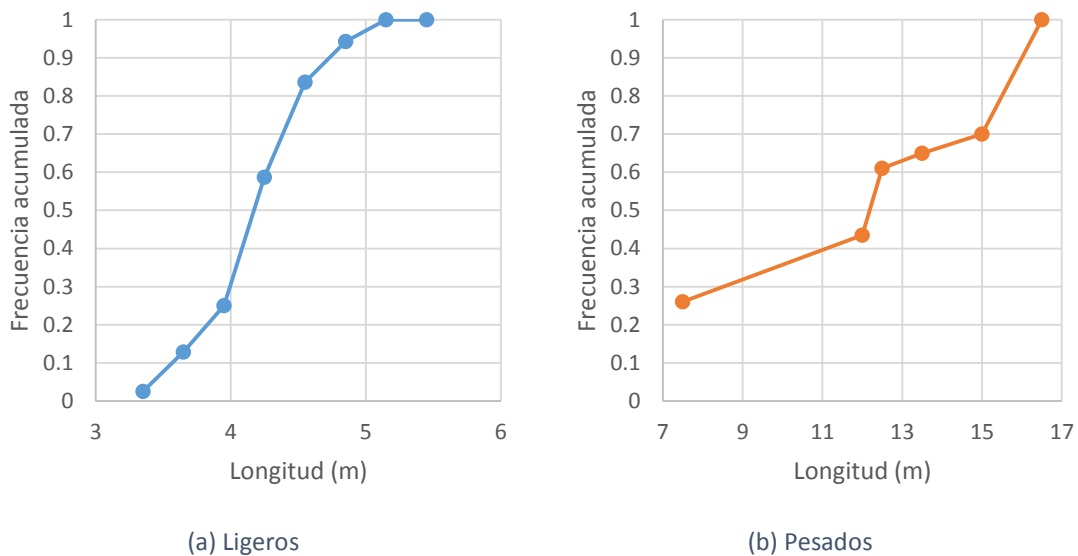


Figura 9-39. Distribución de longitudes de vehículos

Variable	Código	Unidades	Distribución	Parámetros
Velocidad del vehículo adelantado*	V_i	km/h	Normal	Ligeros: $m = 0,5907 \cdot V_d + 27,807$ SD = 15,70
				Pesados: $m = 0,4783 \cdot V_d + 27,807$ SD = 15,70
Velocidad inicial relativa del vehículo adelantante**	V_{p1}/V_i	adimensional	Lognormal	m = 1,10 SD = 0,05
Tasa de aceleración**	a	m/s ²	Lognormal	m = 0,77 SD = 0,47
Hueco adelantante- adelantado al iniciar la maniobra**	$h1$	m	Lognormal	m = 9,61 SD = 5,65
Hueco adelantante- adelantado al finalizar la maniobra**	$h3$	m	Lognormal	Ligeros m = 23,88 SD = 9,58
				Pesados: m = 30,00 SD = 18,60
Longitud vehículo adelantado***	L_i	m	Empírica	Ligero: Figura 9-39
				Pesado: Figura 9-39
Longitud vehículo adelantante***	L_p	m	Empírica	Ligero: Figura 9-39
Velocidad del vehículo opuesto****	V_o	km/h	Normal	$m = 0,6809 \cdot V_d + 27,807$ SD = 15,70
Margen de seguridad*****	$TT_{Crítico}$	s	Normal	m = 3,25 SD = 2,32
* V_d : Velocidad de diseño, entre 60 y 120 km/h en las carreteras del ámbito de estudio				
*obtenido mediante la metodología estática.				
**obtenido mediante la calibración de modelos de trayectoria del adelantante.				
***distribuciones empíricas a partir de bases de datos de vehículos				
****obtenido de las medidas de velocidad puntual				
*****obtenido de modelos de decisión binaria				

Tabla 9-16. Distribuciones de las variables de entrada del modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento

9.3.6. Resultados

A continuación se muestran, a modo de ejemplo, las distribuciones de frecuencias de las distancias de visibilidad obtenidas por el modelo. En la Figura 9-40 se observan los resultados, para el caso de vehículos adelantados ligeros. En el Anexo VIII se muestran los resultados completos.

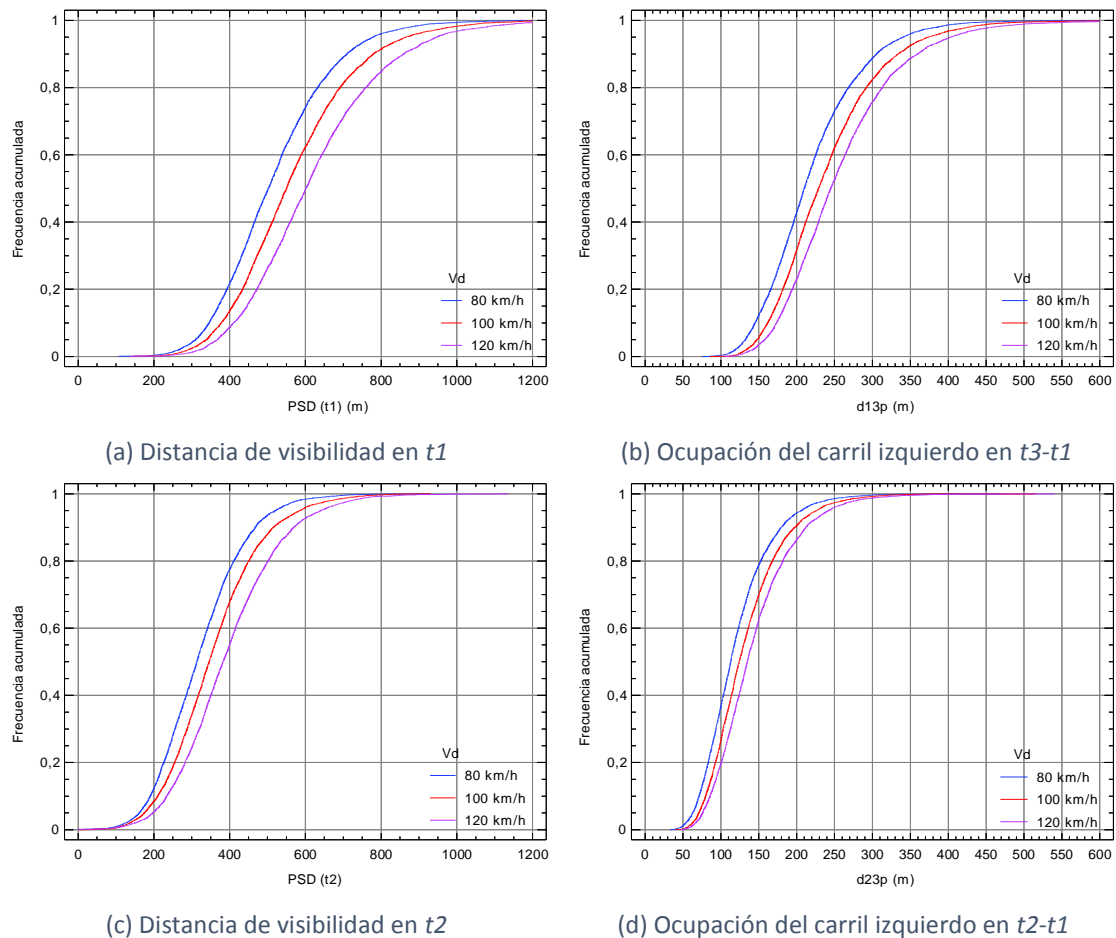


Figura 9-40. Resultados del modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento para vehículos ligeros

9.3.7. Distancia de visibilidad y hueco crítico

En este capítulo se ha abordado el problema de determinar la distancia necesaria para llevar a cabo un adelantamiento, invadiendo para ello el sentido contrario. Para ello, se estudiaron las decisiones de los conductores, estableciendo una distribución de huecos críticos a partir de las mismas. Por otra parte, se estudió la distancia de visibilidad necesaria a partir de la observación de la evolución del vehículo adelantante, modelizando su trayectoria a lo largo del tiempo, y obteniendo como resultado el modelo que se presentó en este apartado.

La Figura 9-41 muestra la comparación entre la distribución de distancias de visibilidad (para el modelo de $V_d = 85$ km/h – la misma media que en la muestra empleada para el modelo de elección binaria - y vehículos ligeros) y la distribución de huecos críticos (para el total de la muestra, medidos en unidades de distancia (d_{Gap})).

Los resultados muestran una mayor dispersión en el caso de la distribución de huecos críticos frente a la distribución de distancias de visibilidad resultante del modelo planteado. La distancia de visibilidad y el hueco crítico en decisiones de adelantamiento sin vehículo opuesto visible se sitúan alrededor del mismo valor medio, próximo a 500 m.

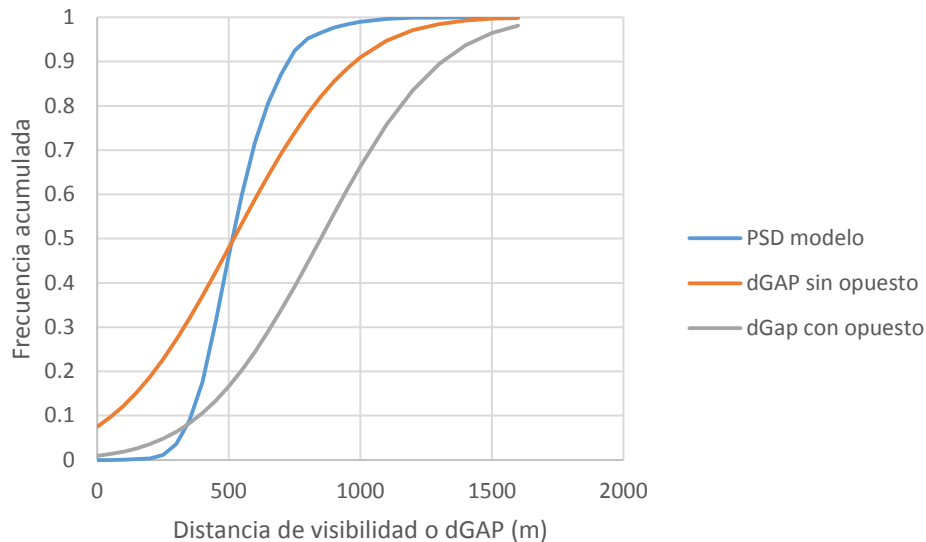


Figura 9-41. Comparación de hueco crítico y modelo de distancia de visibilidad

9.4. Conclusiones del análisis de la maniobra

El apartado de análisis y modelización permitió conocer y describir el comportamiento de los conductores durante el adelantamiento, gracias a una muestra de 1049 maniobras, observadas mediante dos metodologías distintas (528 mediante la metodología estática o grabación desde puntos fijos y 521 mediante la metodología dinámica, o grabación desde vehículos instrumentados).

Los datos cubrieron un rango amplio de características determinantes en la maniobra de adelantamiento, como el número de vehículos adelantados, el tipo de vehículos implicados o las condiciones de iluminación. Sin embargo, el análisis y modelización se centró principalmente en las maniobras simples (un único vehículo adelantado, sea ligero o pesado) que tuvieron lugar durante el día, por ser el caso más numeroso.

El análisis se dividió en las dos fases principales de la maniobra de adelantamiento. En primer lugar se estudió el seguimiento en cola, que incluye de forma conjunta el deseo y la decisión de adelantar. En segundo lugar se estudió la ejecución de la maniobra, ocupando para ello el carril destinado al tráfico en sentido opuesto.

En cuanto a la aceptación de huecos, la modelización de un proceso de elección binaria agrupó de forma conjunta el deseo y la decisión de adelantar. Los modelos basados en huecos descritos en unidades de distancia (distancia hasta el vehículo opuesto o distancia de visibilidad disponible, según el caso) presentan un ajuste mucho mejor. Este hecho sugiere que las decisiones de adelantar se basan más en la distancia que en la estimación del tiempo necesario para adelantar, algo que podría explicarse porque la estimación de la velocidad del vehículo opuesto por parte del conductor que adelanta es muy compleja, dada la distancia a la que se encuentra cuando se está adelantando.

Los valores críticos medios de hueco se situaron en 500 m en ausencia de vehículos opuestos y algo más de 800 m en presencia de vehículos opuestos, siendo la visibilidad de vehículos aproximándose uno de los factores con mayor influencia en las decisiones. A pesar de esta gran diferencia, prácticamente ningún autor la había estudiado hasta el momento. Además del tamaño

del hueco y de la existencia de vehículos opuestos, se detectó que los hombres aceptan huecos ligeramente inferiores a las mujeres, no apreciando efectos claros de la edad del conductor adelantante o de la demora acumulada durante el seguimiento.

A partir de lo anterior, y sobre todo de los datos de las maniobras de adelantamiento ejecutadas, se caracterizó la trayectoria del vehículo adelantante. Para ello, se calibraron seis modelos distintos. En general, el movimiento del vehículo adelantante se puede representar por una aceleración, que normalmente disminuye ligeramente a lo largo de la maniobra. La mayor velocidad se suele alcanzar al final de la misma.

Combinando la simplicidad matemática y un adecuado grado de ajuste, se escogió, para fases posteriores del análisis, un modelo según el cual el vehículo adelantante acelera con una tasa constante y centrada en $0,77 \text{ m/s}^2$ (valor medio), desde una velocidad inicial que ya es un 10% superior a la del vehículo que desea adelantar (de media). Este modelo predice la distancia recorrida y las velocidades iniciales y finales de maniobras en seguimiento con un error cuadrático medio inferior al 5%, basándose en los datos de la muestra de maniobras empleada para su calibración.

Este modelo de trayectoria del vehículo adelantante forma parte del modelo de distancia de visibilidad que se planteó al final del capítulo. Además, se tuvo en cuenta la distancia que recorre un vehículo opuesto durante el tiempo que se está invadiendo el carril contrario, y el margen de seguridad crítico entre adelantante y opuesto, al finalizar la maniobra, que se obtuvo a partir de los valores del hueco residual obtenidos a partir de un modelo de elección binaria.

El modelo de distancia de visibilidad se ha formulado de forma probabilística, de modo que se alimenta de las distribuciones de frecuencia de las variables de entrada, y proporciona como resultado, para las siguientes etapas del análisis, una distribución de frecuencias de distancias de visibilidad de adelantamiento, en sucesivas etapas de la maniobra.

10. Análisis de seguridad vial

Este capítulo de la tesis aborda el estudio de los aspectos relacionados con la seguridad vial de la maniobra de adelantamiento. Para ello, se han empleado dos metodologías diferentes.

En primer lugar, se empleó el modelo probabilístico de distancia de visibilidad de adelantamiento para estudiar indicadores de riesgo objetivo por medio de un análisis de fiabilidad o análisis de estados límite. De esta forma, partiendo de los datos experimentales obtenidos (y los modelos que mejor los representan), fue posible estimar la probabilidad de que un determinado valor de distancia de visibilidad sea o no suficiente para realizar una maniobra, teniendo en cuenta la variabilidad y dispersión de las variables que afectan el fenómeno.

Posteriormente, se analizó una base de datos de accidentes, centrándose en aquellos relacionados con la maniobra de adelantamiento, para estudiar los factores concurrentes en los mismos. Entre ellos, se destacaron los relacionados con la geometría de las zonas de adelantamiento.

10.1. Análisis de fiabilidad

El análisis de fiabilidad (Reliability analysis) permite tener en cuenta la variabilidad de los parámetros de entrada a lo largo del diseño de un sistema. El campo habitual de este tipo de análisis es el diseño estructural, donde también se conoce como teoría de los estados límite, si bien existen aplicaciones recientes en el campo del diseño de carreteras (El Bassioui y Sayed, 2010; Ismail y Sayed, 2009; Ibrahim y Sayed, 2011; o Haleem et al., 2010).

El principal objetivo de este análisis es determinar la probabilidad de que un elemento del diseño (resistencia u oferta de una estructura o visibilidad disponible para adelantar) esté por encima de unos valores aceptables de solicitud o demanda (carga aplicada a una estructura o distancia necesaria para adelantar).

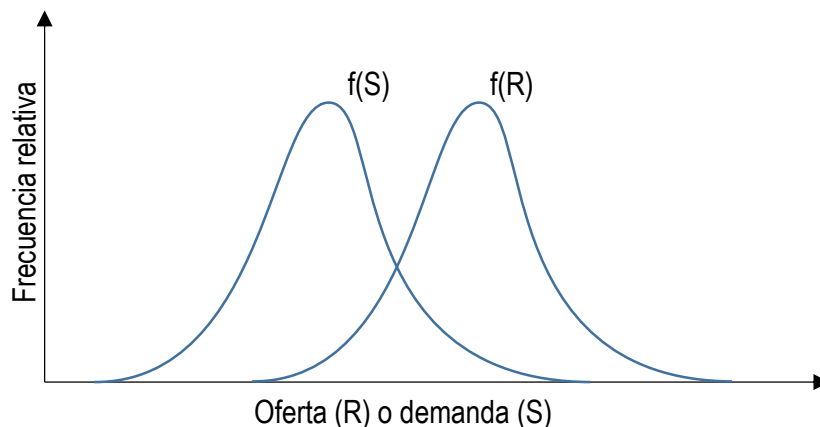


Figura 10-1. Funciones de distribución de la oferta y la demanda del sistema

La probabilidad de fallo es el indicador empleado en cálculo de estructuras, representando el colapso de la estructura objeto de estudio. En ingeniería de carreteras, de acuerdo a Ismail y Sayed (2009), es más apropiado el término probabilidad de no-cumplimiento, puesto que no existe un colapso físico como tal del sistema, tal como se desarrollará en este apartado.

El análisis de fiabilidad define la función objetivo o función de estado límite $G(X)$ de forma que toma valores positivos cuando las condiciones son favorables al sistema. Por este motivo, suele expresarse como la diferencia entre la oferta R (resistencia) y la demanda S (solicitud) (Ecuación 10-1).

$$G(X) = R(X) - S(X) \quad \text{Ecuación 10-1}$$

donde:

- G es la función objetivo.
- R es la resistencia u oferta.
- S es la demanda.
- X es un vector de los parámetros de entrada del problema $X = x_1, x_2, \dots, x_n$.

En ingeniería de carreteras, el término de resistencia es la provisión de unas condiciones de conducción segura y confortable para la realización de una maniobra. El término de demanda depende de los requisitos del conjunto vehículo-conductor para efectuar dicha maniobra. La aleatoriedad en los parámetros X , y por tanto en las funciones R , S y G se puede caracterizar por medio de la función de distribución de G , denominada $f(X)$. Según esto, la probabilidad de no-cumplimiento del sistema se calcula como se indica en la Ecuación 10-2.

$$P_{nc} = P(G < 0) = \int_{G(X) < 0} f(x) dx \quad \text{Ecuación 10-2}$$

La integral de la Ecuación 10-2 puede resolverse por métodos numéricos o analíticos. La resolución analítica se basa en la simulación mediante el método Monte Carlo. Con este método se genera una muestra de vectores X con valores aleatorios de los parámetros de entrada, a partir de la caracterización de sus distribuciones de frecuencia y posibles correlaciones. Cada una de las simulaciones proporciona un valor de la función objetivo G . El valor de la probabilidad de no-cumplimiento es el cociente entre el número de simulaciones que cumplen que G es menor que cero y el número total de simulaciones. El número total de simulaciones debe ser tan elevado como sea necesario para que la probabilidad de no-cumplimiento no dependa de él.

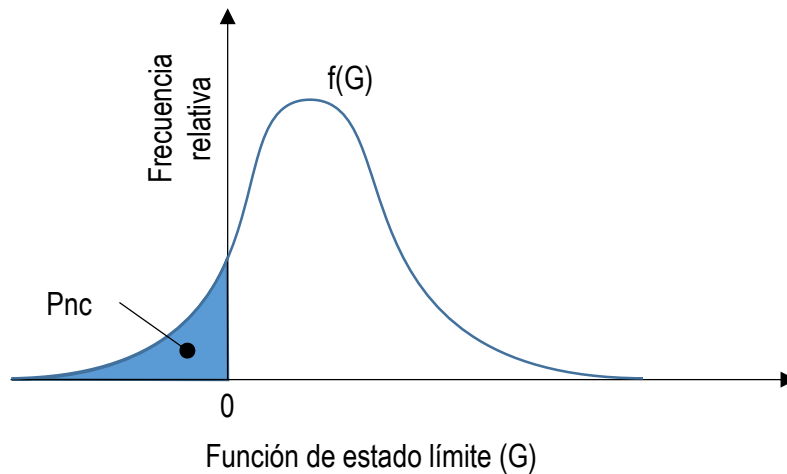


Figura 10-2. Probabilidad de no-cumplimiento

Por su parte, los métodos analíticos asumen distintas aproximaciones de la función objetivo. El método FOSM (First Order Second Moment) se basa en la aproximación de Taylor de primer grado de la función objetivo en el valor medio de los parámetros X . El método FORM (First Order reliability method) asume también la aproximación de Taylor de primer grado, pero realizada en el punto en el que la función objetivo toma un valor nulo. El objetivo de este método es encontrar el punto en el que esto sucede, y de esta forma es posible tener en cuenta variables de entrada que no son normales.

Algunos problemas no son lineales, y no pueden aproximarse de forma lineal, por lo que se emplea el método SORM (Second Order Reliability Method). Este método es igual que FORM pero realiza la aproximación de segundo grado de la función objetivo.

En general, de acuerdo a estudios anteriores (Ibrahim y Sayed, 2009), la mayor parte de problemas de ingeniería de carreteras pueden aproximarse mediante funciones lineales. No obstante, la comparación de métodos analíticos con métodos numéricos (que no asumen ningún comportamiento de la función G) se puede emplear para establecer una validación.

En este apartado se realizó un análisis de fiabilidad aplicado al problema de la determinación de los criterios de distancia de visibilidad de adelantamiento. Para ello, se definió una función objetivo para evaluar la distancia de visibilidad necesaria para adelantar. La finalidad de este análisis fue evaluar de forma objetiva los niveles de riesgo asociados a criterios normativos existentes, así como proporcionar recomendaciones para el establecimiento de nuevos criterios.

10.1.1. Función objetivo

Según la teoría del análisis de fiabilidad, la función objetivo se determinó como la diferencia entre la oferta y la demanda del sistema. En este caso, la oferta fue la distancia de visibilidad disponible en una localización determinada del trazado, y la demanda fue la distancia de visibilidad necesaria para adelantar a un vehículo de forma segura, tal como se muestra en la Ecuación 10-3.

$$G(X) = ASD(X) - PSD(X) \quad \text{Ecuación 10-3}$$

Donde:

- G es la función objetivo.
- ASD es la distancia de visibilidad disponible.
- PSD es la distancia de visibilidad de adelantamiento.

- X es un vector de parámetros de entrada relativos a conductor, vehículo, carretera y entorno.

Para el presente problema, la distancia de visibilidad disponible (*ASD*) tomó un valor constante en cada una de las evaluaciones.

Por su parte, el valor de la distancia de visibilidad de adelantamiento (*PSD*) se calculó a partir de los resultados del capítulo anterior. En él, se desarrolló un modelo probabilístico de distancia de visibilidad de adelantamiento. Según aquellos resultados, la distancia de visibilidad se componía de tres partes: la distancia recorrida por el adelantante (calculada a partir de un movimiento uniformemente acelerado hasta rebasar a un vehículo lento), la distancia recorrida en el mismo tiempo por un vehículo opuesto (a velocidad constante), y el margen de seguridad existente entre ambos al finalizar la maniobra.

Sin embargo, al calcular la probabilidad de no cumplimiento, no se tuvo en cuenta el margen de seguridad. De este modo, el valor de la función objetivo fue negativo cuando la suma de distancias recorridas por el adelantante y por el opuesto fue superior a la distancia de visibilidad disponible. Este suceso representaría idealmente una colisión frontal entre ambos.

Paralelamente, también se evaluó la fiabilidad de la distancia recorrida en el carril izquierdo, tratando de obtener un indicador de la probabilidad de rebasar una señal de prohibición de adelantamiento, por invasión del carril izquierdo más allá del comienzo de la línea continua. Para ello se empleó la ecuación de d_{13p} (Ecuación 9-14).

10.1.2. Resultados

El problema planteado fue la estimación de la probabilidad de no cumplimiento del fenómeno de la maniobra de adelantamiento en carreteras convencionales. A continuación se resumen los valores de cada una de las variables de entrada de la función objetivo, que definen un conjunto de escenarios en los que se llevó a cabo el análisis.

Tal como se muestra en la Tabla 10-1, el rango de variación de las variables de entrada trató de abarcar las mismas situaciones que las observadas en las zonas de adelantamiento del estudio de campo, teniendo en cuenta velocidades de diseño de entre 60 y 120 km/h y valores de la distancia de visibilidad disponible entre 100 y 1200 m.

Variable	Código	Unidades	Distribución	Parámetros
Distancia de visibilidad disponible	<i>ASD</i>	m	Constante	Toma valores entre 100 m y 1200 m, a intervalos de 50 m.
Longitud de la zona de adelantamiento permitido	<i>PZL</i>	m	Constante	Toma valores entre 100 y 600 m, a intervalos de 50 m.
Velocidad de diseño	<i>Vd</i>	km/h	Constante	Toma valores entre 60 y 120 km/h, a intervalos de 20 km/h.
Velocidad del vehículo adelantado	<i>Vi</i>	km/h	Normal	Ligeros: $m = 0,5907 \cdot Vd + 27,807$ SD = 15,70
				Pesados: $m = 0,4783 \cdot Vd + 27,807$ SD = 15,70
Velocidad inicial relativa del vehículo adelantante	$Vp1/Vi$	adimensional	Lognormal	m = 1,10 SD = 0,05
Tasa de aceleración	<i>a</i>	m/s ²	Lognormal	m = 0,77 SD = 0,47
Hueco adelantante- adelantado al iniciar la maniobra	<i>h1</i>	m	Lognormal	m = 9,61 SD = 5,65
Hueco adelantante- adelantado al finalizar la maniobra	<i>h3</i>	m	Lognormal	Ligeros m = 23,88 SD = 9,58
				Pesados: m = 30,00 SD = 18,60
Longitud vehículo adelantado	<i>Li</i>	m	Empírica	Ligero: (ver Figura 9-39)
				Pesado: (ver Figura 9-39)
Longitud vehículo adelantante	<i>Lp</i>	m	Empírica	Ligero: (ver Figura 9-39)
Velocidad del vehículo opuesto	<i>Vo</i>	km/h	Normal	$m = 0,6809 \cdot Vd + 27,807$ SD = 15,70

**Vd*: Velocidad de diseño, entre 60 y 120 km/h en las carreteras del ámbito de estudio

Tabla 10-1. Variables de entrada de la función objetivo y rango de variación

Debe tenerse en cuenta que para el estudio de la probabilidad de no-cumplimiento, no se consideró un margen de seguridad o hueco residual crítico. En este caso, esa variable tomó un valor igual a 0, de manera que si no se produjera el cumplimiento los vehículos colisionarían frontalmente.

Además, la estimación de la probabilidad de no-cumplimiento se realizó en distintas fases a lo largo de la maniobra: al inicio (instante $t1$), en la posición en la que la parte frontal del adelantante está a la altura de la parte trasera del adelantado (instante $t1'$) y en la posición en la que el frontal del adelantado está alineado con la parte trasera del adelantante (instante $t2'$). En la Figura 10-3 se muestran las distintas posiciones.

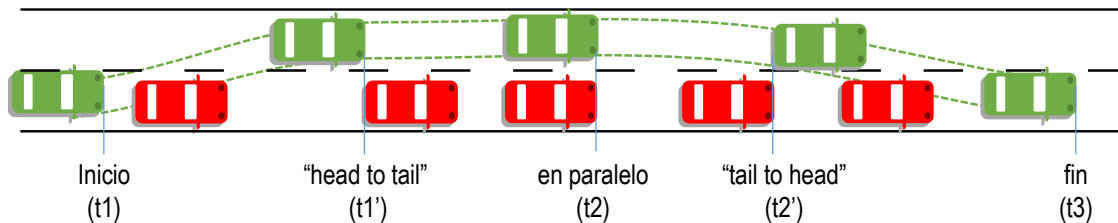


Figura 10-3. Posiciones de evaluación de la probabilidad de no-cumplimiento

A partir de las variables descritas se realizó el análisis de fiabilidad, empleando el método FORM. No obstante, con el objeto de comprobar que el método era válido, se comparó la solución del análisis en un caso concreto con el método de resolución numérico. En la Figura 10-4 se observa el resultado de la comparación. Las mayores diferencias entre ambas soluciones fueron inferiores al 5%, por lo que se pudo afirmar que los supuestos de linealidad en la función objetivo alrededor del punto de diseño ($G(X) = 0$), asumidos por el método analítico FORM, son aceptables.

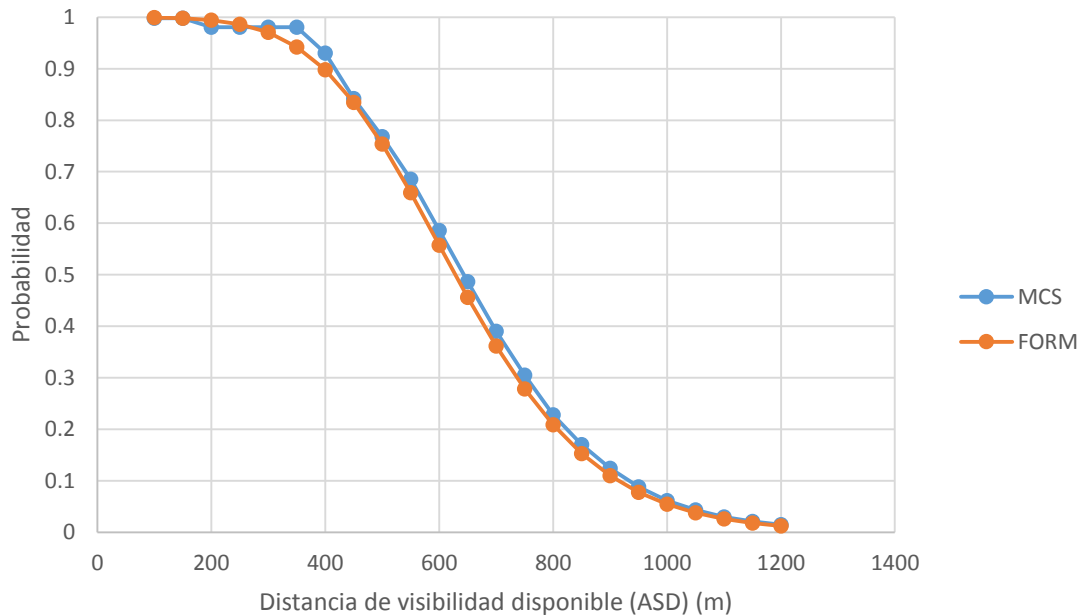
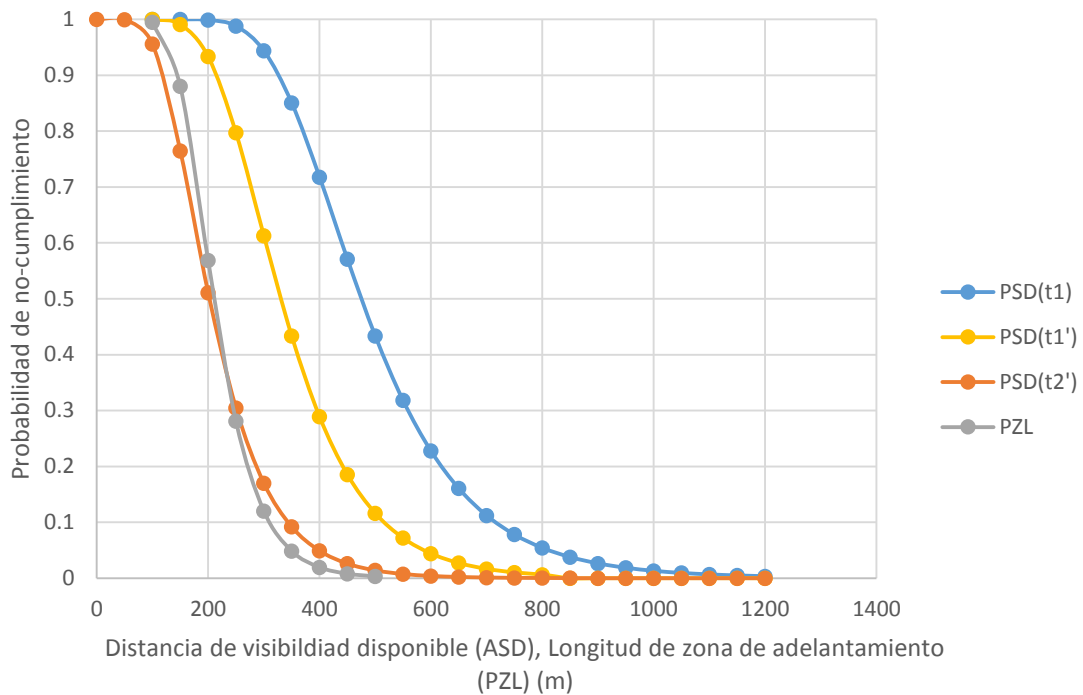


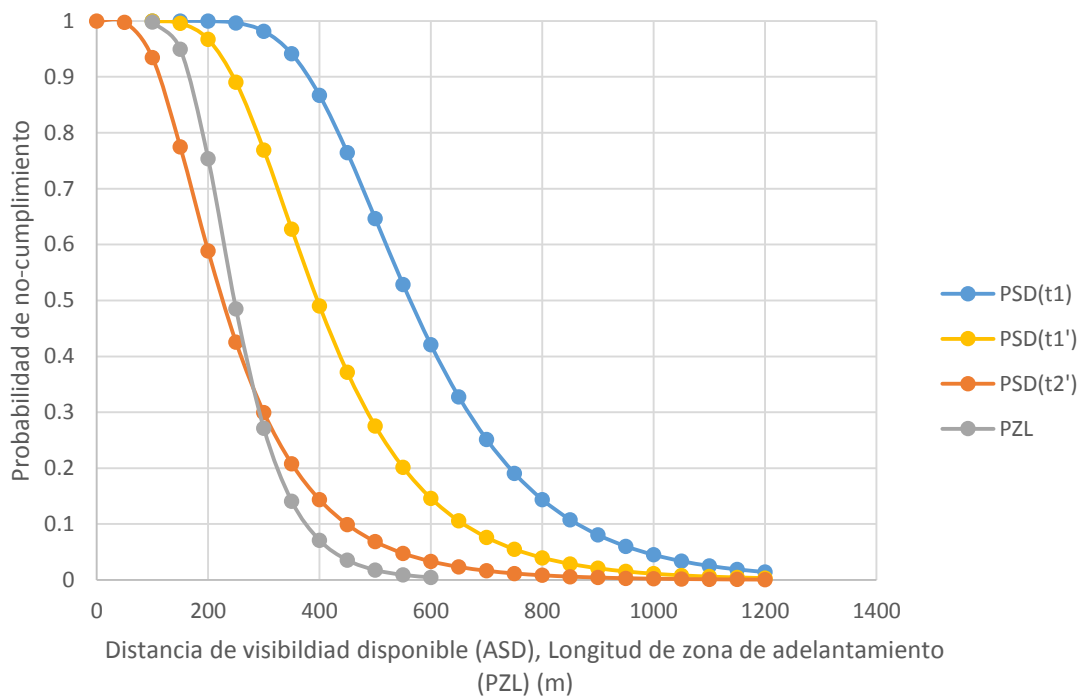
Figura 10-4. Comparación entre la solución numérica y la analítica (Caso $V_d = 100$ km/h, vehículo adelantado ligero)

Una vez escogido el método de resolución FORM, la Figura 10-5 muestra los resultados del análisis, tanto para el caso de vehículos adelantados ligeros como para el de pesados. Además, se incluyó el cálculo de la probabilidad de no-cumplimiento en diversas etapas de la maniobra, y la fiabilidad de la longitud de la zona de adelantamiento permitido. Los resultados muestran que la probabilidad de no-cumplimiento decrece con la distancia de visibilidad (o longitud de zona), y con el transcurso del tiempo de la maniobra, siendo nula en el instante final de la misma (t_3), si se hubiera calculado. En el caso de vehículos pesados, la probabilidad de no-cumplimiento fue más elevada, para un mismo valor de distancia.

En el Anexo IX se incluyen los resultados completos del análisis de fiabilidad.



(a) Vehículo adelantado ligero



(b) Vehículo adelantado pesado

Figura 10-5. Resultados del análisis de fiabilidad para $V_d = 100$ km/h

10.1.3. Aplicación a zonas de adelantamiento

El análisis del anterior apartado correspondió a la probabilidad de no-cumplimiento del fenómeno del adelantamiento, en un punto aislado de la carretera, en el que la distancia de visibilidad toma un valor fijo e igual a *ASD*. Sin embargo, sería necesario considerar como evoluciona el valor de la probabilidad de no-cumplimiento a lo largo del trazado, y más concretamente, en el interior de las zonas de adelantamiento. Para ello, se estudiará la función $pf(ASD(PK))$ a lo

largo de la zona, es decir, la evolución de la probabilidad de no-cumplimiento, que a su vez es función de la visibilidad disponible a lo largo de la zona.

Además, únicamente el valor de la probabilidad de no-cumplimiento no puede ser capaz de explicar la peligrosidad asociada al adelantamiento, por lo que debe tenerse en cuenta además, la probabilidad de que la maniobra tenga lugar, lo que guarda una estrecha relación con la probabilidad de aceptar un hueco. Para ello, se estudiará de forma análoga la función $pa(ASD(PK))$.

Con todo ello, dado que este análisis nunca se había realizado con anterioridad, se formularon diversos indicadores potenciales para estudiar la peligrosidad de una zona de adelantamiento, basados en la caracterización de la geometría de las zonas. Su relación con medidas objetivas de la accidentalidad real se realizará en el capítulo siguiente. Esto permitirá determinar si alguno de ellos tiene una correlación estadísticamente significativa, con el número de accidentes.

10.1.3.1. Indicadores de riesgo de zonas de adelantamiento

Para abordar la definición de distintos indicadores aplicables a la zona de adelantamiento, debe tenerse en cuenta el perfil de visibilidad de la misma. La Figura 10-6 muestra un ejemplo de perfil de visibilidad de una zona, que servirá para la definición de los indicadores. Se corresponde con una zona de adelantamiento recta (sin curvas ni en planta ni en alzado). En ese ejemplo, la visibilidad de la zona decrece linealmente con el PK.

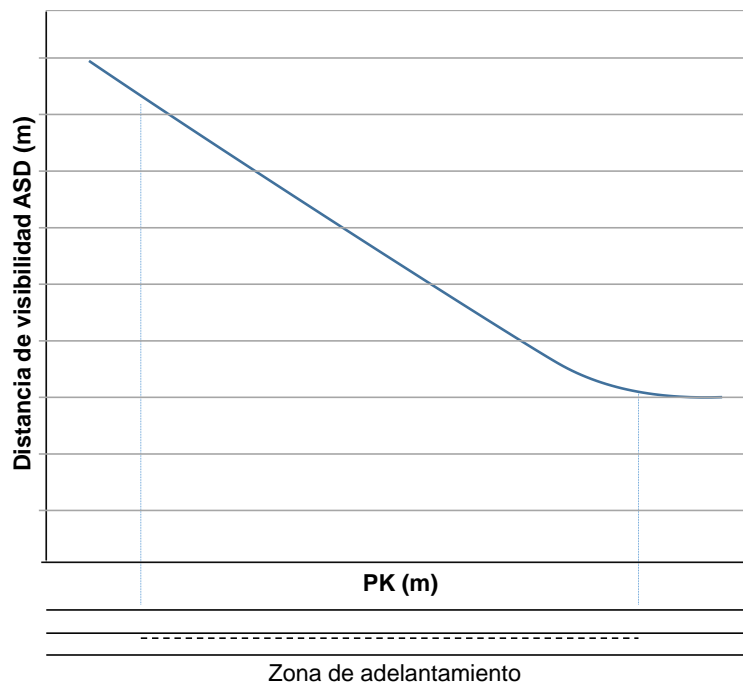


Figura 10-6. Perfil de visibilidad en una zona de adelantamiento

10.1.3.1.1. Longitud de zona

La longitud de una zona de adelantamiento constituye un primer indicador de exposición al riesgo, del mismo modo que la longitud de un tramo lo es para la exposición al riesgo de dicho tramo. Este indicador es, pues, la distancia existente entre la señal de fin de prohibición y la de prohibición de adelantamiento. Este indicador es el mismo que el empleado en el estudio de la seguridad vial de tramos de carretera, al escoger la longitud como un parámetro referente a la exposición al riesgo. Sin embargo, no todas las zonas de idéntica longitud deberían estar asociadas al mismo nivel de riesgo.

10.1.3.1.2. Probabilidad de aceptación de huecos media a lo largo de la zona (pam)

Es el promedio de la función $pa(ASD)$ a lo largo de la zona. La obtención de la probabilidad de aceptación, en función de la visibilidad disponible (en términos de hueco) se realizó empleando el modelo 1, descrito en la Sección 9.2.1.3. Si una zona tiene una visibilidad muy elevada, el indicador será muy elevado, independientemente de su longitud, resultando en una gran probabilidad de que el número de adelantamientos por unidad de longitud sea elevado.

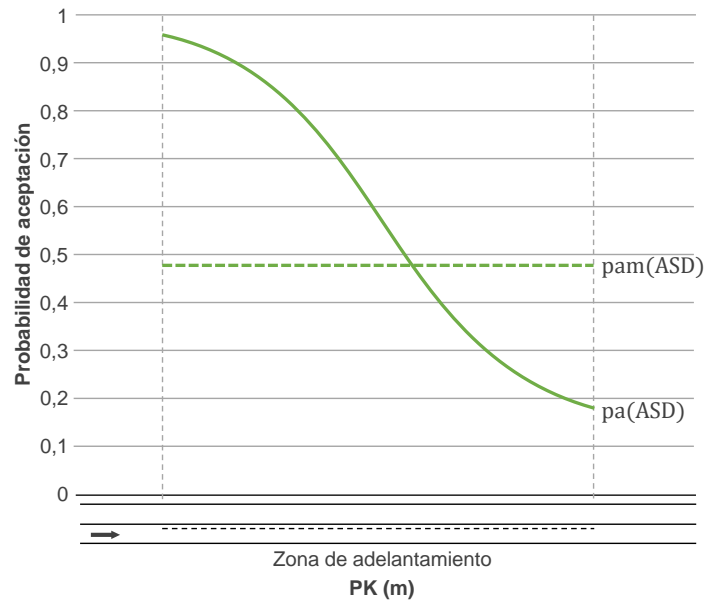


Figura 10-7. Probabilidad de aceptación media

10.1.3.1.3. Integral de la probabilidad de aceptación de huecos en la zona (pa)

Es el área comprendida bajo la curva $pa(ASD)$ dentro de la zona de adelantamiento. El valor de este indicador depende tanto de la visibilidad como de la longitud de la zona de adelantamiento. De esta forma, un valor elevado en este indicador se traducirá en un elevado número de maniobras de adelantamiento.

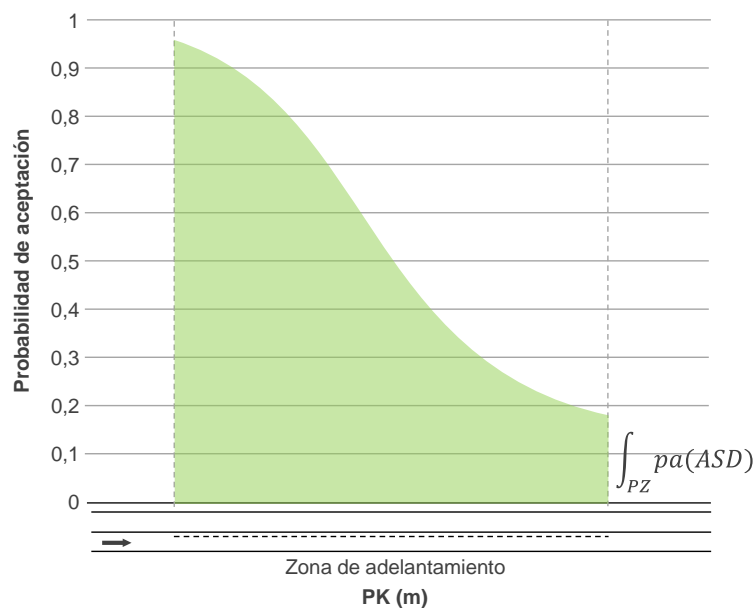


Figura 10-8. Integral de la probabilidad de aceptación

10.1.3.1.4. Probabilidad de no-cumplimiento media a lo largo de la zona (pfm)

Es el valor medio de la función $pf(ASD)$ a lo largo de la zona de adelantamiento. Si una zona dispone de muy poca visibilidad, tendrá un valor elevado de este indicador, independientemente de su longitud. Si este indicador toma un valor elevado, cabe esperar que el número de maniobras por unidad de longitud que pueden carecer de la suficiente visibilidad sea elevado.

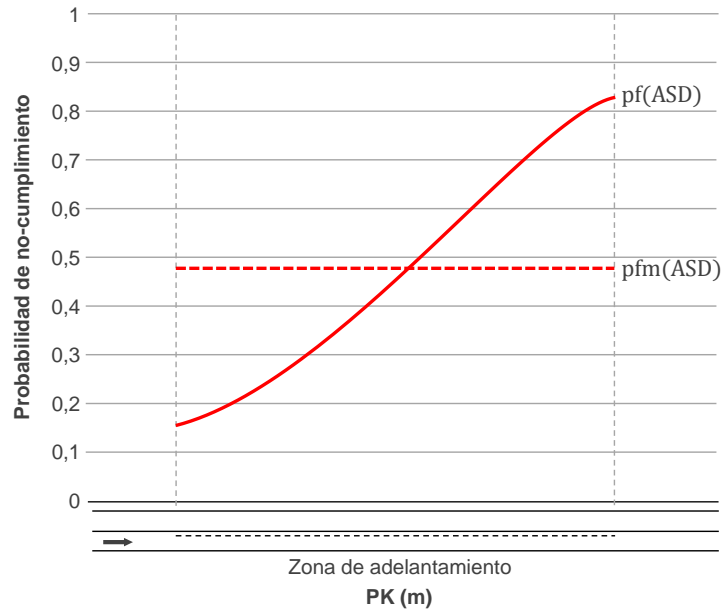


Figura 10-9. Probabilidad de no-cumplimiento media

10.1.3.1.5. Integral de la probabilidad de no-cumplimiento en la zona (pf)

Es el área comprendida bajo la curva $pf(ASD)$ dentro de la zona de adelantamiento. El valor de este indicador depende tanto de la visibilidad como de la longitud de la zona de adelantamiento. Si este indicador es elevado, el número de maniobras que pueden carecer de visibilidad suficiente será elevado.

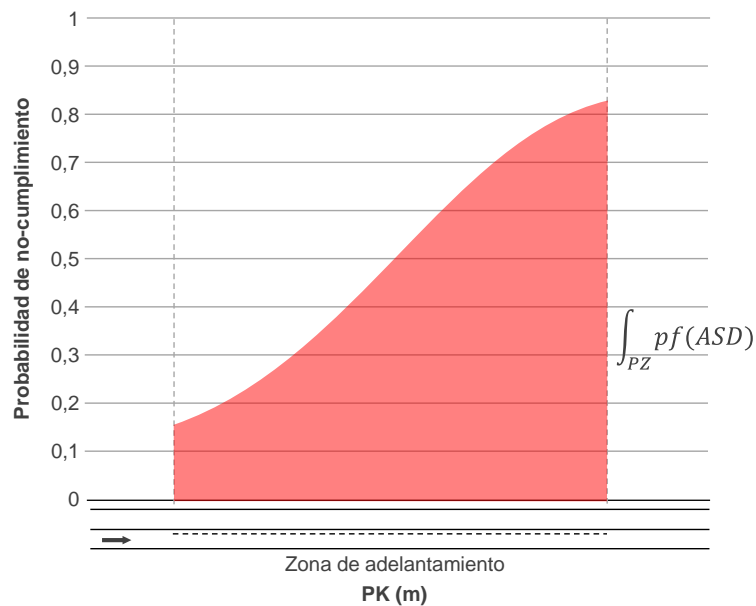


Figura 10-10. Integral de la probabilidad de no-cumplimiento

10.1.3.1.6. Producto de probabilidades medio en la zona ($pamxpf$)

Es el valor medio de los productos de las funciones $pf(ASD)$ y $pa(ASD)$ a lo largo de la zona de adelantamiento. Este producto toma valores máximos para valores intermedios de ASD , en los que tanto la probabilidad de no-cumplimiento como la de aceptación de huecos son relativamente elevadas. Para visibilidades inferiores, la probabilidad de aceptación es tan baja que el producto se hace muy pequeño; para visibilidades superiores es la probabilidad de fallo la que hace reducido este producto.

Si este indicador toma un valor elevado, la posibilidad de que se lleve a cabo una maniobra, y de que esta sea peligrosa, es elevada.

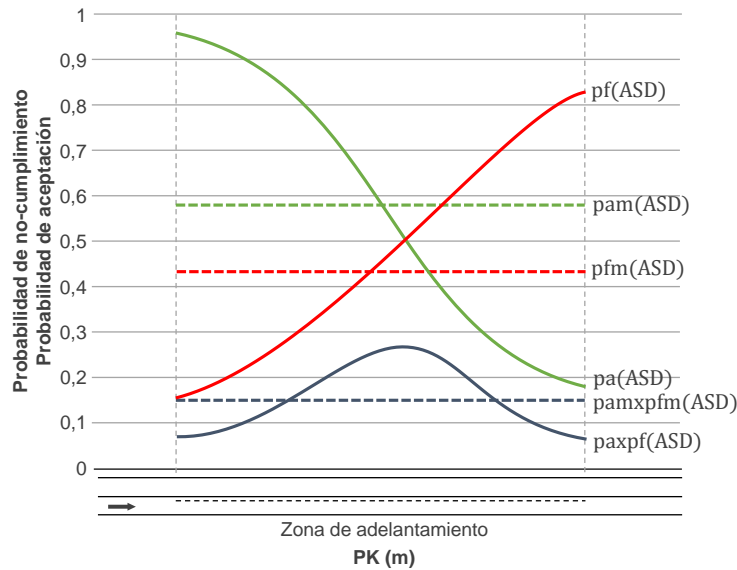


Figura 10-11. Producto de probabilidades medio

10.1.3.1.7. Integral del producto de probabilidades en la zona ($paxpf$)

Es el área comprendida bajo la curva $pa(ASD) \cdot pf(ASD)$ dentro de la zona de adelantamiento. El valor de este indicador depende tanto de la visibilidad como de la longitud de la zona de adelantamiento. Si este indicador toma un valor elevado, la frecuencia con la que se podrían llevar a cabo maniobras, y que estas sean peligrosas, es elevada.

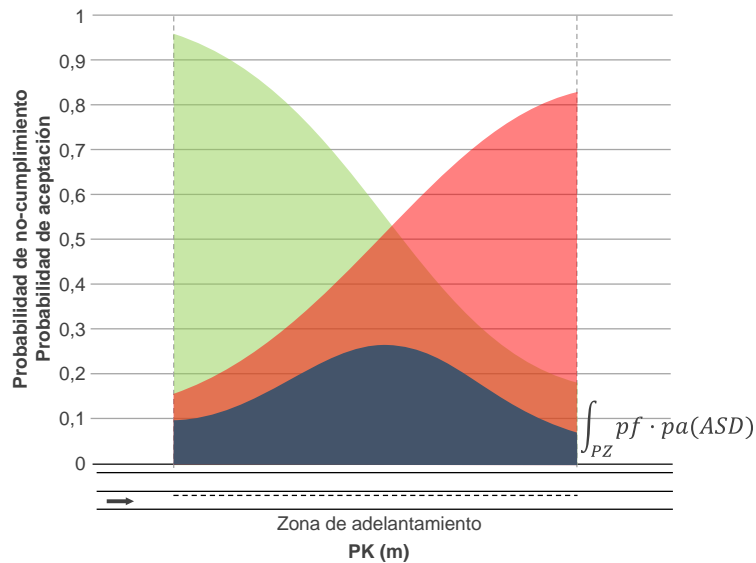


Figura 10-12. Integral del producto de probabilidades

En la sección 10.2.3.2 se estudia el efecto que estas variables tienen en la frecuencia de accidentes asociados a maniobras de adelantamiento en zonas de adelantamiento concretas.

10.2. Estudio de siniestralidad

Esta parte del estudio no se basó únicamente en los datos experimentales obtenidos mediante las metodologías desarrolladas en el presente trabajo, sino que se alimentó de una base de datos de accidentes. Se trató de un estudio de siniestralidad en tramos de toda una red de carreteras, aunque sí que se incluyeron alguno en los que se realizó la toma de datos.

10.2.1. Bases de datos

Durante la ejecución del proyecto “Desarrollo de modelos de distancias de visibilidad de adelantamiento” se tuvo acceso a la base de datos de accidentes de las carreteras de la red de la Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente de la Generalitat Valenciana. Esta base de datos contiene un total de 30429 accidentes, entre los años 1993 y 2011. La red de carreteras que abarca se compone de 403 tramos homogéneos de carreteras con una extensión de 986 km. Del total de registros de la base de datos, 29621 tuvieron lugar en zonas interurbanas y 23.163 de ellos en carretera convencional.

Cada uno de los accidentes que aparece registrado contiene los campos mostrados en la Tabla 10-2.

Campo	Descripción
Localización espacial	Carretera y PK donde se produjo el accidente.
Localización temporal	Hora, día, mes y año en el que se produjo el accidente.
Luminosidad	Condiciones de iluminación a la hora del accidente: día, noche, crepúsculo.
Factores Atmosféricos	Condiciones meteorológicas en el momento del accidente: buen tiempo. mal tiempo: granizo, lluvia, niebla, viento, otros.
Características	Características geométricas del lugar donde se produjo el accidente: intersección, curva, recta.
Causa	Causas del accidente: adelantamiento, atropello, estado de la vía, divergencia, infracción de la norma, cambio de carril, inherente al vehículo, meteorología, maniobra incorrecta, violación de la prioridad, obstáculo en calzada, velocidad excesiva o inadecuada, no especificada.
Consecuencia	Tipología del accidente: alcance, atropello, colisión con obstáculo, frontal, fronto-lateral, lateral, salida de vía, vuelco en calzada, no definida.
Otras Circunstancias	Otras circunstancias específicas no contempladas en el resto de campos: badén, bache, cambio de rasante, estrechamiento, fin de carril lento, escalón, descenso fuerte, firme deslizante, inundación, obras, paso a nivel.
ACV	Indica si el accidente tuvo como consecuencia una víctima (herido o muerto).
L	Número de heridos leves.
G	Número de heridos graves.
M	Número de muertos.
Comentarios	Comentarios adicionales que aclaran las circunstancias del accidente.

Tabla 10-2. Campos de la base de datos de accidentes

A partir de los datos contenidos en los campos comentarios y causa principal, se ha añadido un nuevo campo, que indicaba si el accidente se relacionaba, o no, con la maniobra de adelantamiento.

10.2.2. Análisis descriptivo

Este análisis describe las características de los accidentes de la base de datos, que tuvieron lugar en carretera convencional. En todos los apartados del análisis se distinguió entre accidentes debidos a adelantamiento y accidentes debidos a otras causas.

10.2.2.1. Características generales

Esta sección comprende el análisis de los factores de accidentalidad no relacionados con la distribución temporal o espacial.

10.2.2.1.1. Iluminación

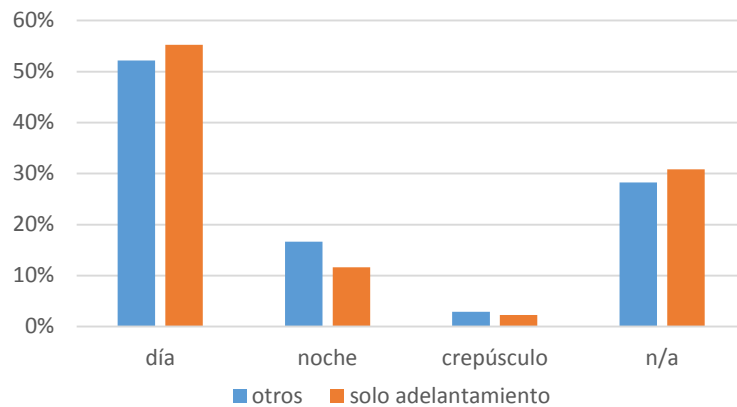


Figura 10-13. Efecto de las condiciones de iluminación en la siniestralidad

La Figura 10-13 muestra la influencia de las condiciones de iluminación en el número total de accidentes. Se puede apreciar que en los accidentes debidos a adelantamiento, las condiciones diurnas suponen una mayor frecuencia, observando lo contrario en condiciones nocturnas.

10.2.2.1.2. Meteorología

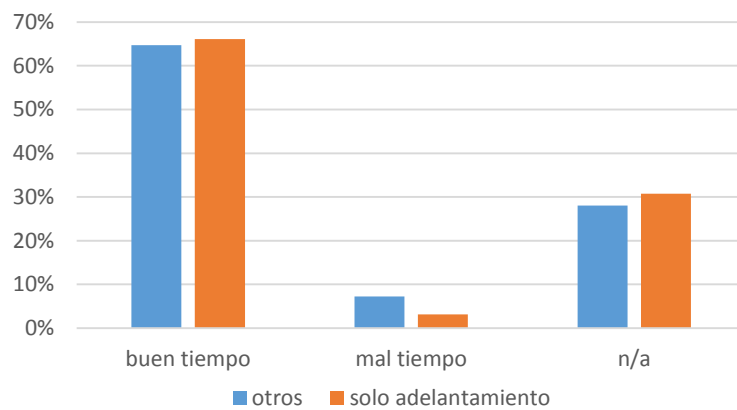


Figura 10-14. Efecto de la meteorología en la siniestralidad

Según la Figura 10-14, las buenas condiciones meteorológicas son ligeramente más frecuentes en los accidentes debidos a adelantamiento que en el resto, lo contrario ocurre con los accidentes que tienen lugar con condiciones adversas.

10.2.2.1.3. Características de la vía

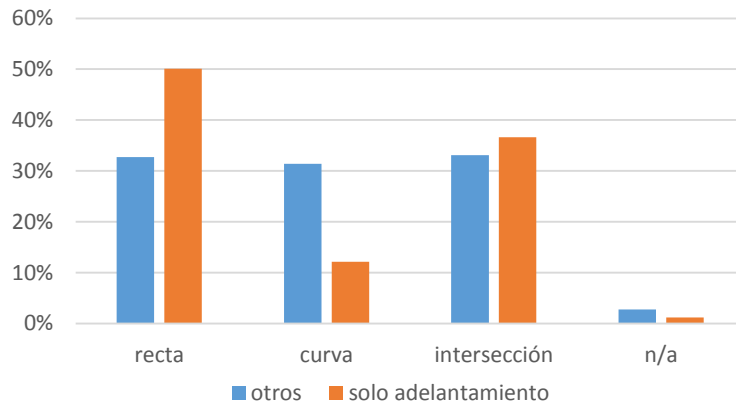


Figura 10-15. Características del trazado de la carretera en el punto del accidente

La Figura 10-15 muestra que los accidentes debidos a adelantamientos suelen tener lugar en rectas (en las que se puede adelantar) y rara vez en curvas (en las que es menos frecuente poder adelantar). Resulta significativo el alto porcentaje de accidentes debidos a adelantamiento en las intersecciones. Este hecho se corresponde con el resultado del análisis de causas de accidentes asociados a adelantamiento que se verá a continuación.

10.2.2.1.4. Causa principal

Del total de accidentes contenidos en la base de datos (23.163 en carretera convencional), un total de 1.180 se debieron al adelantamiento, lo que representa un 5 % de los mismos.

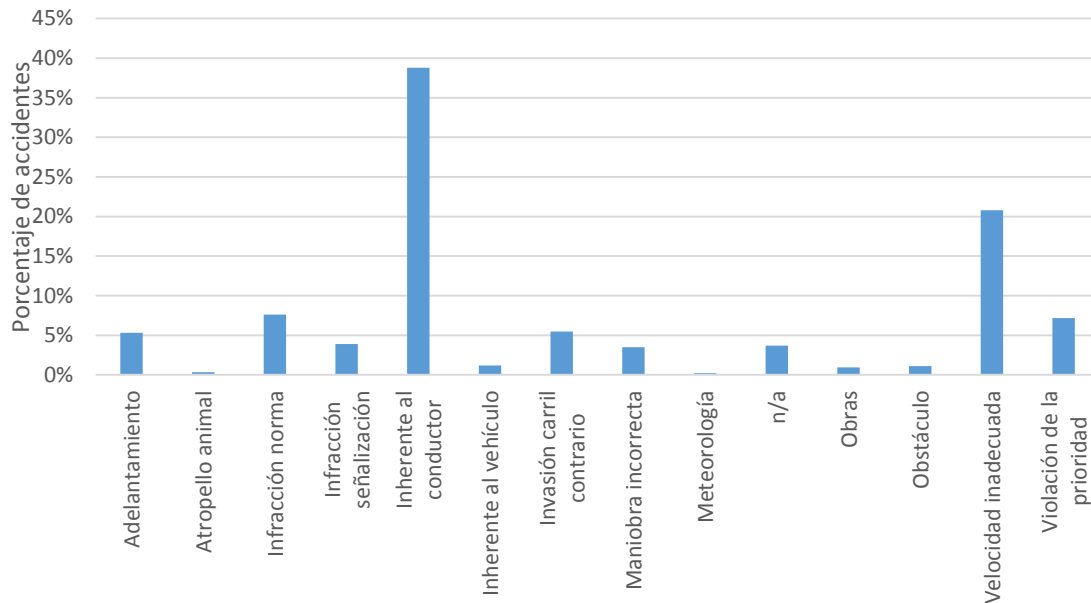


Figura 10-16. Causas de accidentes

La Figura 10-16 muestra las causas de accidentes en carretera convencional, de acuerdo a los campos de la base de datos. El adelantamiento representa un 5% de la siniestralidad, siendo las causas más frecuentes la velocidad inadecuada (22%) o las causas inherentes al conductor (39%).

Dentro de los accidentes debidos a adelantamientos, se estudiaron las posibles causas, a partir de los comentarios incluidos en la base de datos. Para ello se han definido las siguientes causas detalladas, a partir de la investigación de Clarke et al. (1998) y de la propia base de datos.

Causa detallada	Frecuencia absoluta	Porcentaje
No especificada o ausencia de datos suficientes.	203	17%
Definida en la base de datos como "desconocida".	382	33%
El adelantado realiza un giro izquierda en intersección mientras es adelantado.	251	21%
El adelantante colisiona con un vehículo que salía de un acceso.	8	1%
El adelantante realiza un giro derecha tras adelantar.	2	0%
El adelantante colisiona con el adelantado al regresar al carril propio.	9	1%
"Undertaking": la colisión se produce cuando un vehículo intenta adelantar por la derecha.	7	1%
Raspado negativo: colisión lateral con un vehículo en el mismo sentido.	67	6%
Pérdida de control del adelantado.	2	0%
Maniobra evasiva del opuesto que acaba en salida de vía o pérdida de control.	12	1%
Colisión frontal adelantante-opuesto.	80	7%
Colisión fronto-lateral adelantante-opuesto.	20	2%
Raspado positivo: colisión lateral con un vehículo sentido opuesto.	15	1%
Pérdida control después de adelantar.	14	1%
Pérdida control durante el adelantamiento.	38	3%
Colisión durante una maniobra múltiple (varios adelantados o adelantantes).	12	1%
Maniobra evasiva del adelantado o adelante que acaba con salida de vía o pérdida de control.	6	1%
Colisión por alcance.	27	2%
Atropello durante un adelantamiento.	9	1%
Colisión lateral.	16	1%
Total	1180	100%

Tabla 10-3. Causas detalladas de accidentes debidos a adelantamiento

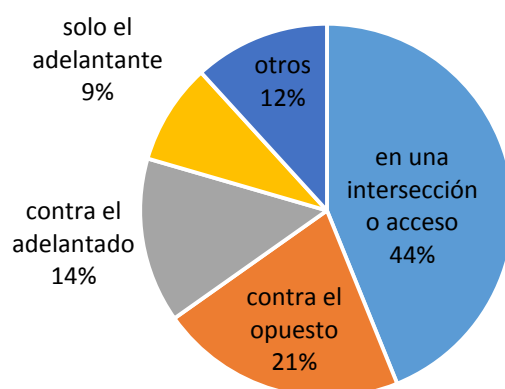


Figura 10-17. Resumen de causas detalladas de accidentes debidos a adelantamiento

La Figura 10-17 resume la importancia relativa de las causas detalladas, habiéndolas agrupado en las siguientes causas básicas:

- En una intersección o acceso.

- Colisión contra el vehículo opuesto.
- Colisión contra el vehículo adelantado.
- Accidente afectado solo por el adelantante.
- Otras causas.

El conjunto de accidentes en los que no se ha podido determinar las causas concretas no se incluyeron en la Figura 10-17.

10.2.2.1.5. Tipología de la colisión

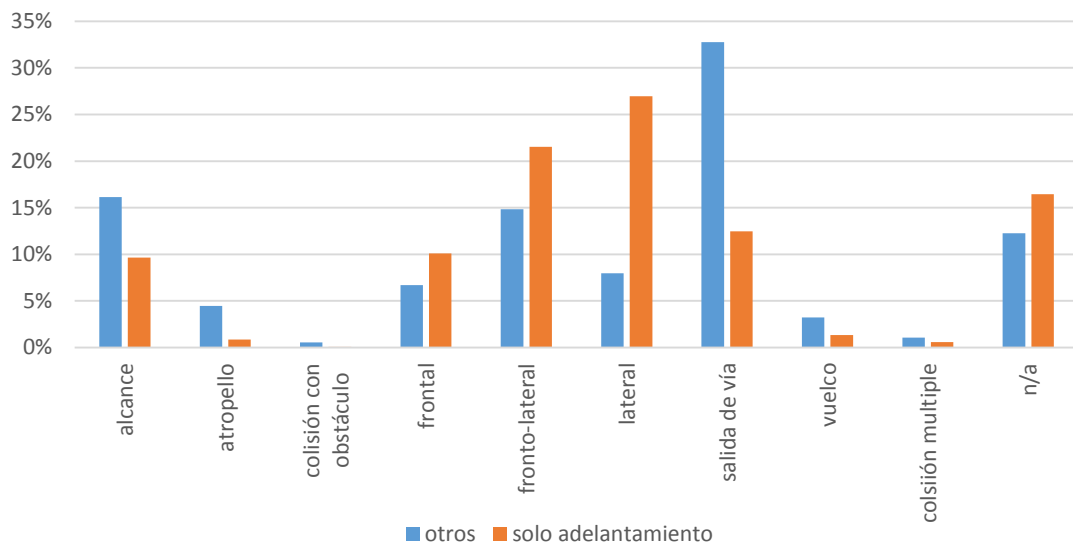


Figura 10-18. Tipologías de accidente

La Figura 10-18 resume las tipologías de accidente en carretera convencional. La tipología frontal, la fronto-lateral y la lateral están sobrerrepresentadas en los accidentes debidos a adelantamientos; lo contrario sucede en las tipologías de alcance y salida de vía.

10.2.2.2. Gravedad

En la base de datos disponible, los accidentes debidos a adelantamiento (1180, de los cuales 802 fueron accidentes con víctimas) tuvieron como consecuencia 64 muertos, 501 heridos leves y 875 heridos graves.

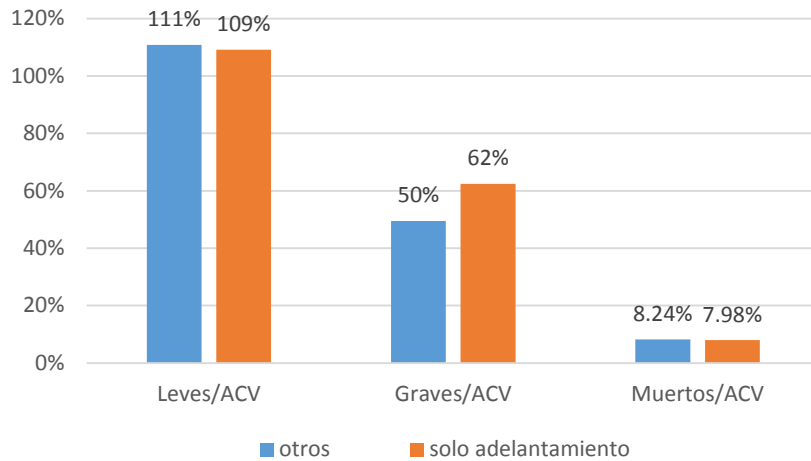


Figura 10-19. Gravedad de accidentes

En cuanto a la gravedad de los accidentes, el número de heridos leves y el de muertos no varía significativamente entre accidentes asociados a adelantamientos y el resto de accidentes. Sin embargo, el número de heridos graves por cada 100 accidentes con víctimas es un 12% superior en los accidentes debidos a adelantamientos.

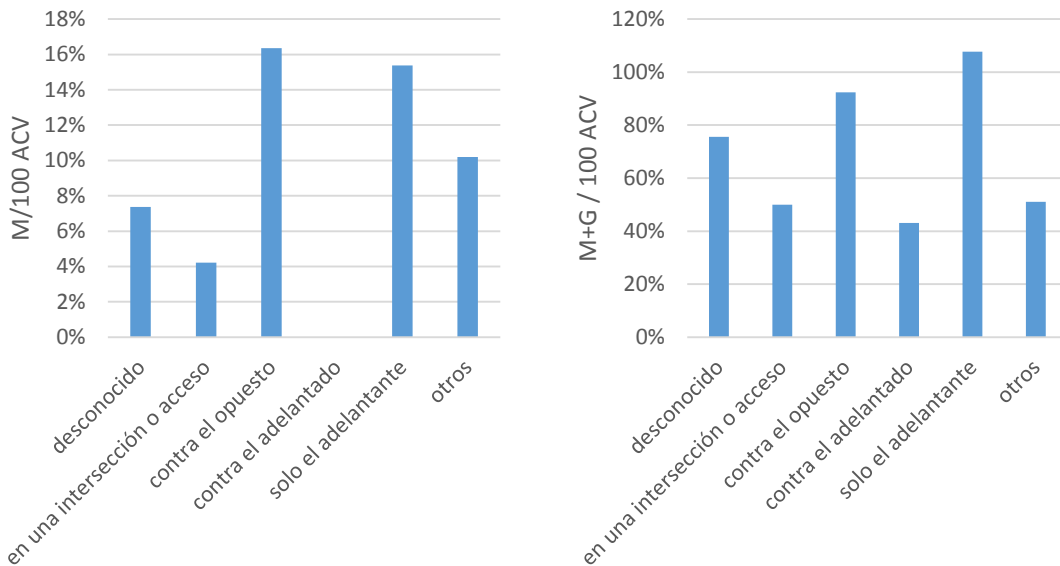


Figura 10-20. Gravedad de accidentes según causas concretas asociadas a adelantamiento

La Figura 10-20 resume la gravedad de los accidentes asociados a adelantamientos, en función de las distintas causas concretas del accidente. De este modo, los accidentes más graves son los debidos a colisiones con el opuesto o pérdida de control del adelantante (mortalidad de más del 15 % y más de 80 muertes o heridos graves por cada 100 accidentes con víctimas).

10.2.3. Modelización

La naturaleza de los accidentes de tráfico requiere de la utilización de modelos específicos para el análisis estadístico de los distintos factores. Los accidentes de tráfico son sucesos raros, siendo

la frecuencia de accidentes muy baja, estando sobrerrepresentado el valor cero. Además, son discretos, es decir, que el número de accidentes solo puede tomar valores enteros positivos. Por último, los accidentes son enormemente aleatorios.

Estas características impiden el empleo de modelos de regresión clásicos, que generalmente asumen que el error respecto al valor medio estimado se ajusta mediante una distribución normal.

En su defecto, la distribución del número de accidentes se ajusta mejor a funciones de tipo poisson, cuando la media es igual a la desviación típica, o binomial negativa, en el caso de no se verifique la anterior condición.

Los estudios de siniestralidad se han realizado, recientemente, empleando modelos de regresión de poisson o binomial negativa, conocidos como funciones de estimación de la seguridad vial (safety performance functions). Estas funciones se emplean para estimar el valor medio de la frecuencia de accidentes en el periodo considerado.

La forma habitual de este tipo de modelos es la mostrada en la Ecuación 10-4. En el caso de elementos puntuales, como intersecciones, no se incluiría el término de L^{β_2} .

$$Y = e^{\beta_0} \cdot IMD^{\beta_1} \cdot L^{\beta_2} \cdot e^{(\sum \beta_i X_i)} \quad \text{Ecuación 10-4}$$

donde:

- Y es la frecuencia de accidentes.
- IMD es la intensidad media de circulación, en veh/día.
- L es la longitud del tramo.
- X_i es un factor de la geometría o entorno de la vía.
- β_i son coeficientes.

10.2.3.1. Tramos

La estimación de la seguridad vial en tramos de carretera se realizó mediante la calibración de una función para cada tipología de accidente, dentro de las siguientes:

- Todos los accidentes con víctimas (Y)
- Accidentes con víctimas debidos a adelantamientos (Y_a)
- Accidentes con víctimas debidos a adelantamiento, excluyendo aquellos que tienen lugar en intersecciones o accesos y que se relacionan con la entrada o salida de la vía de uno de los vehículos accidentados (Y_{a2})

La muestra abarca 204 tramos de carretera convencional. Las características de los accidentes estudiados son las que se muestran en la Tabla 10-4, durante el periodo de 13 años disponible en la base de datos analizada. La lista de tramos se detalla en el Anexo X.

Variable		Mínimo	Media	Máximo	Desviación estándar	Frecuencia
Longitud L (km)		0,2	8,5	34,0	5,8	204
IMD (veh)		88	3.858	14.839	3.635	
Y	Accidentes	0	27,5	189	31,0	
	Muertos	0	2,2	20	3,2	
	Heridos Graves	0	11,6	85	13,4	
	Heridos Leves	0	31,3	264	40,2	
Ya	Accidentes	0	1,5	11	2,1	
	Muertos	0	0,1	2	0,4	
	Heridos Graves	0	0,8	11	1,6	
	Heridos Leves	0	1,6	14	2,7	
Ya2	Accidentes	0	1,0	8	1,6	
	Muertos	0	0,1	2	0,3	
	Heridos Graves	0	0,6	11	1,3	
	Heridos Leves	0	1,1	10	2,0	

Tabla 10-4. Características de los tramos estudiados

A continuación se resumen los coeficientes de cada uno de los modelos planteados, indicando la significancia estadística de cada una de las variables independientes. La estimación de los modelos de regresión se ha realizado en el software R, empleando un método de máxima verosimilitud. En cada caso, se escogió el mejor modelo, entre las distribuciones para el término de error del tipo binomial negativa (NB) o poisson, en función de la sobredispersión existente en los datos.

Variable	Y		Ya		Ya2	
	Coeficiente	Significancia	Coeficiente	Significancia	Coeficiente	Significancia
intercept	-5,0590	***	-10,0572	***	-10.2581	***
AADT	0,7784	***	1,0502	***	0.9983	***
L	1,0593	***	0,9585	***	1.0966	***
Parámetros del modelo						
Tipo	NB		Poisson		Poisson	
Parámetro de sobredispersión	2,846		-		-	
AIC	1547		543		457	
null.dev.	668		544		418	
res.dev.	241		246		211	
per.dev.	64%		55%		49%	
Niveles de significancia: 0 '***' 0.001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 '.' 1						

Tabla 10-5. Estimación de SPF para tramos de carretera convencional

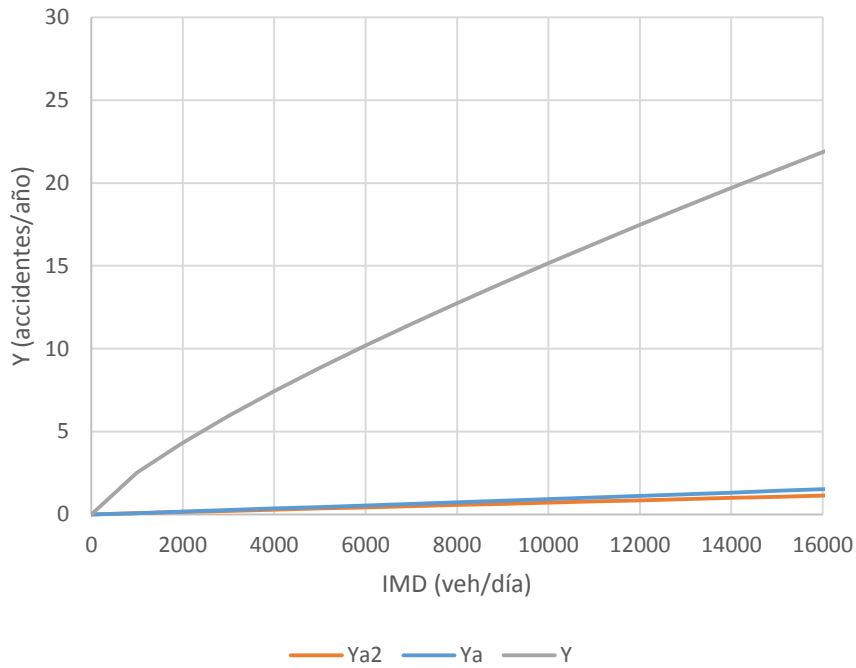


Figura 10-21. Frecuencia de accidentes esperada en el tramo (L = 20 km) (Periodo 1 año)

En la Figura 10-21 se observa el valor esperado de accidentes (en un periodo de un año), tanto para el total de accidentes con víctimas como para los asociados a adelantamientos, y a adelantamientos excluyendo las tipologías relacionadas con intersecciones o accesos. En la Figura 10-22, de forma más visible, aparece el porcentaje de accidentes con víctimas en adelantamientos respecto del total de accidentes con víctimas. Este porcentaje aumenta conforme lo hace el volumen de tráfico, siendo muy reducido para *IMD* próximas a 1000 veh/día y aumentando cada vez a un menor ritmo. Por su parte, este porcentaje disminuye conforme se incrementa la longitud del tramo.

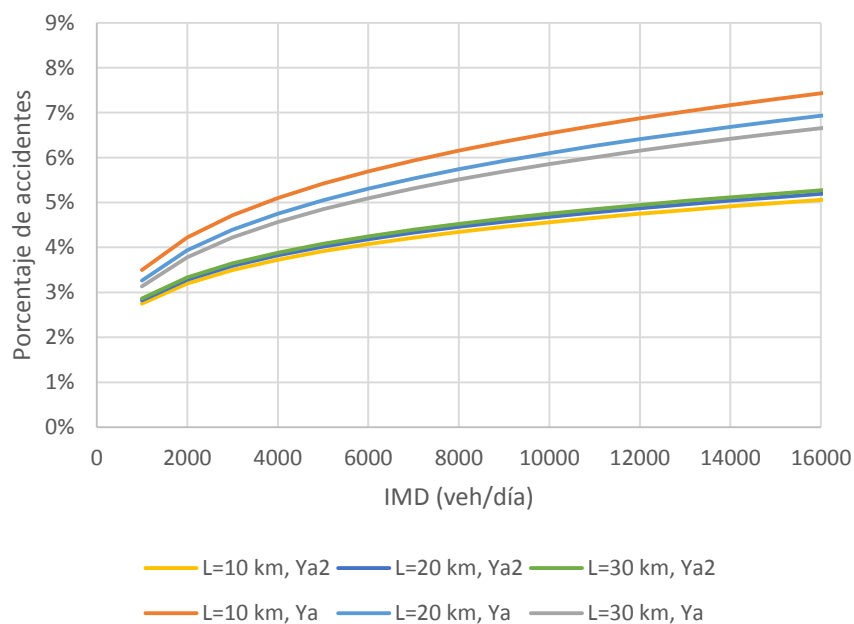


Figura 10-22. Porcentaje de accidentes esperado (debido a adelantamiento y debido a adelantamiento excluyendo los asociados a intersecciones o accesos)

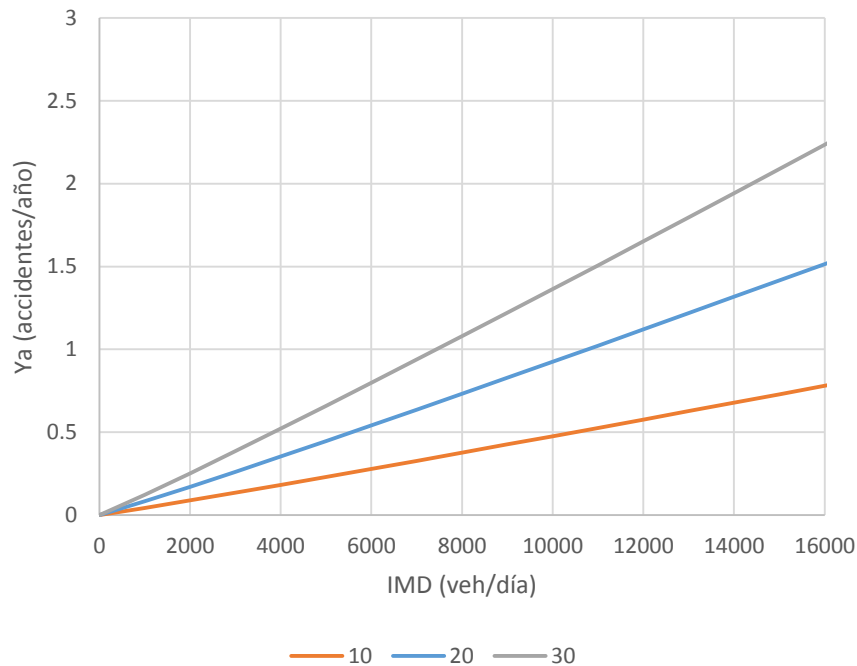


Figura 10-23. Influencia de la longitud del tramo (en km) en la frecuencia esperada de accidentes debidos a adelantamiento

En la Figura 10-23, por su parte, se muestra la variación del número de accidentes esperado en función tanto de la *IMD* como de la longitud del tramo. En el rango de valores mostrado, el aumento de accidentes con la *IMD* y con la longitud del tramo es prácticamente lineal.

10.2.3.2. Zonas de adelantamiento

Con el objeto de caracterizar los factores relacionados con la geometría de la carretera que tienen una influencia significativa en la siniestralidad, se repitió el análisis, pero considerando, en este caso, una muestra de 69 parejas de zonas de adelantamiento. Estas 69 parejas de zonas son el resultado de agrupar 138 zonas de adelantamiento en los dos sentidos de circulación, en 69 parejas de zona de adelantamiento. La razón de esta agrupación es la imposibilidad de asociar los accidentes registrados a un sentido de circulación concreto y debido a la propia interacción entre sentidos que tiene lugar en carreteras convencionales.

Por este motivo, cada una de las variables asociadas a una pareja de zonas de adelantamiento será la media de cada una de las zonas correspondientes a un sentido. Cabe mencionar que la inmensa mayoría de zonas de adelantamiento observadas y caracterizadas fueron prácticamente simétricas, y se encontraban desplazadas entre sí alrededor de 200 m.

Con todo ello, se han calibrado funciones de estimación de la seguridad vial para estimar el número de accidentes con víctimas y el número de accidentes con víctimas debidos a adelantamiento excluyendo los asociados con intersecciones y accesos.

La Tabla 10-6 resume las características de las zonas de adelantamiento. Además de la longitud de la zona y de la *IMD* del tramo en el que se sitúa, se ha estudiado la influencia de los siguientes factores, que han sido caracterizados para cada una de las 69 parejas de zonas de adelantamiento:

- Porcentaje de zonas de adelantamiento permitido en la totalidad del tramo homogéneo (%ZA).
- Existencia de accesos a zonas colindantes o de intersecciones dentro de la zona de adelantamiento (*Acceso*).
- Existencia de curvas en planta (*Curva*).
- Sección transversal ancha (con arcenes) o estrecha (sin arcenes) (*Sección*).
- Integral de la probabilidad de aceptación, pa (como se definió previamente).
- Probabilidad de aceptación de huecos media, pam (como se definió previamente).
- Integral de la probabilidad de no cumplimiento, pf (como se definió previamente).
- Probabilidad de no-cumplimiento media, pfm (como se definió previamente).
- Integral del producto de probabilidades, $paxpf$ (como se definió previamente).
- Producto de probabilidades medio, $pamxpfm$ (como se definió previamente).

Los valores de las variables pf , pa , pfm , pam , $paxpf$ y $pamxpfm$ se basaron en los resultados del análisis de fiabilidad. Teniendo en cuenta que no se conocen las velocidades de operación en flujo libre, ni las velocidades de los vehículos adelantados en cada una de las 138 zonas, se emplearon condiciones medias, es decir, aquellas en las que la velocidad de diseño tomaría el valor de 90 km/h. De esta forma, se trató de minimizar el posible error, sabiendo que la influencia relativa de la velocidad es muy reducida, comparada con la de la visibilidad disponible, variable que sí fue caracterizada de forma individual en todas las zonas de adelantamiento.

En concreto, la visibilidad disponible se analizó de forma individualizada empleando imágenes de fotografía aérea, apoyadas de imágenes de la herramienta Street View de Google. La lista de zonas se detalla en el Anexo XI.

(a) Variables continuas					
Variable	Mínimo	Media	Máximo	Desviación estándar	Frecuencia
Y	0	5.1	24	5,0	138
Ya	0	0.5	4	0,8	
$Ya2$	0	0.4	4	0,7	
%ZA en tramo	28%	49%	66%	9%	
PZL (m)	140	452	1250	256	
IMD (veh/d)	992	8412	16714	4885	
pa	32,5	157,5	649,5	2,54	
pam	0,16	0,28	0,57	0,08	
pf	146,5	265,0	811,0	2,49	
pfm	0,00	0,56	0,99	0,23	
$paxpf$	30,0	58,5	169,5	0,50	
$pamxpfm$	0,01	0,03	0,08	0,01	
(b) Variables discretas					
Variable	Porcentajes del total				Frecuencia
<i>Acceso</i>	89% con accesos a propiedades colindantes				138
<i>Curva</i>	87% en recta				
<i>Sección</i>	81% con arcén				

Tabla 10-6. Características de las zonas de adelantamiento estudiadas

A continuación se resumen los coeficientes de cada uno de los modelos planteados, indicando la significancia estadística de cada uno de las variables independientes. La estimación de los

modelos de regresión se ha realizado en el software R, empleando un método de máxima verosimilitud. En cada caso, se ha escogido el mejor modelo, entre las distribuciones para el término de error del tipo binomial negativa o poisson, en función de la sobredispersión existente en los datos.

Variable	<i>pzl</i>	<i>pa</i>	<i>pam</i>	<i>pf</i>	<i>pfm</i>	<i>pamxpfm</i>	<i>paxpf</i>
Intercept	-6,1037***	-5,6849***	-5,4879***	-5,4594***	-3,5215**	-4,5444***	-5,7561***
<i>log(IMD)</i>	0,7878***	0,7591***	0,6521***	0,7601***	0,6513***	0,7065***	0,7736***
<i>PZL</i>	0,0014***						
<i>pa</i>		0,0028***					
<i>pam</i>			4,1992***				
<i>pf</i>				0,0008			
<i>pfm</i>					0,6513**		
<i>pamxpfm</i>						-1,2402	
<i>paxpf</i>							0,0076*
Tipo	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
Niveles de significancia: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 ' ' 0,1 ' ' 1							
NB: Binomial negativa							

Tabla 10-7. Coeficientes de SPF para accidentes con víctimas en zonas de adelantamiento

	<i>pzl</i>	<i>pa</i>	<i>pam</i>	<i>pf</i>	<i>pfm</i>	<i>pamxpfm</i>	<i>paxpf</i>
Intercept	-9,0386**	-8,2116**	-7,7405**	-8,1886**	-6,6710*	-8,2015**	-8,3236**
<i>log(IMD)</i>	0,7904*	0,7569*	0,7056*	0,7076*	0,6956*	0,7795*	0,6906*
<i>PZL</i>	0,0017**						
<i>pa</i>		0,0021					
<i>pam</i>			1,2697				
<i>pf</i>				0,0028**			
<i>pfm</i>					-1,1854		
<i>pamxpfm</i>						1,1450	
<i>paxpf</i>							0,0167***
Tipo	Poisson	Poisson	Poisson	Poisson	Poisson	Poisson	Poisson
Niveles de significancia: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 ' ' 0,1 ' ' 1							

Tabla 10-8. Coeficientes de SPF para accidentes con víctimas en zonas de adelantamiento, debidos a adelantamientos y no relacionados con intersecciones

Una vez obtenidos los coeficientes de los distintos modelos, la Tabla 10-9 resume los parámetros del ajuste de los modelos. Igualmente, la Figura 10-24 y la Figura 10-25 resumen la misma información de forma gráfica. Estos resultados muestran que, para la estimación del conjunto global de accidentes fue suficientemente adecuado utilizar la longitud de la zona de adelantamiento, mientras que para la estimación de los accidentes asociados a adelantamientos (excluyendo los relacionados con intersecciones y accesos), la introducción de los parámetros relacionados tanto con la probabilidad de aceptación como con la probabilidad de no-cumplimiento consiguieron mejorar de forma estadísticamente significativa la precisión.

De esta forma, en el primer caso (totalidad de accidentes) se observa que los mejores modelos son los de *PZL*, *pa* y *pam*, acercándose al 40% de desviación explicada. Por el contrario, al explicar los accidentes debidos a adelantamientos, los mejores modelos fueron los que incluían *PZL* y *pf*, pero sobretudo el modelo que incluye la integral del producto de *paxpf*. Esta variable consiguió explicar el 23% de la desviación y su efecto fue estadísticamente más significativo que el de la

propia longitud. La variable *pamxpfm* no fue significativa. En general, dado que las variables promedio no incluyen información sobre el valor de la longitud de la zona, su efecto es menos significativo.

Modelo	AIC		Res.dev.		Perc.dev.		Significancia	
	Y	Ya2	Y	Ya2	Y	Ya2	Y	Ya2
<i>PZL</i>	392,95	115,98	86,241	62,873	39%	19%	***	**
<i>pa</i>	389,89	120,37	87,521	67,261	42%	13%	***	.
<i>pam</i>	392,19	122,69	89,626	69,586	40%	10%	***	
<i>pf</i>	407,23	116,27	87,396	63,166	28%	18%		**
<i>pfm</i>	398,56	121,30	89,413	68,190	35%	12%	**	
<i>paxpf</i>	404,81	113,15	86,455	60,040	30%	23%	*	***
<i>pamxpfm</i>	405,93	122,24	88,916	69,132	30%	11%		

Nivel de significancia: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 '' 1

Tabla 10-9. Ajuste de las SPF en función de las distintas variables características de la geometría de las zonas

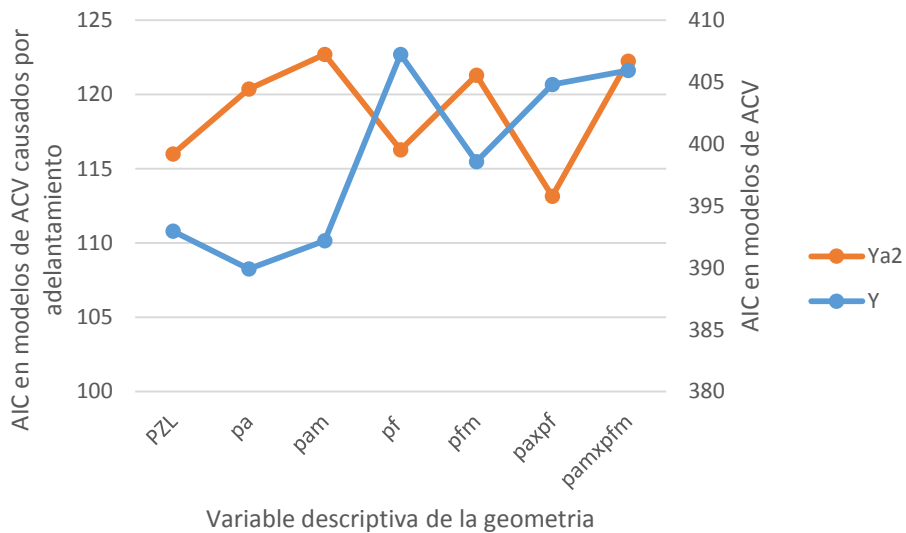


Figura 10-24. AIC en las distintas SPF para zonas de adelantamiento

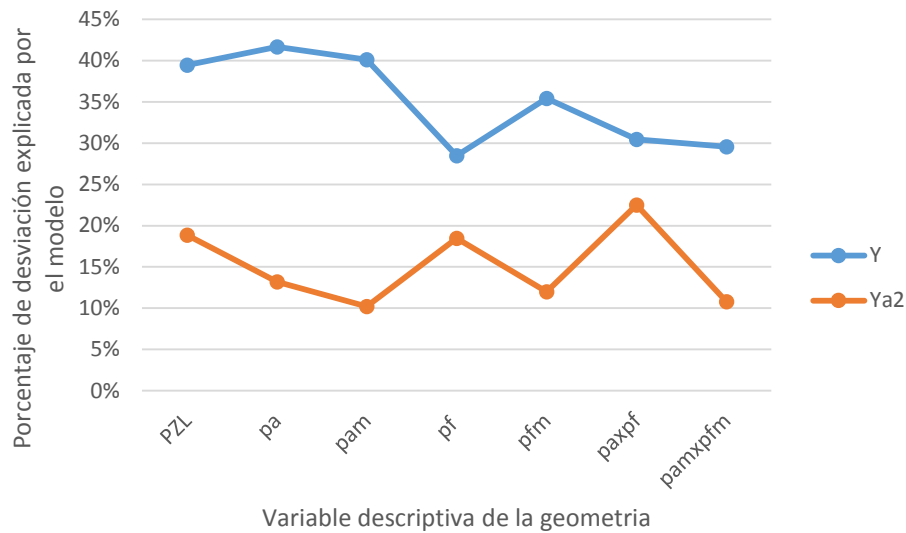


Figura 10-25. Porcentaje de desviación explicada por cada una de las SPF para zonas de adelantamiento

10.2.3.2.1. Interpretación

Para interpretar los resultados, se realizó la estimación de accidentes debidos a adelantamiento en dos zonas ficticias de adelantamiento de igual longitud, cuyo perfil de visibilidad era decreciente (en el tipo 1), siendo esto lo habitual en zonas rectas, y constante (en el tipo 2), siendo este el perfil habitual en zonas de adelantamiento en el interior de curvas amplias y largas. Los perfiles de visibilidad aparecen en la Figura 10-26. Mediante el procedimiento explicado, la integral del producto de probabilidad de no-cumplimiento y probabilidad de aceptación tomó valores de 0,97 en el tipo 1 y de 2,79 en el tipo 2.

En base a los datos disponibles de 138 zonas de adelantamiento, los modelos propuestos han permitido concluir que la visibilidad tiene un efecto en la accidentalidad. De considerar el modelo que únicamente incluye la longitud de la zona, no es posible apreciar el efecto de distintas formas del perfil de visibilidad. Sin embargo, a partir de los valores de probabilidad de aceptación y de probabilidad de no-cumplimiento, ambos basados en observaciones experimentales, es posible concluir que algunas características geométricas son distintas entre ambas zonas. La Figura 10-27 muestra los resultados de la estimación del promedio de accidentes debidos a adelantamiento (excluyendo los ocurridos en relación a intersecciones o accesos). Según la función calibrada, en la zona de tipo 2 cabe esperar un mayor número de accidentes debidos a adelantamiento que en el tipo 1. De considerar únicamente el valor de la longitud de la zona, obtendríamos un valor intermedio, no pudiendo recoger las diferencias existentes entre distintas geometrías de zona.

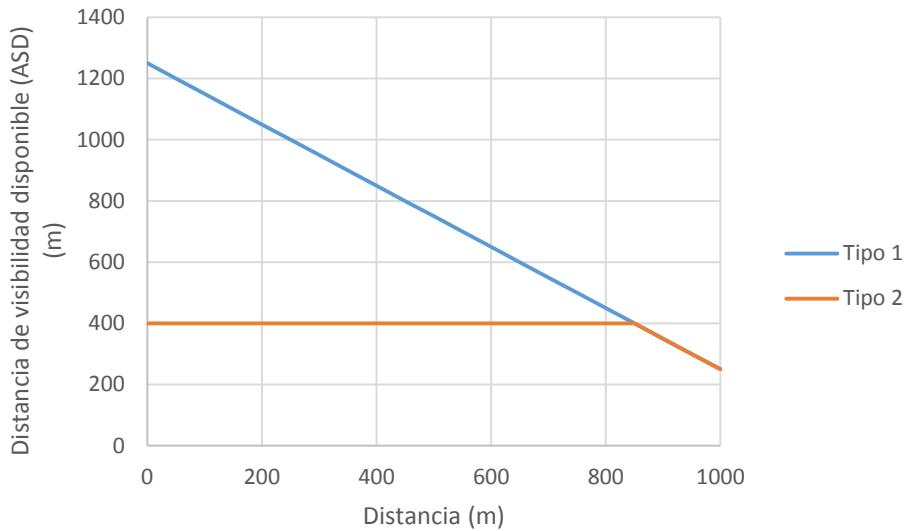


Figura 10-26. Visibilidad disponible en distintas geometrías de zona de adelantamiento

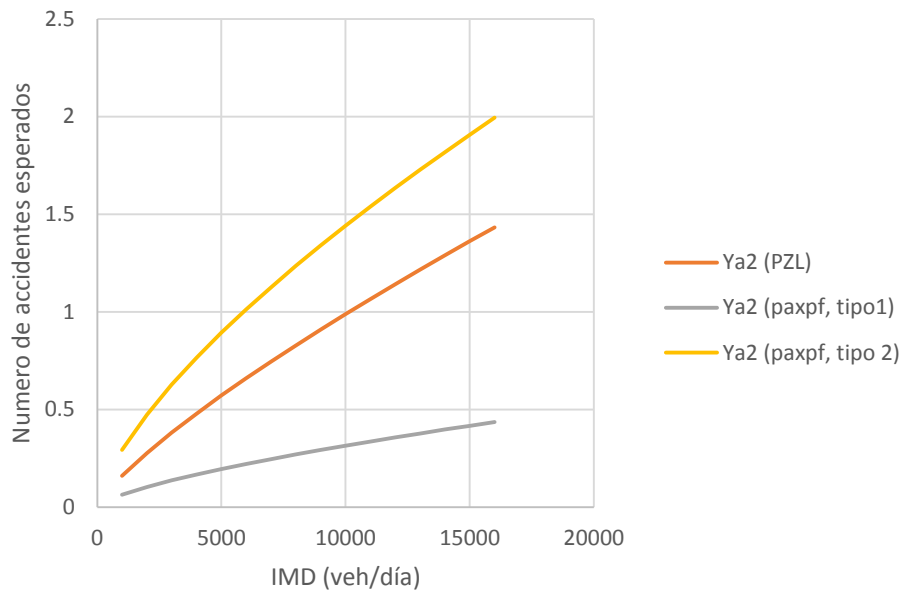


Figura 10-27. Estimación del número de accidentes debidos a adelantamiento en zona de adelantamiento

10.3. Conclusiones del análisis de seguridad vial

El análisis de fiabilidad permitió evaluar el nivel de riesgo asociado a la maniobra de adelantamiento, a partir de las observaciones realizadas en el estudio. En este punto, niveles altos de riesgo no implicaban necesariamente que la accidentalidad sea elevada, pero sí permitieron dar una estimación de la potencial peligrosidad de los valores asociados a los criterios de señalización y diseño de zonas de adelantamiento.

El análisis se basó en la definición de una función objetivo, a partir de los modelos de adelantamiento previamente calibrados. La función toma valores positivos si existe suficiente visibilidad para adelantar, y toma valores negativos cuando la distancia de visibilidad necesaria es superior a la disponible.

Con todo ello, se asoció un valor de probabilidad de no-cumplimiento a cada valor de distancia de visibilidad disponible. Además, otros factores como la velocidad de diseño y el tipo de vehículo adelantado modificaron la probabilidad de no-cumplimiento.

Combinando estos resultados con la probabilidad de que un conductor decida adelantar, e integrándolos a lo largo de las zonas de adelantamiento, se han definido varios indicadores para caracterizar el nivel de riesgo asociado al adelantamiento en una zona individual. Posteriormente, estos indicadores se compararían con datos objetivos de siniestralidad, con el objeto de establecer una correlación entre ambos.

Este estudio de siniestralidad ha analizado una base de datos de más de 23000 accidentes en 403 tramos de carretera convencional en un periodo de 13 años. El primer paso fue la identificación de los accidentes relacionados con maniobras de adelantamiento, para lo cual se revisaron cada uno de los campos de la base de datos, llegando a obtener una muestra de 1180 accidentes causados por esta maniobra, representando aproximadamente el 5% del total de accidentes en dichos tramos.

Posteriormente, se analizaron los factores concurrentes en los tipos de accidente asociados o no a la maniobra de adelantamiento. En este sentido, las frecuencias relativas de accidentes en horario diurno, en elementos rectos y con tipologías de tipo frontal, fronto-lateral y lateral, son más elevadas que en el resto de accidentes. Esto define de forma aproximada una serie de condiciones cuya representación es más elevada, en términos relativos, en los accidentes asociados a adelantamiento.

La naturaleza del accidente debido a adelantamiento puede ser muy diversa y no solo se centra en la colisión frontal con el opuesto. En la muestra analizada, de hecho, esta tipología solo representó el 21% de los casos. Las tipologías de accidente más habituales fueron las derivadas de vehículos saliendo o entrando por una intersección o acceso en el momento del adelantamiento (44%), las colisiones con el adelantado (14%) y las pérdidas de control del adelantante (9%).

En cuanto a la gravedad de los accidentes, los debidos a adelantamiento no presentan valores distintos de mortalidad que la media global de accidentes, si bien el número de heridos graves por cada 100 accidentes con víctimas sí que fue un 10% superior. Dentro de las tipologías habituales para accidentes debidos a adelantamiento, las que presentan más gravedad son las relacionadas por colisión con el vehículo opuesto y por pérdida de control del vehículo que adelanta.

Por último se analizó la influencia de la exposición al riesgo, por medio de la longitud del segmento de estudio y de la *IMD* del mismo. Este análisis se realizó empleando funciones de estimación de la seguridad vial. En un primer nivel, se realizó una estimación de accidentes para tramos de carretera convencional, basada en datos de 204 tramos y 13 años. Los resultados mostraron que la proporción de accidentes debidos a adelantamiento se sitúa, de media, en torno al 3 y el 8%, siendo este porcentaje creciente con el volumen de tráfico medio. Excluyendo los accidentes en a intersecciones o accesos, este porcentaje se mueve entre el 3 y el 5%.

A continuación se llevó a cabo un estudio más pormenorizado en 138 zonas de adelantamiento escogidas aleatoriamente dentro del conjunto de 204 tramos. Esta muestra contiene localizaciones potencialmente seguras y potencialmente peligrosas. En cada zona, se analizó el perfil de visibilidad existente, caracterizando tanto su longitud como la probabilidad de aceptar huecos y la probabilidad de no-cumplimiento calculadas tal como se explicó en el análisis de fiabilidad. Estos factores se incluyeron en análisis de regresión para estimar las funciones de estimación de

la seguridad que mejor explicaban la frecuencia media de accidentes en zonas de adelantamiento. Se observó que un valor elevado de la integral del producto de la probabilidad de aceptación de huecos por la probabilidad de no-cumplimiento extendida a lo largo de las zonas de adelantamiento conduce a valores más elevados de la frecuencia esperable de accidentes relacionados con maniobras de adelantamiento (pero este efecto no fue significativo para el total de accidentes). Estas características se asocian con geometrías de zonas de adelantamiento con valores de visibilidad próximos a aquellos en los que el citado producto de probabilidades es máximo, que además son mantenidos a lo largo de toda la longitud en la que el adelantamiento está permitido. Generalmente, estas condiciones se dan cuando existen curvas en planta o en alzado dentro de las zonas de adelantamiento.

11. Discusión

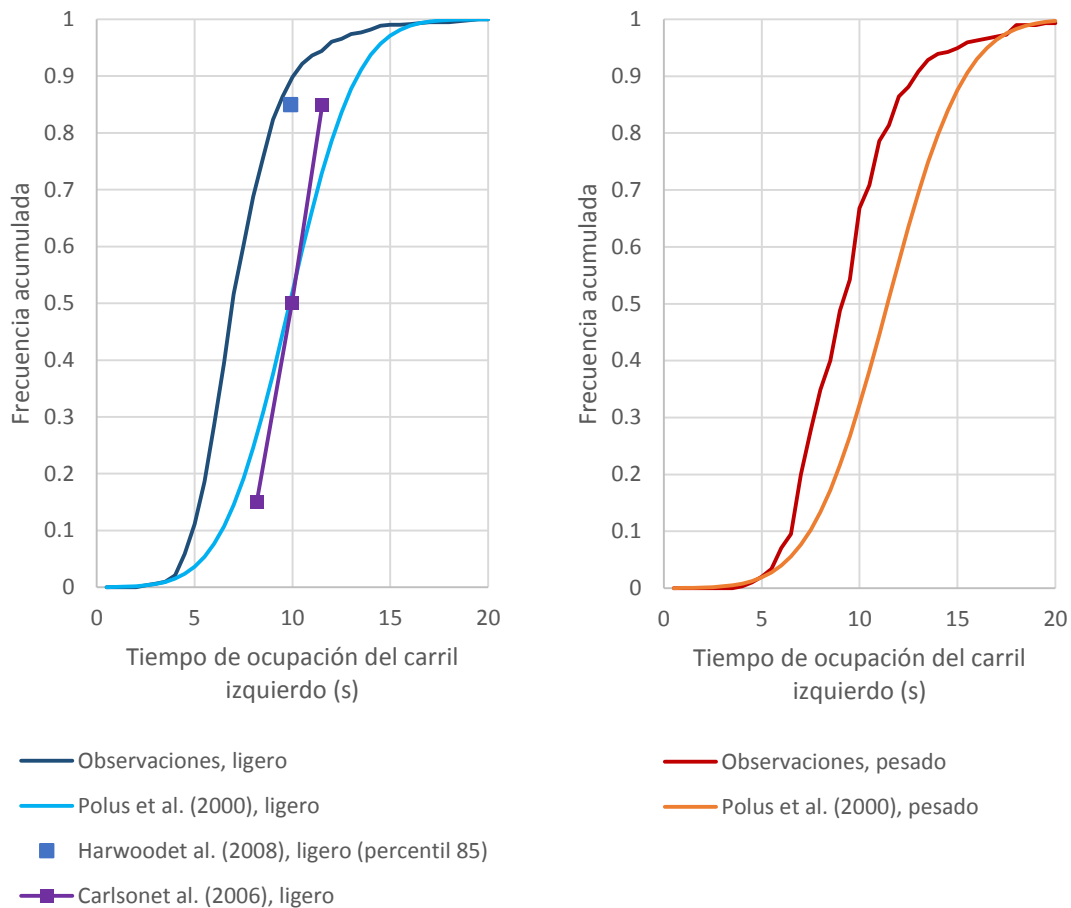
En esta sección se comparan los principales resultados del análisis con otras investigaciones previas realizadas por otros autores. La sección se dividió en varios apartados, cada uno de ellos relacionado con las secciones anteriores del análisis. El análisis de los criterios de diseño geométrico y de señalización se incluye más adelantante, dada su importancia, como un apartado de aplicación práctica de los resultados de la tesis.

11.1. Observaciones

Los datos caracterizados por este estudio no son, en principio, comparables directamente con los resultados de otros estudios de campo, puesto que fueron tomados en localizaciones distintas, y cabe esperar una amplia dispersión entre ellas. No obstante, este apartado va a realizar una comparación entre los estudios experimentales más recientes.

La principal variable que describe la trayectoria del vehículo adelantante es el tiempo de ocupación del carril izquierdo, que ha sido medido en todos los estudios experimentales analizados. En la Figura 11-1 se comparan, tanto en adelantamientos de vehículos ligeros a ligeros como a pesados, los tiempos de ocupación del carril izquierdo. En general, los valores del presente estudio son inferiores, como así muestra la distribución de frecuencias acumuladas. El valor propuesto por Harwood et al. (2008) para el percentil 85 se ajusta muy bien a los datos medidos, mientras que las distribuciones obtenidas por Polus et al. (2000) caracterizan maniobras de bastante más duración, tanto en ligeros como en pesados. Los valores medidos por Carlson et al. (2006) también son alrededor de 2 s más elevados.

En general, ninguno de estos estudios detectó un efecto significativo de la velocidad, ya sea del adelantante, o del adelantado, en el tiempo de ocupación del carril izquierdo, que se mantiene invariable (con una dispersión bastante elevada) para distintos niveles de velocidad, siempre que el vehículo adelantado sea de similares características.



(a) ligeros (b) pesados
 Figura 11-1. Comparación de tiempos de ocupación del carril izquierdo en estudios experimentales

En cuanto a la distancia recorrida en el carril izquierdo, mostrada en la Figura 11-2, se observan resultados similares, si bien las diferencias entre el presente estudio y el de Polus et al. (2000) se reducen, especialmente para vehículos pesados.

Por último, las dos anteriores variables están relacionadas entre sí por la velocidad relativa media del vehículo adelantante respecto del adelantado, que se muestra en la Figura 11-3. Como es lógico, los estudios de Polus et al. (2000) proporcionaron valores de esta diferencia de velocidades inferiores a los del presente estudio. Por el contrario, los estudios de Carlson et al. (2006) y de Harwood et al. (2008) se acercan a los datos obtenidos en esta investigación, al obtener valores medios cercanos a 19 km/h, en el caso de vehículos adelantados ligeros, que fue el único que trataron.

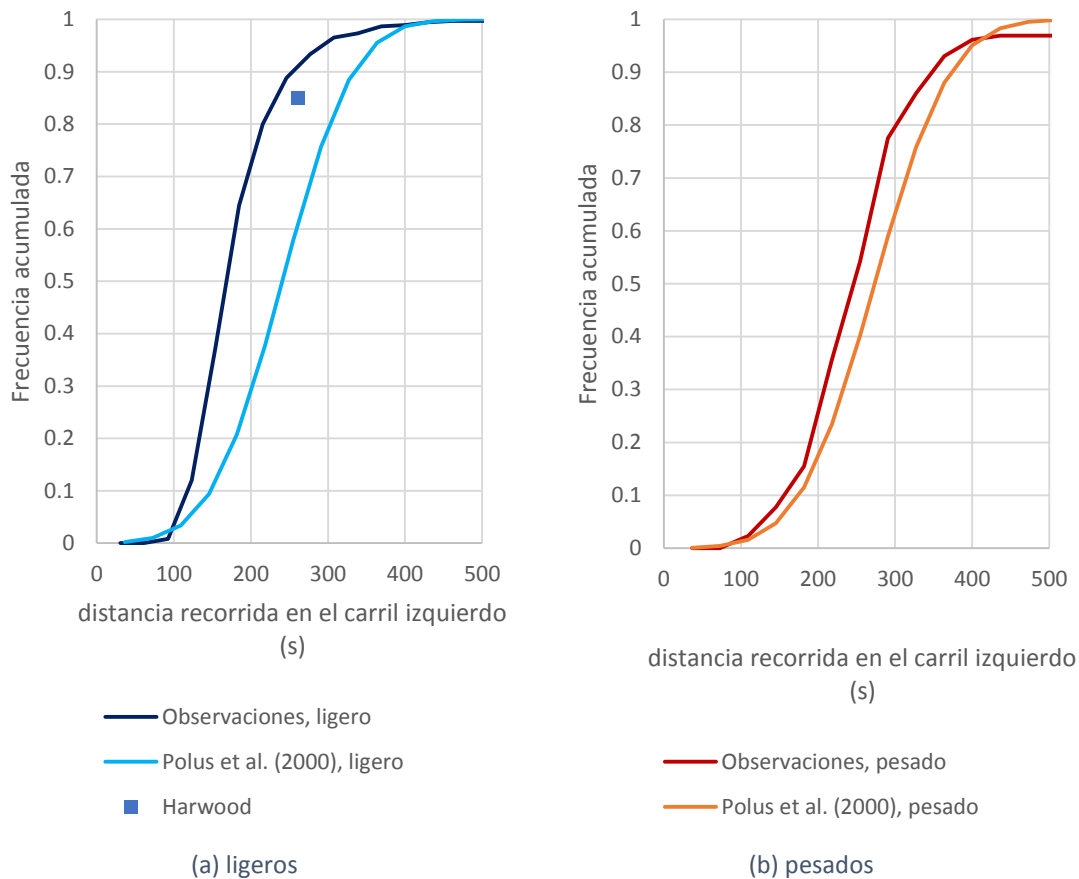
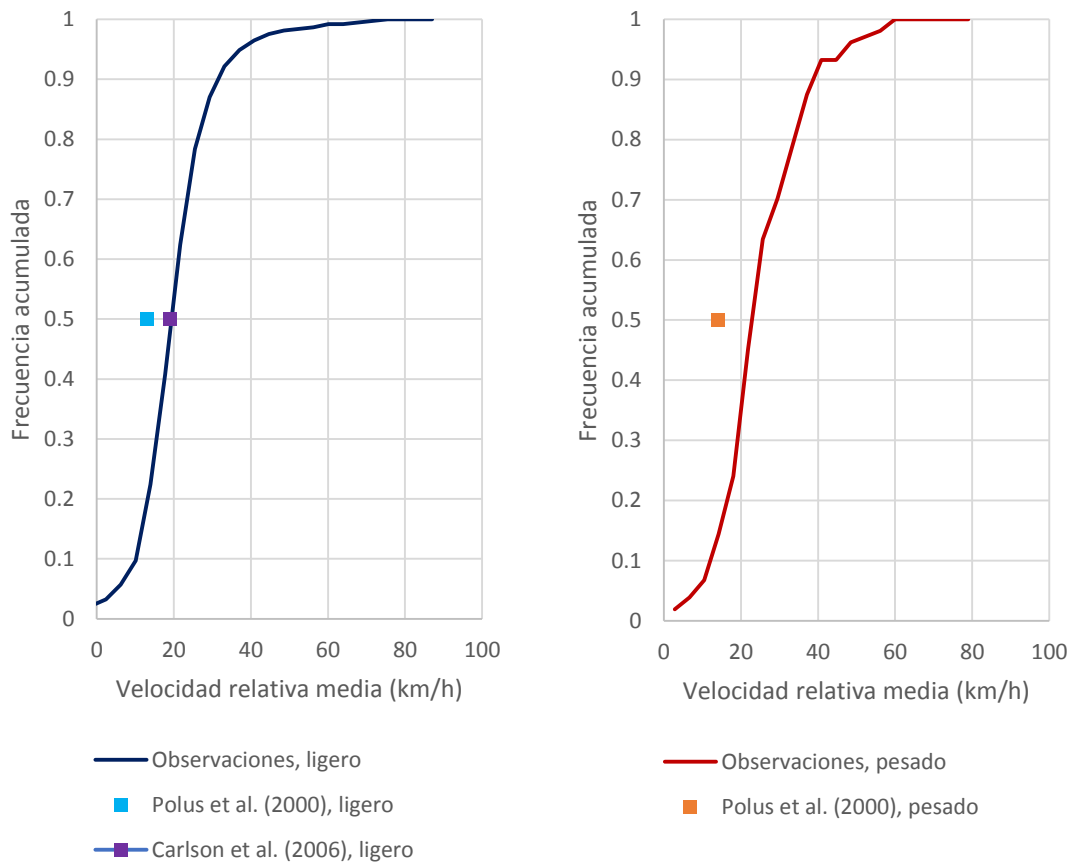


Figura 11-2. Comparación de distancias recorridas en el carril izquierdo en estudios experimentales

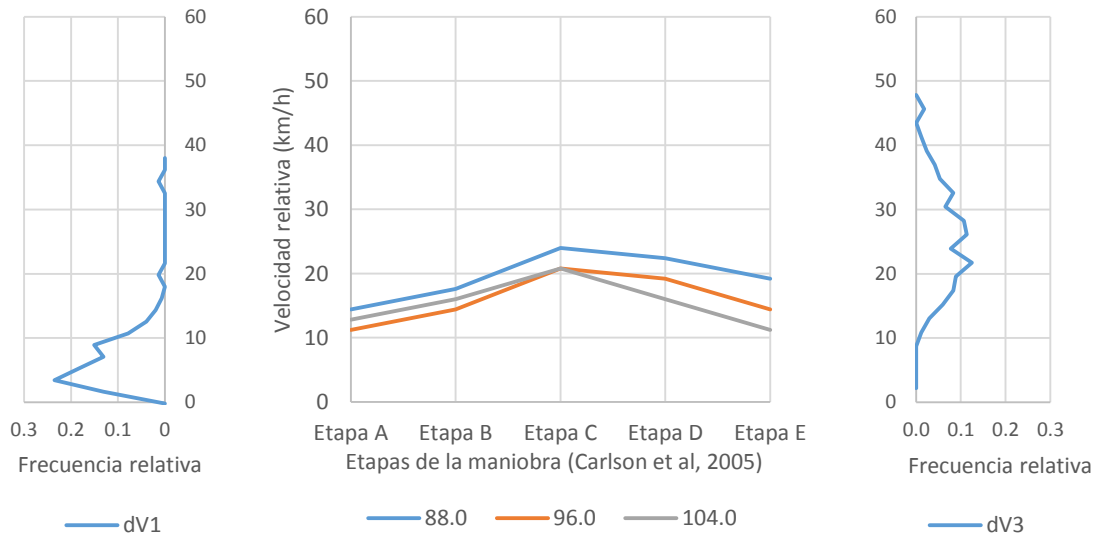
Además de la caracterización global de la trayectoria del adelantante a través de las anteriores variables, algunos estudios experimentales, como el de Carlson et al. (2006) estudiaron la evolución de velocidades a lo largo de la maniobra. En la Figura 11-4 se compara aquél estudio con los datos obtenidos en el presente trabajo. Los resultados muestran que, tanto en el inicio como en el final de la maniobra, los datos medidos en el presente estudio indican valores de la velocidad relativa mucho más elevados. No obstante, las diferencias existentes en el final del adelantamiento son mucho más elevadas. A pesar de que Carlson et al. (2006) observaron una deceleración a partir de la posición en paralelo (etapa C), no se pudo verificar mediante los datos de campo. De hecho, en el apartado de modelos se demostró que, al tener en cuenta también el punto de paso por la posición en paralelo, el modelo que mejor se ajustaba a los datos medidos no indicaba un descenso en la velocidad en fases finales.



(a) ligeros

(b) pesados

Figura 11-3. Comparación de la velocidad relativa media en estudios experimentales



(a) inicio, presente estudio

(b) evolución, Carlson et al. (2006)

(c) finalización, presente estudio

Figura 11-4. Comparación en la evolución de la velocidad durante la maniobra, entre Carlson et al. (2006) y el presente estudio

11.2. Análisis de factores

Existen diversas investigaciones que han analizado la influencia de factores relativos al vehículo, la carretera y el conductor, en la maniobra de adelantamiento.

El efecto de los vehículos pesados fue analizado, de forma teórica, por Harwood y Glennon (1989). Estos autores plantearon un modelo teórico de cálculo de la distancia de visibilidad de adelantamiento, de manera que el efecto de la longitud y velocidad del vehículo adelantado era fácilmente calculable. Estos autores obtuvieron que la distancia de visibilidad necesaria para que un vehículo ligero rebasara a uno pesado era un 20% superior a la necesaria para rebasar a otro ligero. Esos valores son coherentes, en términos relativos, con los obtenidos mediante el modelo formulado en la presente investigación. Por ejemplo, en el caso de la formulación determinista realizada, la distancia de visibilidad para un vehículo ligero medio ($L_i = 5\text{ m}$) fue de 500 m, mientras que para un pesado con longitud igual a 16,5 m (algo inferior a la propuesta por Harwood y Glennon, 1989) esta distancia fue de 600 m. También de forma teórica, Hanley y Forckenbrock (2005) definieron un modelo probabilístico para la simulación de adelantamientos. En ninguno de estos estudios, los datos experimentales avalaron las conclusiones obtenidas mediante los modelos teóricos.

Por su parte, algunos estudios experimentales analizaron la diferencia entre maniobras en las que el vehículo adelantado era ligero o pesado. En concreto, Polus et al. (2000) observaron las diferencias en tiempos de adelantamiento por medio de grabaciones desde puntos fijos. La Figura 11-5 muestra las distintas investigaciones que han considerado en detalle este efecto. Como se observa, no existen coincidencias claras entre investigaciones realizadas en diversos países, lo cual se podría deber a las distintas características de los vehículos pesados entre regiones diferentes. En cuanto a la comparación con Hanley y Forckenbrock (2005) se debe tener en cuenta que los resultados proceden de una simulación y no de observación directa de las maniobras. En el caso del presente estudio y del de Polus et al. (2000), se observa que los valores del tiempo de ocupación del carril izquierdo se sitúan entre 5 y 15 s, centrándose entre 9 y 10 s.

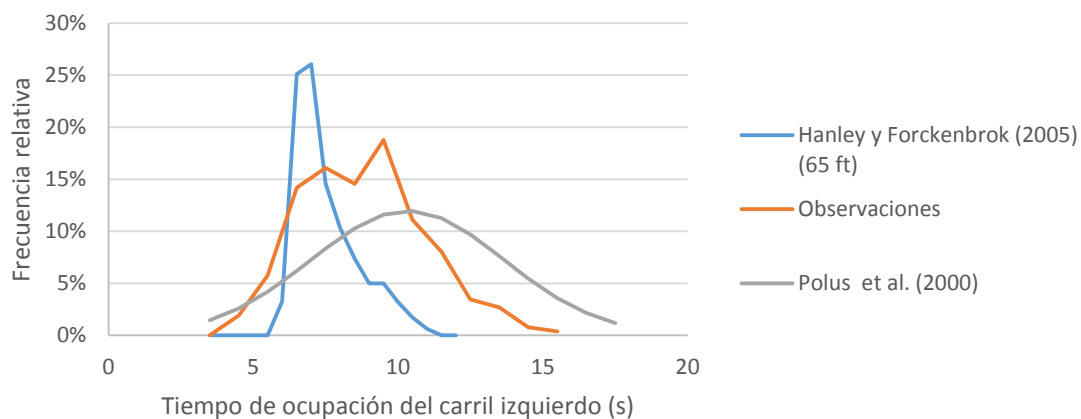


Figura 11-5. Distribuciones de frecuencia del tiempo de ocupación del carril izquierdo en adelantamientos a pesados

Otro de los factores cuya influencia es significativa en los datos del presente estudio es el sexo y la edad del conductor que adelanta. Farah (2011) descubrió, a partir de un experimento realizado mediante simulador de conducción, con una muestra de 100 conductores, que tanto la edad, como el sexo, como su interacción, tenían una influencia estadísticamente significativa en la duración de la maniobra de adelantamiento. La Figura 11-6 muestra los valores medios del

tiempo de ocupación del carril izquierdo, entre los distintos grupos de sexo y edad. En ambos casos los conductores se han dividido en dos grupos de edad: menores y mayores de 30 años. En ambos casos, el grupo que mostró el tiempo de adelantamiento más reducido fue el de hombres jóvenes, estando los valores medios entre 6,5 y 6,9 s. Las diferencias entre este grupo y otros fueron estadísticamente significativas, tanto en el presente estudio (como se dedujo en el apartado de análisis), como en el caso de Farah (2011). En general, los tiempos de maniobra se asemejan en ambos estudios, excepto en el caso de conductores mujeres mayores de 30 años.

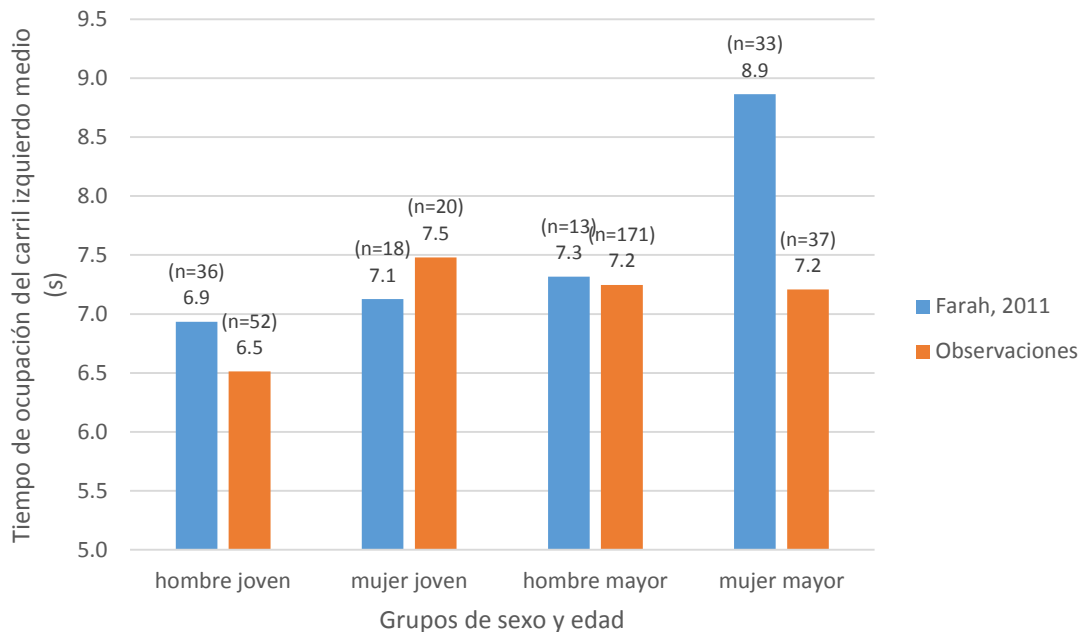


Figura 11-6. Tiempos de ocupación del carril izquierdo medios, por grupos de edad y de sexo

Del mismo modo, se detectó una influencia significativa de ambos factores en el hueco crítico, obtenido de acuerdo al método de máxima verosimilitud en el estudio de Farah (2011) y mediante el modelo 4 de aceptación de huecos explicado en el apartado de análisis. En este caso, no obstante, sí que existen diferencias entre los valores obtenidos en el presente estudio y los resultados del estudio basado en simulador de conducción. Con estos últimos resultados, el hueco crítico es muy inferior al realmente estimado mediante los datos experimentales. Estas diferencias son menores en el caso de hombres jóvenes (solo 4,9 s de media inferior) y mayores en el caso de conductoras mujeres (más de 20 s de diferencia). Estas diferencias se podrían explicar debido a que el estudio de Farah (2011) empleó un simulador de conducción, y que las decisiones de los conductores en este entorno, ausente de riesgo real, son distintas.

Sin embargo, tal como muestra la Figura 11-7, los conductores hombres presentan un hueco crítico medio inferior, tanto en el presente estudio como en el caso de Farah (2011), siendo las diferencias más intensas en los datos experimentales. En ellos no se detectaron diferencias entre grupos de edad.

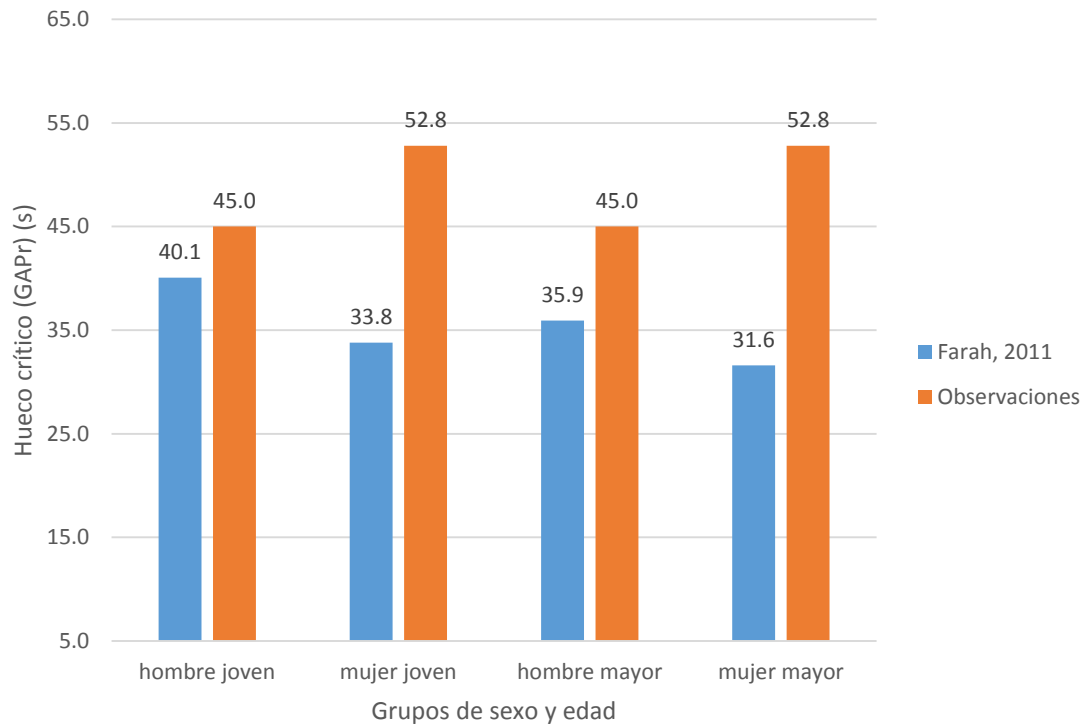


Figura 11-7. Hueco crítico medio, por grupos de sexo y de edad

Otros autores que estudiaron la influencia del sexo del conductor adelantante fueron Vlahoguanni (2013) y Vlahoguanni y Golias (2012). Para ellos, la duración de la maniobra es inferior en el caso de conductoras mujeres, aunque la probabilidad de adelantamiento era superior en el caso de los conductores hombres. Igualmente, estos autores basaron sus resultados en simuladores de conducción, y no en observaciones experimentales.

11.3. Modelos de aceptación de huecos

El estudio de la aceptación de huecos ya fue llevado a cabo, anteriormente, por diversos investigadores. Ghods y Saccomanno (2014) desarrollaron y calibraron un módulo de microsimulación para carreteras convencionales. Para la calibración de dicho módulo, propusieron un modelo probit de aceptación de huecos basado en el hueco residual crítico.

A partir de la observación de 171 huecos, todos ellos con vehículos en sentido opuesto visibles, se realizó la estimación de los parámetros del modelo probit, obteniendo un hueco residual crítico medio de 3,0 s y una desviación de 0,9 s.

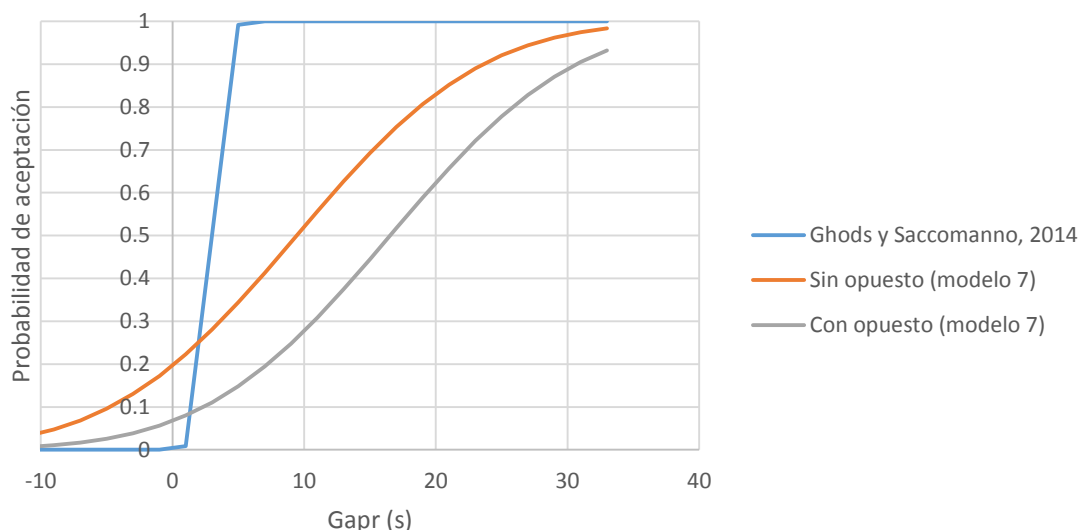


Figura 11-8. Comparación de modelos de aceptación de hueco residual

En la Figura 11-8 se comparan los modelos de aceptación de hueco residual crítico obtenidos en el presente estudio (llamado modelo 7 en el apartado de análisis) con los valores estimados por Ghods y Saccomanno (2014). En el estudio de Ghods y Saccomanno la dispersión en los valores de *TTC* es muy inferior, así como el valor del hueco crítico residual medio, de 3 s frente a los 10 s y 16 s obtenidos en el presente estudio. Igualmente, Ghods y Saccomanno únicamente consideraron maniobras realizadas en presencia de vehículo opuestos visibles y en una única zona de adelantamiento.

Otros autores, de forma puramente teórica, definieron valores fijos para el hueco residual crítico. Por ejemplo, Van Valkenberg y Michael (1971) establecieron un valor de 6,1 m (lo cual se traduce en 0,1 s si dos vehículos se aproximan a 100 km/h), que resultaría excesivamente reducido y no se detectó en la realidad. Muchos modelos posteriores tomaron el valor de 1 s (Glennon, 1988; Hassan et al, 1996; Harwood et al, 2008, etc.). Este valor sí que representa razonablemente una cota inferior de los huecos críticos residuales observados, si bien no es compatible con un modelo probabilístico como el resultante del presente estudio.

Otras investigaciones que emplearon el concepto de hueco crítico asumieron valores medios de dicha variable (Polus et al., 2000), lo cual carece de sentido, dado que la variable buscada es el hueco crítico, a partir del cual se aceptaría adelantar. El valor medio se ve afectado de forma muy significativa por la geometría o el volumen de tráfico existente en cada localización.

Los modelos de decisión de adelantamientos de Farah y Toledo (2010) emplearon el hueco crítico como variable de decisión, en lugar del hueco residual crítico. Sin embargo, los datos empleados por Farah y Toledo (2010) procedían de un estudio llevado a cabo mediante un simulador de conducción. Por este motivo, tal como se observa en la Figura 11-9, y en consonancia con lo detectado en la Figura 11-7, la probabilidad de aceptar un hueco es mucho más elevada en el caso del estudio realizado mediante el simulador de conducción. Igualmente, el análisis de Farah y Toledo (2010) no tuvo en cuenta las limitaciones a la visibilidad disponible y únicamente consideró maniobras con vehículos opuestos visibles.

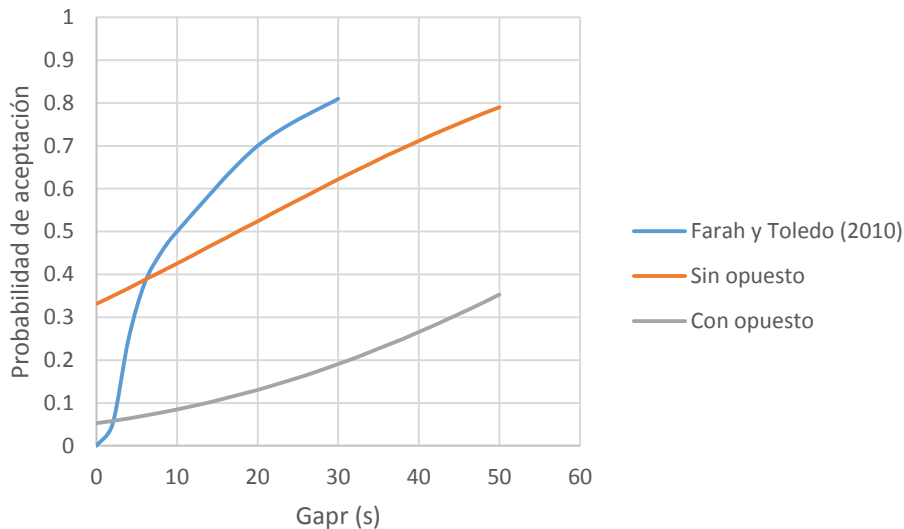


Figura 11-9. Comparación de modelos de aceptación de huecos

Aunque la mayoría de modelos de aceptación de huecos se basan en huecos medidos en unidades de tiempo, los resultados de esta investigación demostraron que existe una correlación mucho más fuerte entre los huecos medidos en unidades de distancia y los resultados de la decisión de adelantar o no. Es decir, el comportamiento del conductor se basa, según los resultados de los modelos de elección estimados, en la distancia libre hasta el vehículo opuesto (o en la distancia de visibilidad disponible), y no en el tiempo que el conductor debe estimar que transcurriría hasta cruzarse con el vehículo opuesto.

Este resultado parece razonable, teniendo en cuenta la gran dificultad que existe en la determinación de la velocidad relativa del vehículo opuesto y en la estimación del tiempo que transcurriría hasta cruzarse con él, labor propia de la investigación pero no de la conducción. Por este motivo, se decidió usar el hueco en unidades de distancia a partir de ese momento.

11.4. Modelos de adelantamiento y distancia de visibilidad

La modelización de la trayectoria del vehículo adelantante ha sido estudiada con mayor frecuencia en investigaciones anteriores. En ellas, el principal objetivo fue la obtención de la distancia de visibilidad de adelantamiento.

En cuanto a la trayectoria del adelantante, en esta investigación se calibraron diversos modelos (en la sección 9.2.2.3.2), siendo algunos de ellos iguales a los propuestos por estudios anteriores.

De los propuestos, el modelo 1 (velocidad constante) es equivalente al formulado por AASHTO (2004). Este modelo no tiene en cuenta la variación de velocidad del vehículo adelantante. La calibración del modelo con los datos experimentales obtenidos proporcionó un valor del error cuadrático medio elevado, especialmente, al evaluar las velocidades iniciales y finales del vehículo adelantante. El valor de dicha velocidad fue de 1,20 veces el valor de la velocidad del vehículo adelantado, siendo en el caso del modelo de la AASHTO (2004), igual a 16 km/h superior a la velocidad del adelantado. Este modelo, no obstante, fue adecuado para la caracterización de maniobras lanzadas.

El modelo 2 (aceleración constante durante toda la maniobra), equivale al propuesto por Rocci (1993). Los valores que propuso este autor oscilaban entre 0,27 y 2,17 m/s², siendo el percentil

50 igual a $1,1 \text{ m/s}^2$. Los valores obtenidos mediante los datos experimentales son ligeramente inferiores (promedio de $0,77 \text{ m/s}^2$). Sin embargo, el modelo de Rocci (1993) no asume que la velocidad en el instante inicial difería de la velocidad del adelantado, algo que sí se detectó en la realidad.

El modelo 4 (aceleración constante hasta alcanzar la velocidad final), por su parte, es muy similar a los propuestos por Glennon (1988) y Hassan et al (1996). Estos autores proponían que la velocidad era constante a partir del punto crítico. El modelo 4 propuesto en esta investigación permite que se determine también la posición del instante en el que se deja de acelerar, estando sin embargo el valor medio de dicho instante centrado cerca del punto medio de la maniobra.

Una vez escogido el modelo 2 (aceleración constante), como aquél modelo que predice de forma razonablemente correcta la distancia recorrida por el vehículo adelantado, se procedió a estimar la distancia de visibilidad de adelantamiento. Esta variable fue comparada con la mayoría de modelos existentes de distancia de visibilidad de adelantamiento. La comparación se realizó, de forma separada, para aquellos casos en los que el modelo estima la distancia de visibilidad desde la posición inicial y para los que emplean la distancia de visibilidad necesaria en la posición crítica. En todos los casos, los modelos existentes se aplicaron con los supuestos y variables de entrada proporcionados por sus autores, puesto que en el apartado de análisis ya se volvieron a calibrar con los datos experimentales obtenidos.

En la Figura 11-10 se comparan los modelos de distancia de visibilidad partiendo del instante inicial de la maniobra. En las velocidades de diseño 80, 100 y 120 km/h se han representado las distribuciones de la distancia de visibilidad obtenidas mediante el modelo derivado del presente estudio. Tal como se recogió en el estado del arte, existe una gran dispersión, situándose los modelos existentes en una franja de aproximadamente 150 m de anchura. Esta franja se corresponde con percentiles inferiores al 50% del modelo presentado en este trabajo, en velocidades de diseño bajas. Sin embargo, en velocidades de diseño altas, la mayor parte de los modelos existentes se sitúa en percentiles centrales de los resultados del modelo.

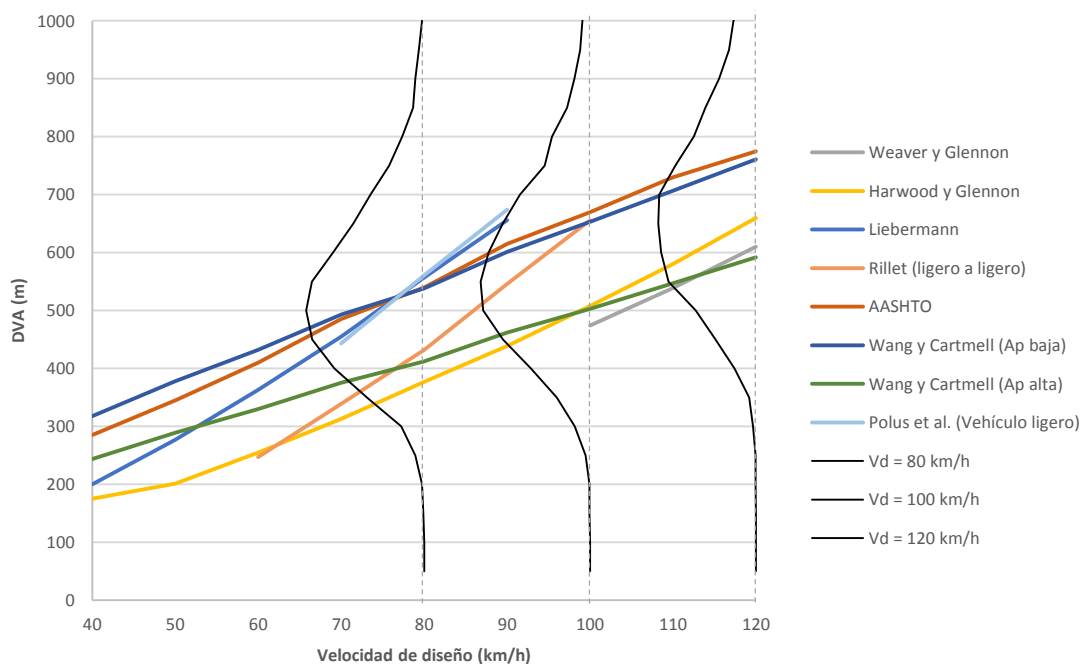


Figura 11-10. Comparación de modelos de distancia de visibilidad de adelantamiento

De forma análoga, en la Figura 11-11 se comparan los modelos existentes que estiman la distancia de visibilidad de adelantamiento desde la posición crítica. En las velocidades de diseño de 80, 100 y 120 km/h se han mostrado las distribuciones de la distancia de visibilidad necesaria desde la posición 1' (cota inferior de la posición crítica) y desde la 2' (cota superior de la posición crítica). En este caso, la mayor parte de modelos existentes se sitúan en una franja de unos 150 m de anchura, localizada alrededor de los percentiles inferiores al 50% de los resultados del modelo propuesto.

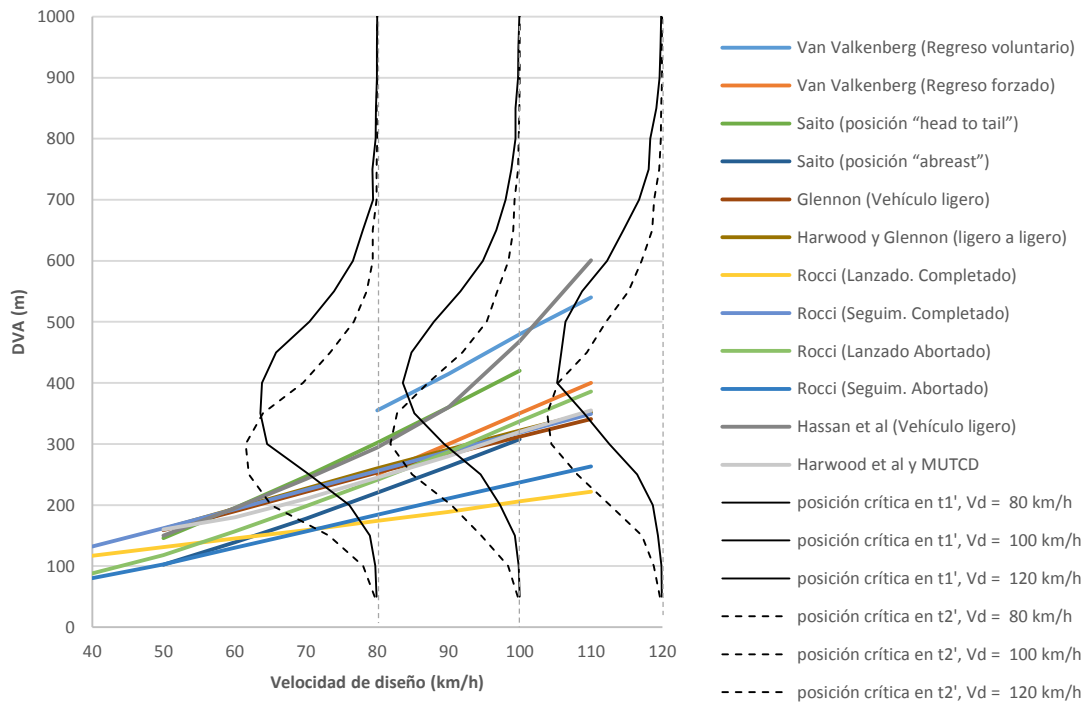


Figura 11-11. Comparación de modelos de distancia de visibilidad de adelantamiento en la posición crítica

11.5. Posición crítica

Tal como se desarrolló en el apartado de estado del arte, una gran parte de los modelos se apoyan en el concepto de la posición crítica, entendida como aquél punto a partir del cual es mejor terminar la maniobra que abortarla, en el caso de que exista un vehículo acercándose en sentido opuesto.

Diversos autores plantearon métodos de cálculo para determinar la localización de este punto, siempre de forma teórica: en la posición “en paralelo”, en la posición “head-to-tail”, igualando tiempos para completar o abortar el adelantamiento, o igualando distancias de visibilidad para completar o abortar. Las observaciones experimentales no han podido validar ninguna de estas hipótesis, pues apenas se observó alguna maniobra abortada, y siempre fue en fases muy tempranas del adelantamiento.

Este hecho demostraría que la posición crítica se encuentra en fases muy tempranas de la maniobra, si bien no es posible determinar exactamente en qué punto. En lugar de observar maniobras abortadas, en las localizaciones con visibilidad limitada el estudio experimental ha mostrado que el número de maniobras es muy reducido, debido a que el comportamiento de los

conductores es muy conservador. Este comportamiento deberá tenerse en cuenta para la revisión y formulación de criterios de diseño y señalización de zonas de adelantamiento.

11.6. Análisis de fiabilidad

Algunos autores ya presentaron aproximaciones al nivel de riesgo asumido en la maniobra de adelantamiento a partir de la herramienta de análisis de fiabilidad.

El Khoury y Hobeika (2007) realizaron un análisis mediante el método de simulación Monte Carlo. Para ello, definieron un modelo de adelantamiento basado en el de Glennon (1988). Los parámetros de dicho modelo se caracterizaron mediante distribuciones teóricas, o derivadas de investigaciones previas, que generalmente no estaban relacionadas con la maniobra de adelantamiento. Mediante un programa informático, a cada una de las maniobras simuladas siguiendo dicho modelo, se les asignaba un nivel de riesgo codificado en seis niveles. Los resultados permitieron establecer un nivel de riesgo de alguno de los modelos previos y criterios existentes.

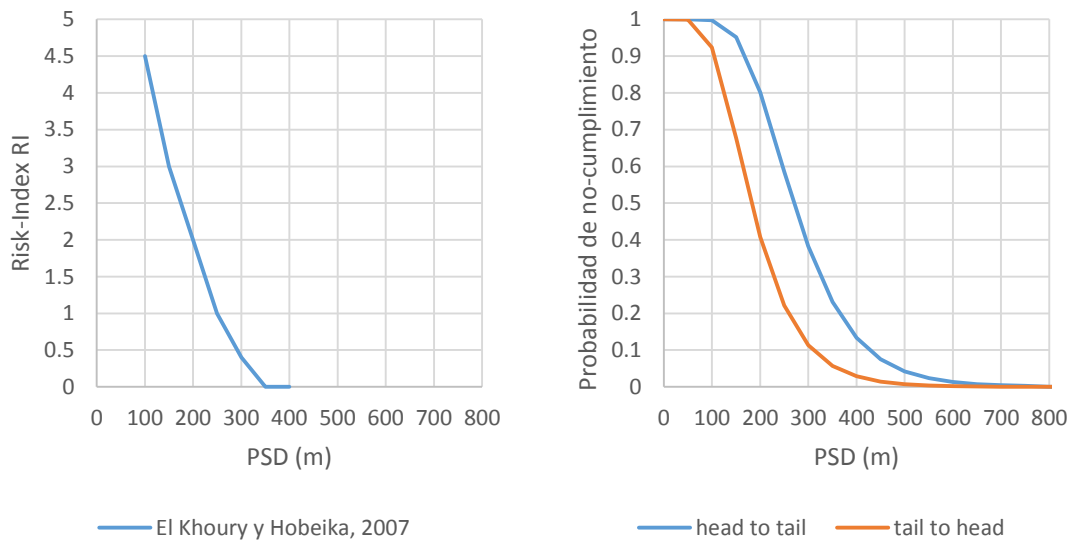


Figura 11-12. Análisis de fiabilidad según El Khoury y Hobeika (2007) y el presente estudio

La Figura 11-12 compara los resultados del análisis de fiabilidad propuesto por El Khoury y Hobeika (2007a, 2007b) con los del presente estudio, para una velocidad de diseño de 80 km/h. En el caso del análisis de dichos autores, no se empleó la probabilidad de fallo o de no-cumplimiento para evaluar el nivel de riesgo, sino un indicador definido específicamente y sin significado físico concreto. Esto dificulta la comprensión de los resultados. No obstante, los autores obtuvieron niveles de riesgo nulo a partir de aproximadamente 350 m, correspondiendo este valor a un 5% de probabilidad de no-cumplimiento en la posición crítica más arriesgada y de un 25% en la más conservadora.

Los mismos autores, El Khoury y Hobeika (2012) integraron este estudio con la estimación de los efectos operacionales de la maniobra de adelantamiento. Para ello, compararon los resultados del primero estudio con los resultados de la simulación en el modelo microscópico TWOPAS de tramos de carretera en los que la distancia de visibilidad era igual a la empleada en la evaluación del índice de riesgo.

Paralelamente, El-Bassiouni y Sayed (2010) evaluaron el nivel de riesgo asociado a la maniobra de adelantamiento, calibrando el modelo de la AASHTO (2004) mediante la salida de datos de

un simulador de conducción, en el que únicamente 20 conductores efectuaron 111 adelantamientos. Los autores realizaron, aplicando dicho modelo, un análisis de fiabilidad empleando los métodos FORM y Monte Carlo.

Tal como se observa en la Figura 11-13, los resultados proporcionados por El Bassiouni y Sayed (2010) se asemejan a los obtenidos en el presente estudio, para una velocidad de diseño de 100 km/h. No obstante, el análisis de El Bassiouni y Sayed queda limitado a la distancia de visibilidad al inicio de la maniobra, pues el modelo de la AASHTO (2004) en el que se basa no tiene la suficiente complejidad como para describir la evolución del vehículo adelantante en su recorrido durante la maniobra. Además, el reducido número de conductores empleados en el estudio limita la validez del mismo, frente a la muestra significativamente superior del presente trabajo.

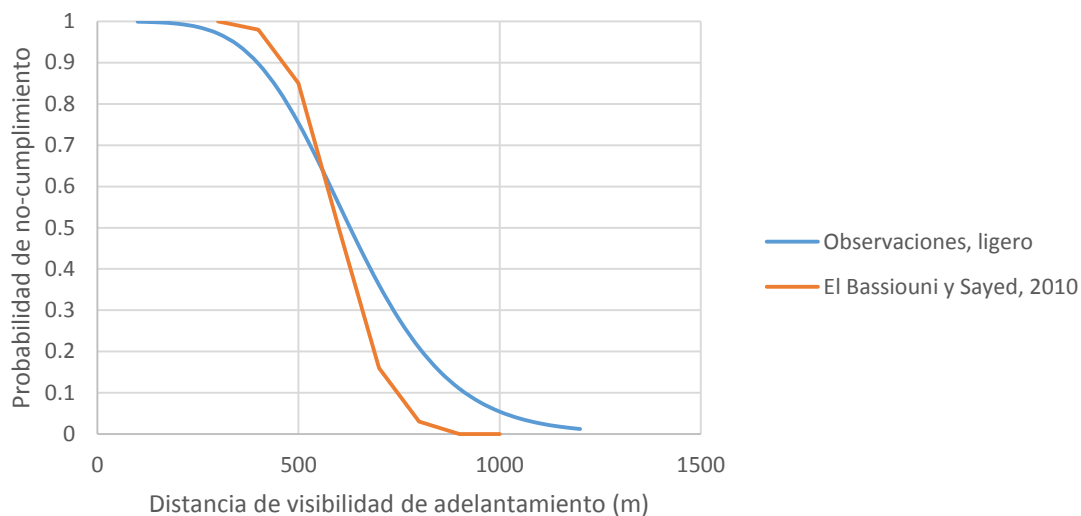


Figura 11-13. Análisis de fiabilidad según El Bassiouni y Sayed (2010) y el presente estudio

Tanto El Khoury y Hobeika (2007) como El Bassiouni y Sayed (2010) emplearon modelos de adelantamiento ya existentes, a los que alimentaron con distribuciones de las variables de entrada procedentes de diversas fuentes. En su lugar, el presente estudio permitió mejorar la forma en la que se llevó a cabo el análisis de fiabilidad, pues los datos experimentales se emplearon tanto en la calibración de un modelo como en la caracterización de sus parámetros de entrada.

Algunas de las diferencias encontradas en la forma en la que se llevó a cabo el análisis de fiabilidad fueron, por ejemplo, que el presente estudio no consideró el hueco residual crítico para evaluar la probabilidad de no-cumplimiento, entendiendo de esta forma que el no-cumplimiento del sistema representa el caso en el que no existe margen de seguridad. Por su parte, ningún autor evaluó conjuntamente la probabilidad de no-cumplimiento con la probabilidad de aceptación de huecos, por lo que las investigaciones anteriores carecían de una aproximación real al riesgo existente en el adelantamiento. Esto es debido a que, en la realidad, una distancia de visibilidad muy reducida (o hueco muy pequeño) no debe asociarse necesariamente con un indicador de riesgo alto (ya sea probabilidad de no-cumplimiento u otros), puesto que ningún conductor comenzará a adelantar en tal situación.

11.7. Conclusiones de la discusión

En este apartado se han comparado los resultados del análisis con distintas investigaciones anteriores que trataron el mismo problema. Las principales conclusiones de esta comparación se resumen a continuación:

- El efecto del tipo de vehículo adelantado fue investigado por diversos autores, si bien las conclusiones difieren, en cuanto a la cuantificación del mismo, siendo la tendencia en todos los casos la del aumento de la distancia recorrida en el carril izquierdo al adelantar. Estas diferencias pueden deberse a distintas restricciones de longitudes máximas de los vehículos pesados en cada país (Hanley y Forkenbrock, 2005). Además, algunas de las investigaciones que trataron este efecto no están basadas en datos experimentales por lo que sus resultados no están verificados (Harwood y Glennon, 1988; Hanley y Forkenbrock, 2005).
- El efecto de las características demográficas de los conductores que adelantan solo había sido estudiado mediante simuladores de conducción (Farah, 2011), dado que hasta el momento, no existía una metodología experimental capaz de registrar este nivel de detalle. No obstante, ambas metodologías obtuvieron resultados similares, en cuanto a la identificación de grupos con comportamientos distintos. De todos ellos, los conductores jóvenes menores de 30 años presentan el comportamiento más agresivo, caracterizado por menores tiempos de ocupación del carril izquierdo al adelantar. Los tiempos de ocupación fueron muy similares a los medidos en este estudio. Los resultados de Vlahoguanni (2013), sin embargo, fueron opuestos a los del presente estudio, pues sugieren que los conductores hombres realizan la maniobra de adelantamiento con un mayor tiempo de ocupación del carril izquierdo.
- La aceptación de huecos también ha sido estudiada tanto mediante estudios experimentales como mediante simuladores de conducción. En el primero de los casos, la muestra de huecos y localizaciones consideradas por otros autores (Ghods y Saccomanno, 2014) fue muy baja, y sus resultados pueden no ser extrapolables. En el caso de los simuladores de conducción, se ha detectado, para esta modelización, una diferencia muy significativa en las distribuciones de huecos críticos, pues los conductores, en el simulador, tienen huecos críticos mucho más reducidos (Farah y Toledo, 2010). Esto coincide con la hipótesis general de que en los simuladores de conducción la percepción del riesgo es muy reducida. Por este motivo, el uso de simuladores de conducción en el estudio de maniobras de adelantamiento no pudo ser validado mediante esta investigación.
- Los modelos de aceptación de huecos basados en unidades de distancia tuvieron, en la presente investigación, una correlación mucho más intensa con las decisiones de aceptación y rechazo de huecos en el sentido opuesto. Este hecho contrasta con la utilización más frecuente en la literatura de los huecos en unidades de tiempo, y con la forma lógica de responder del conductor, siendo mucho más sencillo evaluar una distancia que la velocidad de un objeto alejado.
- La evolución del vehículo adelantante ha sido tratada por muchos autores, siendo el número de modelos existentes muy elevado. En este estudio, se descartó el modelo de velocidad constante (AASHTO, 2001), pues no era capaz de recoger la variación de velocidades detectada en el estudio experimental. Por otra parte, los modelos teóricos más aceptados (Glennon, 1988; Hassan et al., 1996; AASHTO, 2011), basados en una fase de aceleración hasta alcanzar una velocidad constante en la posición crítica, mostraron un

ajuste adecuado, si bien el instante en el que se deja de acelerar y la velocidad final no se aproximaba a la propuesta por los autores.

- Las hipótesis acerca de la determinación de la posición crítica o punto de no-retorno no pudieron ser validadas, ya que el número de maniobras abortadas registradas fue insignificante.
- Los valores de distancia de visibilidad propuestos por distintos autores fueron comparados con las distribuciones obtenidas por el modelo probabilístico presentado en este estudio. Tanto en los modelos que estiman la distancia de visibilidad antes de iniciar la maniobra como en los que estiman la necesaria desde la posición crítica existía una dispersión muy elevada, abarcando más de 150 m de variación. Estos valores se sitúan, generalmente, alrededor del segundo cuartil de las distribuciones del modelo propuesto, es decir, que estiman valores superados, generalmente, por la mitad de los conductores. Ninguno de estos modelos proporciona, no obstante, una indicación en cuanto al nivel de riesgo asociado a los valores que propone. Por todo ello, resulta aconsejable la formulación de un modelo en términos probabilistas, de modo que los riesgos derivados de cualquier desviación en la variable de salida quede cuantificada.
- El estudio del nivel de riesgo relacionado con la distancia de visibilidad también había sido abordado previamente por varios autores (El Khoury y Hobeika, 2007; y El Bassiouni y Sayed, 2010). La principal carencia de dichos estudios fue la ausencia de datos experimentales que caracterizaran los modelos de adelantamiento empleados, y sobre todo, las variables de entrada del análisis de fiabilidad planteado. Sin embargo, estos autores llegaron a establecer una escala de riesgo asociada a la distancia de visibilidad de adelantamiento, mediante un indicador específico (El Khoury y Hobeika, 2007) o mediante la probabilidad de no cumplimiento (El Bassiouni y Sayed, 2010), obteniendo en este caso resultados similares a los del presente estudio, aunque en un único caso con velocidad de diseño igual a 100 km/h y a pesar de estar basado en un modelo diferente.

12. Aplicaciones prácticas

12.1. Desarrollo de un modelo de microsimulación

Una de las aplicaciones del presente estudio fue el desarrollo de un modelo de microsimulación de tráfico para carreteras convencionales que incluye el adelantamiento. Este modelo se desarrolló dentro del software de simulación Aimsun, de TSS (Transport Simulation Systems, 2013). La finalidad de los modelos de simulación, en este ámbito, es la de estudiar la funcionalidad del tráfico de una carretera convencional en función de las distintas configuraciones de zonas de adelantamiento, y ante posibles variaciones en la demanda de tráfico.

Para emplear un modelo de microsimulación, es necesario obtener los valores de los parámetros del mismo, de modo que sea capaz de representar la realidad actual de forma razonable. A este proceso se le denomina calibración.

Este apartado comprende las tareas de desarrollo de un modelo a partir de los datos experimentales, así como de la calibración y validación del mismo, que formaron parte de la tesis presentada. La programación e implementación del modelo dentro del software Aimsun no forman parte de la tesis.

12.1.1. Modelos previos

Tal como se desarrolló en el apartado de estado del arte, existen algunos modelos de microsimulación que incluyen la maniobra de adelantamiento. Dentro del software comercial, destacan los modelos TAM (anteriormente llamado TWOPAS) y CORSIM.

El módulo TAM (Traffic Analysis Module), dentro del software IHSDM (Interactive Highway Safety Design Model) incluye un modelo de adelantamientos. Este modelo fue calibrado con datos experimentales obtenidos en los años 70. Según Li y Washburn (2011), este modelo no puede incluir intersecciones en los tramos simulados. Kim y Elefteriadou (2010) detectaron que el modelo no puede simular flujos de tráfico mayores a 1700 veh/h, pues se colapsa.

El software CORSIM incluye, igualmente, un modelo de adelantamiento desarrollado por Li y Washburn (2011). Este modelo ya define las tres etapas de la maniobra de adelantamiento: deseo, decisión y ejecución. No obstante, el modelo de decisión y ejecución de adelantamientos que emplea es el de la AASHTO (2011) o el del MUTCD (FHWA, 2003). Igualmente, este modelo no tiene en cuenta la visibilidad disponible. Además, el modelo de adelantamientos de CORSIM no ha sido calibrado con datos experimentales.

Además, existe otro grupo de modelos que se han desarrollado en el ámbito de la investigación. Por ejemplo, los estudios de Kim y Elefteriadou (2010), Dey et al. (2008), Hegeman et al. (2009) y Ghods (2014) proponen modelos de adelantamiento alternativos. Generalmente, estos modelos no han sido calibrados o validados con datos de adelantamiento, ya sea a nivel individual

(evaluación de las trayectorias o de las decisiones de adelantar) o a nivel agregado (frecuencia de maniobras de adelantamiento).

12.1.2. Descripción del modelo

El objetivo de esta sección fue el desarrollo de un modelo microscópico de adelantamiento. Este modelo incorporó los resultados del análisis, adaptando los modelos allí formulados a una estructura propia de un programa informático. El modelo planteado cubre las etapas de deseo, decisión y ejecución.

En la Figura 12-1 se observa una captura del software Aimsun (Transport Simulation Systems, 2013), en el cual se integra el modelo. Se representa un fragmento de tramo de carretera convencional.

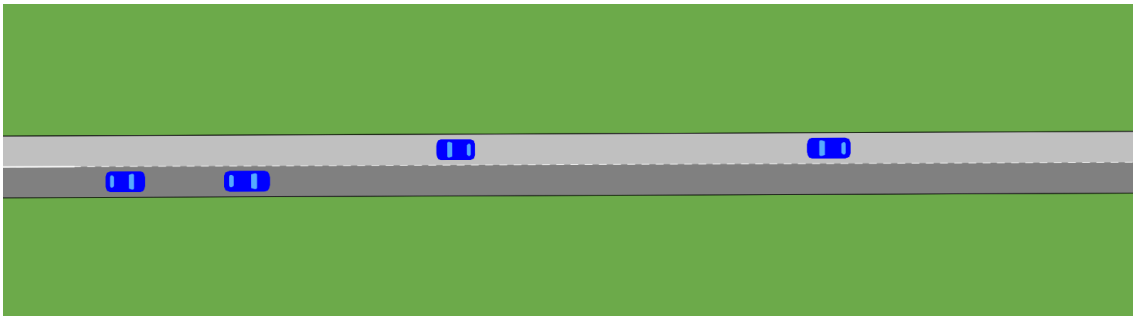


Figura 12-1. Captura de pantalla del software Aimsun

12.1.2.1. Generación de la red

La modelización de una carretera convencional se consigue mediante la creación de dos secciones, una para cada sentido, vinculadas entre sí de modo que los vehículos de un sentido y otro pueden interactuar. Las prohibiciones de adelantamiento se indican mediante líneas discontinuas. Cada sección tiene una velocidad límite específica y una visibilidad disponible, que es igual al parámetro Visibility en el punto donde se inicia la prohibición de adelantamiento y que crece linealmente aguas arriba de dicho punto. Es posible generar varias parejas de secciones y enlazarlas, formando así un tramo completo.

12.1.2.2. Deseo de adelantamiento

El deseo de llevar a cabo un adelantamiento se evalúa para todo vehículo que está en cola. Un vehículo está en cola en Aimsun si su velocidad actual es inferior a su velocidad deseada, al circular detrás de un vehículo más lento.

El deseo de adelantar es una variable binaria (sí o no), dependiente de 4 variables:

- Demora acumulada (*Delay*).
- Diferencia de velocidades entre la velocidad deseada y la velocidad del líder (*dV*).
- Orden en la cola (*Rank*).
- Tiempo hasta el final del tramo de carretera (*remainingtime*).

Si la diferencia de velocidades *dV* es superior a *maxdV*, el deseo de adelantar es siempre positivo. Por debajo de *mindV*, el deseo de adelantar siempre es negativo. Para diferencias de velocidad inferiores a *maxdV* y superiores a *mindV*, el deseo de adelantar depende del tiempo acumulado en la cola (*Delay*), siendo el umbral de *dV* cada vez más bajo, hasta alcanzar *DelayTh*.

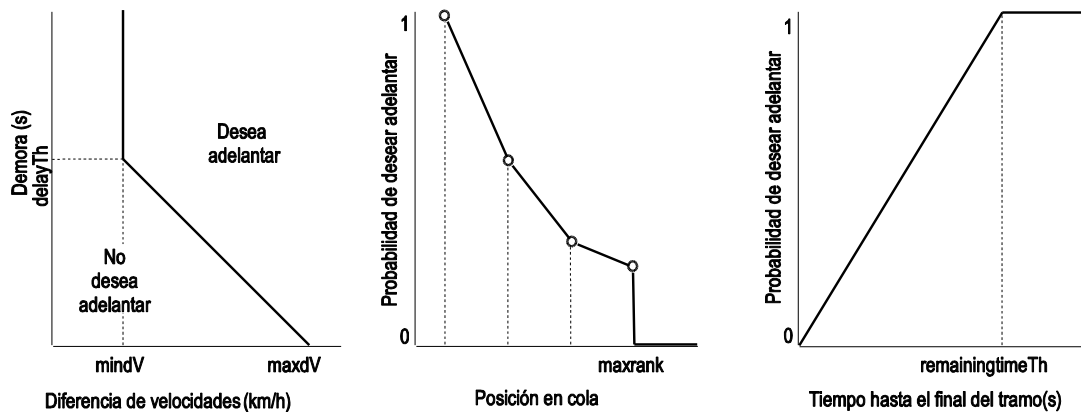


Figura 12-2. Factores del deseo de adelantar

La probabilidad de que el deseo de adelantar sea positivo está ponderada por el orden de cola (*Rank*), siendo el factor de ponderación de uno para el vehículo que se sitúa en el primer lugar de la cola, y en general de $1/Rank$ para el que ocupa la posición *Rank*.

Igualmente, se ha definido un factor de ponderación de la probabilidad de que el deseo de adelantar sea positivo, en función del tiempo hasta el final de la carretera (*remainingtime*). La probabilidad de desear adelantar decrece linealmente desde un umbral de tiempo hasta el final de la carretera (*remainingtimeTh*), en el que es igual a uno, hasta el final de la carretera, en el que es igual a cero. Todos estos efectos se muestran en la Figura 12-2.

Una vez el deseo de adelantar es positivo, el vehículo se aproxima al vehículo que lleva delante. Para representar este comportamiento, se modificó el modelo de seguimiento de Gipps (Gipps, 1981), mediante la introducción de un factor de reducción, tal como se muestra en la Ecuación 12-1.

$$V_f(t + dt) = b_f dt + \sqrt{(b_f dt)^2 - b_f \left[2(x_l(t) - x_f(t) - l_l - s_f) - V_f(t) - \frac{V_l^2(t)}{RCF \cdot b_l} \right]} \quad \text{Ecuación 12-1}$$

Donde:

- x_f , V_f , and b_f : Posición, velocidad y deceleración normal del perseguidor.
- x_l , V_l and b_l : Posición, velocidad y deceleración normal del líder.
- S_f : Hueco (m).
- L_l : Longitud del líder (m).
- RCF : Factor de corrección. En condiciones normales, se asume que RCF es igual a 1, para este caso, el valor es menor que 1.
- dt : Paso de simulación.

12.1.2.3. Decisión

El primer paso en la decisión de adelantar es la verificación de que no hay una línea continua que impide el adelantamiento en la localización del vehículo. Además, se verifica si el vehículo líder ya está siendo adelantado, en cuyo caso la maniobra solo es posible si el parámetro *maxSimul* (máximo número de adelantamientos simultáneos permitido) es mayor que uno.

En este caso, se evalúa la decisión de adelantar. Para ello, se realiza una estimación del tiempo necesario para adelantar en las circunstancias existentes en cada instante. El modelo de adelantamiento implementado en Aimsun es el modelo de aceleración constante hasta alcanzar una velocidad máxima, a partir del cual es de velocidad constante.

Dicha velocidad máxima es igual a la velocidad deseada, siempre que la diferencia entre la velocidad deseada y la velocidad del líder sea superior al umbral $PVSE_{Th}$ (Passing Vehicle Speed Enhancement Threshold). En caso contrario, la velocidad deseada se multiplica por el factor $PVSE$ (Passing Vehicle Speed Enhancement factor).

La evaluación del deseo de adelantar requiere del cálculo de las siguientes variables:

- Tiempo de adelantamiento (PT), equivalente al tiempo de ocupación del carril izquierdo, asumiendo del modelo de aceleración constante hasta alcanzar la velocidad máxima, y después de alcanzarla a velocidad constante.
- Hueco (TC) o tiempo hasta la colisión con el vehículo opuesto, definido de forma análoga al hueco en el apartado de análisis. Se asume que la velocidad del vehículo opuesto es constante. En este cálculo se distinguen dos supuestos:
 - El vehículo opuesto es visible: se calcula como el tiempo transcurrido hasta el cruce con dicho vehículo, asumiendo las trayectorias del vehículo adelantante y la del opuesto
 - El vehículo opuesto no es visible: se genera un vehículo opuesto virtual situado a una distancia del adelantante igual al valor de la distancia de visibilidad disponible multiplicada por un factor de corrección $SDfactor$. Este vehículo virtual circula a una velocidad aleatoria, distribuida alrededor de la velocidad límite. Una vez generado el vehículo, el tiempo hasta el cruce se calcula de forma idéntica al caso anterior.
 - Tiempo hasta el fin de la zona de adelantamiento (TS): tiempo hasta rebasar la señal de prohibición de adelantamiento.

La introducción del factor $SDfactor$ pretende modelizar el comportamiento de los conductores que fue observado en el análisis, según el cual era mucho más probable aceptar un hueco en ausencia del vehículo opuesto visible.

Si el tiempo de adelantamiento (PT), sumándole un margen de seguridad $Safetymargin$ (definido por su mínimo, máximo, media y desviación estándar) es inferior al tiempo hasta la colisión (TC), y por otra parte, el tiempo de adelantamiento (PT) es inferior al tiempo hasta el final de la zona (TS), se decide adelantar, pasando a la siguiente etapa.

12.1.2.4. Ejecución

Una vez se ha decidido adelantar, el vehículo acelera a su máxima tasa de aceleración (definida por su distribución en Aimsun) hasta alcanzar la velocidad deseada (ya sea la velocidad deseada o el producto de dicha velocidad por el factor $PVSE$, tal como se explicó en anterior apartado).

La posibilidad de seguir adelantando o de abortar la maniobra es evaluada en cada paso de simulación. Para ello, en cada instante se calcula, además de PT y TC , una nueva variable:

- Tiempo para abortar (TA): es el tiempo necesario para que un vehículo decelere y regrese a su propio carril sin haber adelantado.

En el punto en el que TA es igual a PT se define la posición crítica o punto de no-retorno. En función de los valores de PT , TA , TC y $Safetymargin$, se definen las siguientes cinco opciones:

- La maniobra no ha sido completada pero no existe riesgo para ello, pues $PT + Safety\ margin < TC$. El vehículo adelantante continúa con la maniobra en la forma descrita: aceleración constante hasta velocidad máxima.
- La maniobra no ha sido aún completada, pero existe riesgo de colisión y todavía no se ha alcanzado la posición crítica: $PT + Safety\ margin > TC$ y $PT > TA$. El vehículo aborta la maniobra, volviendo al carril propio sin haber adelantado.
- La maniobra aún no ha sido terminada, pero existe riesgo de colisión moderado ($TC > 2 * Reaction\ time$) y ya se ha superado la posición crítica: $PT + Safety\ margin > TC$ y $PT < TA$. El vehículo continúa acelerando aunque se supere la velocidad máxima, para completar el adelantamiento.
- La maniobra aún no ha sido terminada, pero existe riesgo de colisión inmediato ($TC < 2 * Reaction\ time$) y ya se ha superado la posición crítica: $PT + Safety\ margin > TC$ y $PT < TA$. El vehículo continúa acelerando aunque se supere la velocidad máxima, forzando al adelantado a frenar para facilitar la incorporación.
- La maniobra ha sido terminada ($PT = 0$). El vehículo regresa a su carril y vuelve a su velocidad deseada, si se aplicó el factor $PVSE$.

Las distintas fases del modelo se resumen en la Figura 12-3.

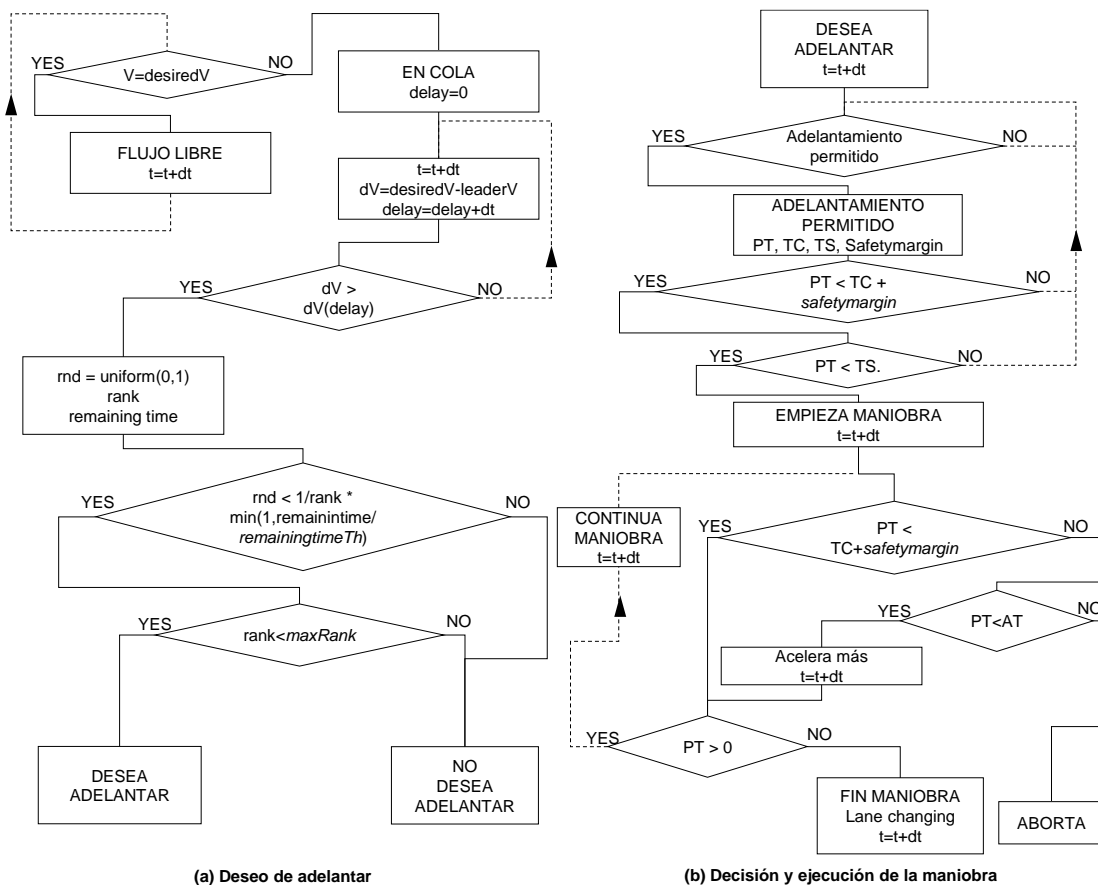


Figura 12-3. Diagrama de flujo

12.1.2.5. Parámetros

El modelo planteado contiene 14 nuevos parámetros, cuyo significado se ha ido desarrollando a lo largo de la explicación del modelo, y que se resumen en la Tabla 12-1.

Nivel de definición	Vehículo	Sección	Experimento
Parámetros existentes	<i>Vmax</i> θ <i>Amax</i> Deceleración normal	<i>Longitud</i> <i>Slimit</i>	<i>Reactiontime</i>
Parámetros específicos	<i>Safetymargin</i>	<i>MirrorsectionID</i> <i>ASD</i> <i>SDfactor</i>	<i>delayTh</i> <i>mindV</i> <i>maxdV</i> <i>maxRank</i> <i>maxSimul</i> <i>delaySimul</i> <i>RCF</i> <i>PVSE</i> <i>PVSETh</i> <i>remainingtimeTh</i>

Tabla 12-1. Parámetros del modelo de microsimulación

12.1.3. Calibración

El proceso de determinar si un modelo de simulación representa de forma adecuada el sistema objeto de estudio se consigue a través de la calibración y la validación (Barceló, 2010). El objetivo de la calibración es encontrar los valores de los parámetros del modelo que son válidos en un escenario concreto. Tras la calibración, la validación responde a la cuestión de si la simulación ofrece una representación precisa o no, comparando el modelo calibrado con otro conjunto de datos distintos al empleado en la calibración.

En este caso, la calibración se ha llevado a cabo en dos etapas o niveles. El primero de los pasos analizó las maniobras de adelantamiento de forma individual, para verificar que las decisiones de los conductores y la ejecución de los adelantamientos fuera realista. El segundo paso comparó las medidas macroscópicas del tráfico obtenidas en el microsimulador con las que habían sido observadas previamente.

12.1.3.1. Nivel microscópico

Para esta fase de calibración se emplearon los datos procedentes de la metodología dinámica, tanto en relación a la aceptación de huecos como en la caracterización de la trayectoria del vehículo adelantante. Se emplearon los datos del vehículo adelantado ligero y del vehículo adelantado pesado.

Además, la caracterización de las velocidades deseadas requirió el empleo de los datos obtenidos mediante el medidor láser de velocidad puntual. Teniendo en cuenta los escenarios de calibración macroscópica que se escogieron en el apartado posterior, se emplearon los datos de velocidad en flujo libre procedentes de la localización N-225, en la que la velocidad límite es de 100 km/h.

En esta etapa se persiguió obtener el valor del siguiente conjunto de parámetros:

- Máxima aceleración *Amax* (Vehículo).
- Velocidad deseada *Vmax* (Vehículo).
- Factor de aceptación de la velocidad θ (Vehículo).
- Factor de reducción del modelo de seguimiento *RCF* (Experimento).
- Factor de ampliación de la velocidad durante el adelantamiento *PVSE* (Experimento).

- Umbral para la ampliación de la velocidad durante el adelantamiento *PVSETh* (Experimento).
- Margen de seguridad para el adelantamiento *Safetymargin* (mínimo, máximo, media y desviación típica) (Vehículo).

El primer parámetro se obtuvo partir de los valores por defecto en Aimsun, pues su efecto no se limita al modelo de adelantamientos, sino al funcionamiento general del modelo. Los valores se resumen en la Tabla 12-2. El resto de parámetros se obtuvieron a partir de la comparación con los resultados de las observaciones. En este caso, las simulaciones se llevaron a cabo en un escenario formado por una única zona de adelantamiento de gran longitud.

Tipo de vehículo	Media (m/s ²)	Desviación típica(m/s ²)	Mínimo(m/s ²)	Máximo(m/s ²)
Ligero	4	0,2	3,60	4,40
Pesado	1	0,5	0,6	1,8

Tabla 12-2. Valores por defecto de la aceleración máxima

12.1.3.1.1. Velocidad deseada

En Aimsun, la velocidad deseada de un vehículo, escogida para circular en flujo libre, se obtiene a partir de la Ecuación 12-2.

$$V_{desired} = \min(V_{max}, \theta \cdot S_{limit}) \quad \text{Ecuación 12-2}$$

Donde:

- *Vmax*: máxima velocidad deseada.
- θ : Factor de aceptación de la velocidad máxima permitida.
- *Slimit*: Velocidad máxima permitida.

Para obtener los valores de estos parámetros se comparó la distribución de velocidades en flujo libre observada en una localización en la que la velocidad límite era igual a 100 km/h con la resultante de la formulación en Aimsun. Minimizando las diferencias existentes entre ambas distribuciones se obtuvieron los parámetros señalados.

Variable		Vehículo ligero	Vehículo pesado
<i>Vmax</i> (km/h) (lognormal)	Media	108	83
	Desviación típica	0,90 (escala logarítmica)	0,40 (escala logarítmica)
	Mínimo	70	50
	Máximo	150	95
θ (normal)	Media	1,05	1,00
	Desviación típica	0,20	0,05
	Mínimo	0,85	0,95
	Máximo	1,25	1,05
<i>Slimit</i> (km/h)		100 km/h	

Tabla 12-3. Parámetros de calibración de la velocidad deseada

Una vez realizada la simulación, se compararon las distribuciones resultantes, mediante el test K-S. Este test compara la máxima diferencia entre las distribuciones acumuladas de la muestra observada y de la simulada, sin tener en cuenta la normalidad o no-normalidad de las mismas. En este caso, dado que el p-valor fue de 0,678 en vehículos ligeros y de 0,6548 en vehículos pesados puede afirmarse, con un 95% de nivel de confianza, que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las distribuciones, tal como se observa en la Figura 12-4.

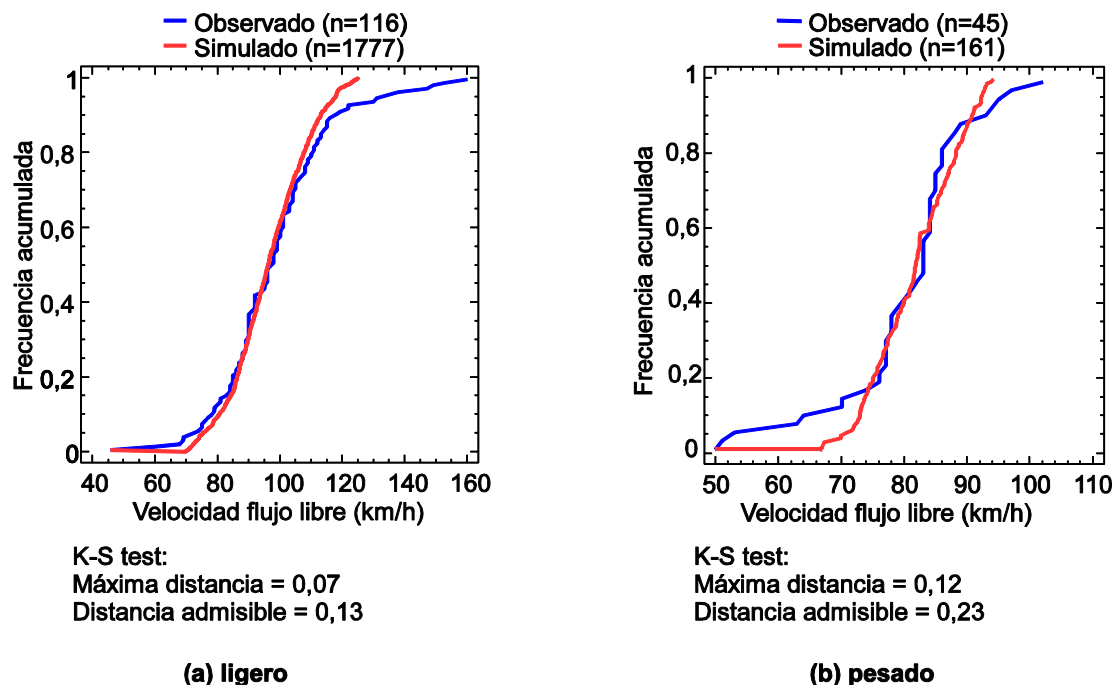


Figura 12-4. Velocidades deseadas simuladas y observadas

12.1.3.1.2. Tiempo de adelantamiento (PT)

El tiempo de adelantamiento es el tiempo de ocupación del carril izquierdo durante la maniobra de adelantamiento. Esta variable es una de las más importantes, en la medida que caracteriza el tiempo durante el cual se produce un conflicto potencial con el tráfico en sentido opuesto. Para la calibración de los siguientes parámetros se compararon, únicamente, maniobras simples:

- Máxima aceleración A_{max} (Vehículo).
- Factor de ampliación de la velocidad durante el adelantamiento $PVSE$ (Experimento).
- Umbral para la ampliación de la velocidad durante el adelantamiento $PVSETh$ (Experimento).
- Factor de corrección del modelo de seguimiento (RCF).

El valor de la aceleración máxima fue tomado, como ya se ha comentado, de los valores por defecto en Aimsun. En cuanto al factor de reducción del modelo de seguimiento (RCF), se detectó que un aumento en dicho valor suponía un importante aumento en el tiempo de la maniobra. El valor que minimizaba las diferencias entre el tiempo medio de adelantamiento observado y el simulado fue el de 0,65.

En cuanto al factor $PVSE$ y al umbral $PVSETh$, se observó que no tenían una influencia significativa en los tiempos de adelantamiento, por lo que se fijaron en los valores que representaban un comportamiento más próximo a la realidad. Teniendo en cuenta la velocidad del vehículo adelantante en el instante final de la maniobra, se seleccionó $PVSETh$ igual a 15 km/h, ya que solo el 5% de las maniobras concluían con velocidades relativas inferiores a 15 km/h. Por otra parte, se determinó que $PVSE$ tomaba el valor de 1,1, ya que, en localizaciones con un límite de velocidad de 100 km/h, solo el 5% de los conductores finalizaba la maniobra con una velocidad superior a 110 km/h.

En la Figura 12-5 se comparan las distribuciones de tiempos de adelantamientos simuladas y observadas. En el caso de vehículos ligeros, el test K-S concluyó que no existían diferencias significativas entre las distribuciones (p-valor igual a 0,377). En el caso de vehículos pesados, sin

embargo, sí se aprecian diferencias estadísticamente significativas, si bien es posible que se deban al hecho de que, en las observaciones, la longitud del vehículo adelantado siempre fue de 16,5 m, mientras que en la simulación esta variable adopta un rango más amplio acotado superiormente por 16,5 m.

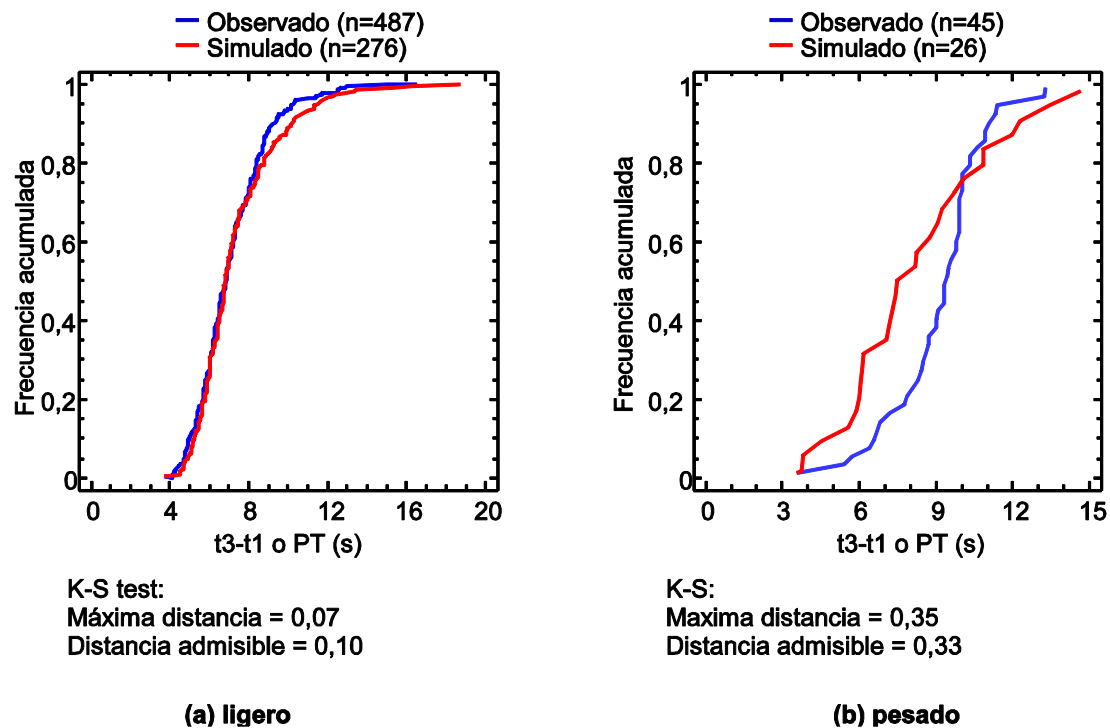


Figura 12-5. Tiempos de adelantamiento simulados y observados

12.1.3.1.3. Aceptación de huecos

El resultado observable de la fase de decisión de adelantamiento es la aceptación o rechazo de huecos. Un hueco se compone de la suma del tiempo de adelantamiento (PT) y del tiempo hasta el cruce con el vehículo opuesto (definido previamente como t_4-t_3). En este sentido, el parámetro *safetymargin* constituye, para cada vehículo (es decir, para cada conductor), el valor mínimo de tiempo t_4-t_3 que resulta aceptable para llevar a cabo el adelantamiento. Sin embargo, este valor crítico no puede ser medido directamente en la realidad. En el modelo planteado, esta variable se caracteriza por su media, su desviación típica y por sus extremos.

La comparación en la aceptación de huecos pretendía fijar los valores del parámetro *Safetymargin*. Partiendo de los resultados del análisis del estudio experimental, se prefijaron los valores extremos en un mínimo de 1 s y un máximo de 10 s.

Para la definición de los valores medios y de la desviación típica, se calibró un modelo de decisión binaria para los datos simulados, de la misma forma que se realizó para los observados en el apartado de análisis. Se empleó un modelo probit, siendo el hueco definido en unidades de tiempo.

Se empleó en primer lugar la muestra de maniobras con vehículo opuesto visible, tanto en la simulación como en las observaciones. Los valores de *Safetymargin* que minimizaban las diferencias entre el hueco crítico medio simulado y el observado (aquel con una probabilidad de aceptación de 0,5) fueron una media de 5 s y una desviación típica de 3 s. El valor de hueco crítico medio se situó en 17 s.

En el caso de maniobras sin vehículos opuesto visible el modelo probit aplicado sobre los datos experimentales proporcionó un valor de hueco crítico medio muy superior, igual a 26,5 s. Por este motivo, la introducción del factor *SDfactor* pudo recoger el comportamiento, a priori más arriesgado, de los conductores que adelantan sin presencia de vehículos opuestos. El valor de *SDfactor* se fijó en el cociente de huecos críticos, igual a 1,75.

12.1.3.2. Nivel macroscópico

Para la calibración a nivel macroscópico se escogieron cuatro zonas de adelantamiento de distintas longitudes, en dos niveles de tráfico distintos.

La calibración se realizó considerando por separado cada una de las cuatro zonas. Las cuatro zonas se sitúan en la carretera N-225. En la Tabla 12-4 se resumen las características de los ocho escenarios. Estos abarcan longitudes de zona de adelantamiento de entre 265 y 1270 m, así como dos situaciones de tráfico distintas, cuyas intensidades direccionales fueron de 140 y 335 veh/h.

Escenario 1: laborable						
Zona	Longitud de zona	Intensidad horaria (veh/h) (media)	Reparto	%Pesados (media)	% vehículos en cola (media)	Visibilidad al final de la zona (m)
Z1	505	140	50/50	21%	26%	400
Z2	265				26%	250
Z3	1270				26%	300
Z4	1050				26%	250
Escenario 2: domingo						
Zona	Longitud de zona	Intensidad horaria (veh/h) (media)	Reparto	%Pesados (media)	% vehículos en cola (media)	Visibilidad al final de la zona (m)
Z1	505	335	50/50	2%	51%	400
Z2	265				51%	250
Z3	1270				51%	300
Z4	1050				51%	250

Tabla 12-4. Escenarios de calibración

Los datos empleados en la calibración a nivel macroscópico fueron obtenidos mediante la metodología estática y fueron los volúmenes de tráfico, los porcentajes de vehículos en cola y el número de adelantamientos.

Este análisis usó un intervalo de agregación temporal de 15 min, siguiendo lo establecido en el Manual de Capacidad de Carreteras (Transportation Research Board, 2010). Los parámetros del modelo de adelantamiento que deben determinarse son los siguientes:

- *maxRank.*
- *maxSimul.*
- *remainingtimeTh.*
- *maxdV.*
- *mindV.*
- *DelayTh.*

En España, dado que no se permite adelantar a un vehículo que ya está siendo adelantado, no se contempla la posibilidad de adelantamientos simultáneos, por lo que *maxSimul* tomó el valor de uno. Igualmente, dada la baja frecuencia de maniobras múltiples, se definió el valor de *maxRank* como uno. Por último, dado que la calibración se realizó en zonas de adelantamiento aisladas, no se pudo tener en cuenta el efecto del tiempo hasta el final de la carretera, fijando el valor de *remainingtimeTh* en cero.

12.1.3.2.1. Número de replicaciones

En un modelo de microsimulación, tal como se ha descrito, la mayoría de variables de entrada son valores aleatorios dentro de una distribución predefinida. Una replicación es la simulación de un escenario tomando un conjunto de valores particulares de las variables aleatorias. Para caracterizar el comportamiento del sistema representado, es necesario un cierto número de replicaciones o semillas aleatorias. El comportamiento resultante se caracterizará por la agregación o la media de todas las replicaciones.

El número mínimo de replicaciones necesario depende de la variabilidad de los resultados, siendo más elevado cuanto mayor sea dicha variabilidad, del mismo modo que el tamaño de una muestra depende de la variabilidad hallada en la población. Para aproximarse al número de replicaciones necesarias se aplicó la fórmula que determina el tamaño de una muestra asumiendo que la población se distribuye de forma normal.

En primer lugar se cuantificaron los errores máximos esperables en las observaciones que se emplearon en la calibración, tal como se muestra en la Tabla 12-5. Posteriormente, con el objetivo de error especificado, inferior al obtenido en la muestra experimental, se estimó el mínimo número de replicaciones, tal como aparece en la Tabla 12-6. La variabilidad de los datos simulados se caracterizó por la desviación típica de una muestra inicial de 10 replicaciones.

Variable		Intensidad de tráfico en 15 min (veh/15min)	Porcentaje de vehículos en cola en 15 min (%)	Adelantamientos/h
Tamaño de muestra observada	Laborable	47		
	Domingo	19		
Máximo error relativo obtenido en las observaciones		8%	9%	17% (6 maniobras/h)

Tabla 12-5. Errores máximos obtenidos en las muestras observadas

Variable		Intensidad de tráfico en 15 min (veh/15min)	Porcentaje de vehículos en cola en 15 min (%)	Adelantamientos/h
Error admisible		5%	5%	4 maniobras/h
Replicaciones	Laborable	15	15	4
	Domingo	6	6	15

Tabla 12-6. Número mínimo de replicaciones para alcanzar el error objetivo

Tras este análisis, se fijó el número de replicaciones en 15.

12.1.3.2.2. Demanda

Los vehículos que entran en la carretera simulada lo hacen con intervalos generados a partir de una función exponencial dependiendo del volumen medio de tráfico. Cuando el intervalo generado es muy pequeño, los vehículos entran en la carretera en cola. En consecuencia, el número de vehículos que entran en la red es aleatorio y se centra en el valor asignado por el usuario.

En el primer paso de la calibración a nivel macroscópico se compararon los volúmenes de tráfico direccionales en periodos de 15 min simulados con los correspondientes observados. El test K-S

mostró la ausencia de diferencias estadísticamente significativas en las distribuciones de volúmenes de tráfico, al 95% de nivel de confianza (p -valor de 0,643 y de 0,507, en día laborable y en domingo, respectivamente).

12.1.3.2.3. Formación de colas

La dispersión de velocidades origina la formación de colas en carreteras convencionales. El porcentaje de vehículos en cola que entra en una zona de adelantamiento condiciona su funcionamiento y depende de las características del tráfico y de la carretera aguas arriba de la sección considerada. En este proceso de calibración, al tratar zonas de adelantamiento aisladas, se forzó la entrada de vehículos con los mismos porcentajes de vehículos en cola que en las condiciones observadas.

Para ello, antes de cada una de las zonas de adelantamiento simuladas se definió una zona de adelantamiento de una longitud tal que generara el porcentaje de vehículos en cola deseado. En este caso, las longitudes fueron de 2300 m para el volumen de tráfico de días laborables y de 2800 para el volumen de tráfico de domingo. Con estas longitudes, el test K-S mostró la ausencia de diferencias estadísticamente significativas en las distribuciones de porcentajes de vehículos en cola agregados en 15 min. (p -valor de 0,133 y 0,070, en día laborable y domingo, respectivamente).

El criterio de cola empleado fue el de tener un intervalo menor a 3 s, tal como se especifica en el Manual de Capacidad de Carreteras (Transportation Research Board, 2010).

12.1.3.2.4. Adelantamientos

Con los pasos anteriores, se ha generado un flujo de tráfico de idénticas condiciones al observado, a la entrada de las zonas de adelantamiento. Por otra parte, los parámetros ajustados en la calibración a nivel microscópico dieron lugar a una representación realista de maniobras de adelantamiento, a nivel individual.

En este apartado se fijaron los valores del modelo de deseo de adelantamiento que mejor reproduzcan el número de adelantamientos en cada una de las zonas. Estos parámetros eran $maxdV$, $mindV$ y $DelayTh$. Para ello, se realizó una comparación en el número de adelantamientos en periodos de agregación de una hora. La gran variabilidad de esta variable ha motivado su agregación en periodos de mayor duración que las anteriores.

Solo las maniobras completadas forman parte de este análisis. Las maniobras abortadas, que representaron menos del 1% de los casos, tanto en la simulación como en la realidad, no se consideraron. Para obtener el conjunto de valores de los parámetros que mejor aproximan el modelo a la realidad se calculó el error cuadrático medio de cada una de las combinaciones de parámetros. Un total de 27 casos ($3 \times 3 \times 3$) se calcularon variando $mindV$ entre 5 y 15 km/h, $maxdV$ entre 30 y 40 km/h y $DelayTh$ entre 180 y 300 s.

El error cuadrático medio se calculó mediante la Ecuación 12-3.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (NP_{obs,i} - NP_{sim,i})^2}{N}}$$

Donde:

- $NP_{sim,i}$: número de adelantamientos en el escenario simulado i .
- $NP_{obs,i}$: número de adelantamientos en el escenario observado i .
- N : número de escenarios de calibración.

En la Figura 12-6 se muestra la variación del RMSE en función de cada uno de los parámetros considerados.

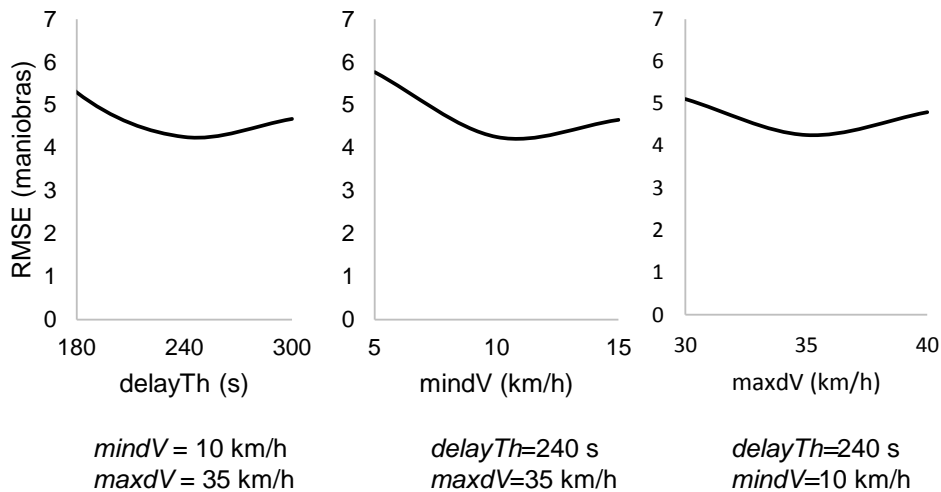


Figura 12-6. Calibración de los parámetros del deseo de adelantar

Como resultado, los valores escogidos fueron $delayTh = 240$ s, $mindV = 10$ km/h y $maxdV = 35$ km/h. El $RMSE$ fue de 4,2 maniobras de adelantamiento.

12.1.4. Validación

El objetivo de la validación es el de aplicar el modelo calibrado a otros escenarios distintos, para verificar la capacidad del modelo para representar una variedad de situaciones, y no únicamente aquellas para las que fue calibrado.

El proceso de validación, en este caso, se realizó en cuatro zonas adicionales, en las que se llevó a cabo el estudio experimental mediante la metodología estática. Las zonas se caracterizaban por su bajo volumen de tráfico (Z7), alto volumen de tráfico (Z5), reducida longitud (Z8) o gran longitud (Z6). Además, tenían distintos valores del reparto por sentidos, del porcentaje de vehículos en cola a la entrada y del porcentaje de pesados.

Zonas	Características						
	Intensidad horaria media (veh/h)	Reparto medio	%Pesados medio	%vehículos en cola medio	Visibilidad disponible al final de la zona (m)	Longitud de zona (m)	Velocidad máxima (km/h)
Z5 (en T6)	314	42/58	6%	29%	200	895	80
Z6 (en T2)	164	52/48	18%	34%	550	1765	100
Z7 (E7)	70	50/50	16%	30%	200	540	90
Z8 (E3)	145	50/50	16%	28%	200	265	100

Tabla 12-7. Escenarios de validación

Zonas	Resultados de validación		
	Número de maniobras observado (adelantamientos/h)	Número de maniobras simulado (adelantamientos/h)	Diferencia
Z5 (en T6)	5.6	2.8	2.8
Z6 (en T2)	25.0	23.4	1.6
Z7 (E7)	1.0	0.5	0.5
Z8 (E3)	0.5	1.1	-0.7
	RMSE		1.6

Tabla 12-8. Resultados de la validación

Una vez generados los flujos de entrada, y las longitudes de adelantamiento prohibido que daban lugar al mismo porcentaje de vehículos en cola a la entrada de las zonas, se obtuvo el número de adelantamientos en periodos de una hora. Se realizaron 15 replicaciones, obteniendo un error cuadrático medio en todas las localizaciones de 1,6 adelantamientos, muy inferior al obtenido en la calibración.

12.1.5. Conclusiones del desarrollo de un modelo de microsimulación

Las principales innovaciones del desarrollo de este modelo de adelantamientos y de la modificación del modelo de seguimiento, basadas en la observación de maniobras, fueron las siguientes:

- Función global de deseo de adelantar que incluye el tiempo en cola y la diferencia de velocidades respecto de la velocidad deseada.
- Efecto de la distancia de visibilidad disponible limitada en la aceptación de huecos (decisión) y en la ejecución de la maniobra, provocando un comportamiento más conservador cuando el vehículo opuesto es visible.
- Posibilidad de superar la velocidad deseada durante el adelantamiento.
- Efecto de reducción del deseo de adelantar cuando el tiempo hasta el final de la carretera es reducido.
- Efecto de reducción del deseo de adelantar para adelantamientos múltiples.
- Factor de reducción de la distancia de seguimiento cuando se desea adelantar.

La calibración del modelo permitió ajustar el valor de la mayor parte de parámetros, mostrando una representación realista del fenómeno, tanto a nivel individual como a nivel agregado. La validación confirmó la aplicabilidad del modelo a una amplia variedad de escenarios.

Las limitaciones de este apartado se hallan en la ausencia de un método de calibración automática, que optimice todavía más la selección de los parámetros, y lo haga de forma simultánea. Además, la consideración de segmentos más largos permitirá mejorar la calibración de los parámetros, incluyendo los relacionados con la demora y con el tiempo hasta el final de la maniobra.

12.2. Criterios de distancia de visibilidad

A partir de los resultados de la tesis, en este sub-apartado se evaluaron los niveles de riesgo asociados a los criterios existentes de diseño y señalización de zonas de adelantamiento. Para ello, se estudió la probabilidad de no-cumplimiento obtenida mediante el análisis de fiabilidad realizado anteriormente.

Posteriormente, se establecieron las bases metodológicas para la formulación de un criterio único para el establecimiento de zonas de adelantamiento, de aplicación en las condiciones y en el ámbito geográfico en el que se ha desarrollado todo el estudio.

Tal como se ha definido a lo largo del estudio, la distancia de visibilidad de adelantamiento es la distancia necesaria para llevar a cabo una maniobra de forma segura y cómoda, teniendo en cuenta la posible aproximación de un vehículo en sentido opuesto. Disponiendo de una visibilidad superior a la distancia de visibilidad de adelantamiento en un segmento de la carretera, es posible establecer en él una zona de adelantamiento.

12.2.1. Visibilidad necesaria

La distancia de visibilidad de adelantamiento necesaria para completar la maniobra no es constante durante toda ella, sino que va decreciendo conforme se avanza a lo largo de la maniobra. Por otra parte, teóricamente es posible abortar la maniobra, para lo cual también es necesario disponer de una distancia de visibilidad, que es nula al iniciar la maniobra y sería máxima cuando está finalizada.

Este estudio desarrolló un modelo de adelantamiento que describe con detalle la evolución del vehículo adelantante. Con ello, se pudo conocer la distancia de visibilidad necesaria en cada una de las fases de la maniobra. Sin embargo, apenas se observaron maniobras abortadas, por lo que no existe un modelo válido de deceleración y regreso al carril propio sin completar la maniobra. Desde un punto de vista teórico, se definieron tres posibles localizaciones alternativas de la posición crítica o punto de no retorno.

A continuación, se muestra la evolución de la distancia de visibilidad media necesaria a lo largo de la ocupación del carril izquierdo. Los valores mostrados se corresponden con las condiciones medias de toda la muestra. En la Figura 12-7 se observa la distancia de visibilidad en los cinco instantes principales de la maniobra: inicio de la maniobra o t_1 , posición "head to tail" (t_1'), posición en paralelo (t_2), posición "tail to head" (t_2') y finalización de la maniobra (t_3).

En la Figura 12-8, por su parte, se representan los perfiles de distancia de visibilidad necesaria considerando tres posibles posiciones críticas: en t_1' , en t_2 y en t_2' . Dado que no se observaron maniobras abortadas, fue más razonable asumir que la posición crítica se encontraría en fases muy tempranas de la maniobra. En este sentido, se asumió que el instante t_1 , en el que todavía no se ha iniciado la maniobra, sería considerado como la posición crítica más conservadora posible para la aplicación de los criterios de distancia de visibilidad. Esta figura recuerda a la representación teórica que se analizó en el capítulo de estado del arte (Figura 3-9).

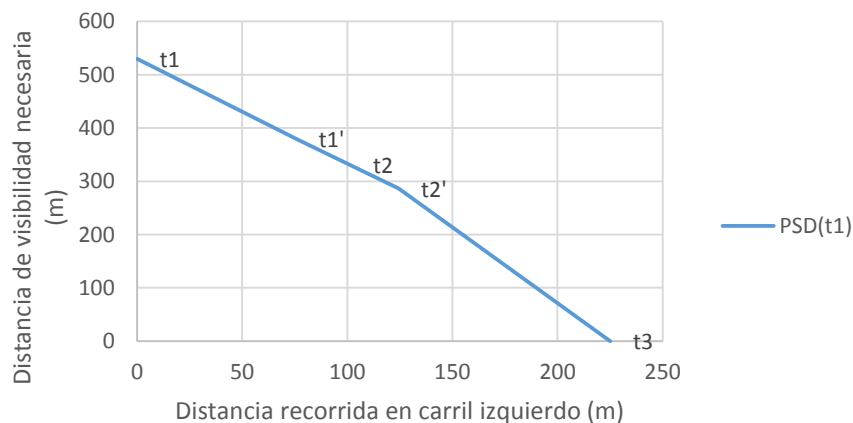


Figura 12-7. Distancia de visibilidad para completar el adelantamiento

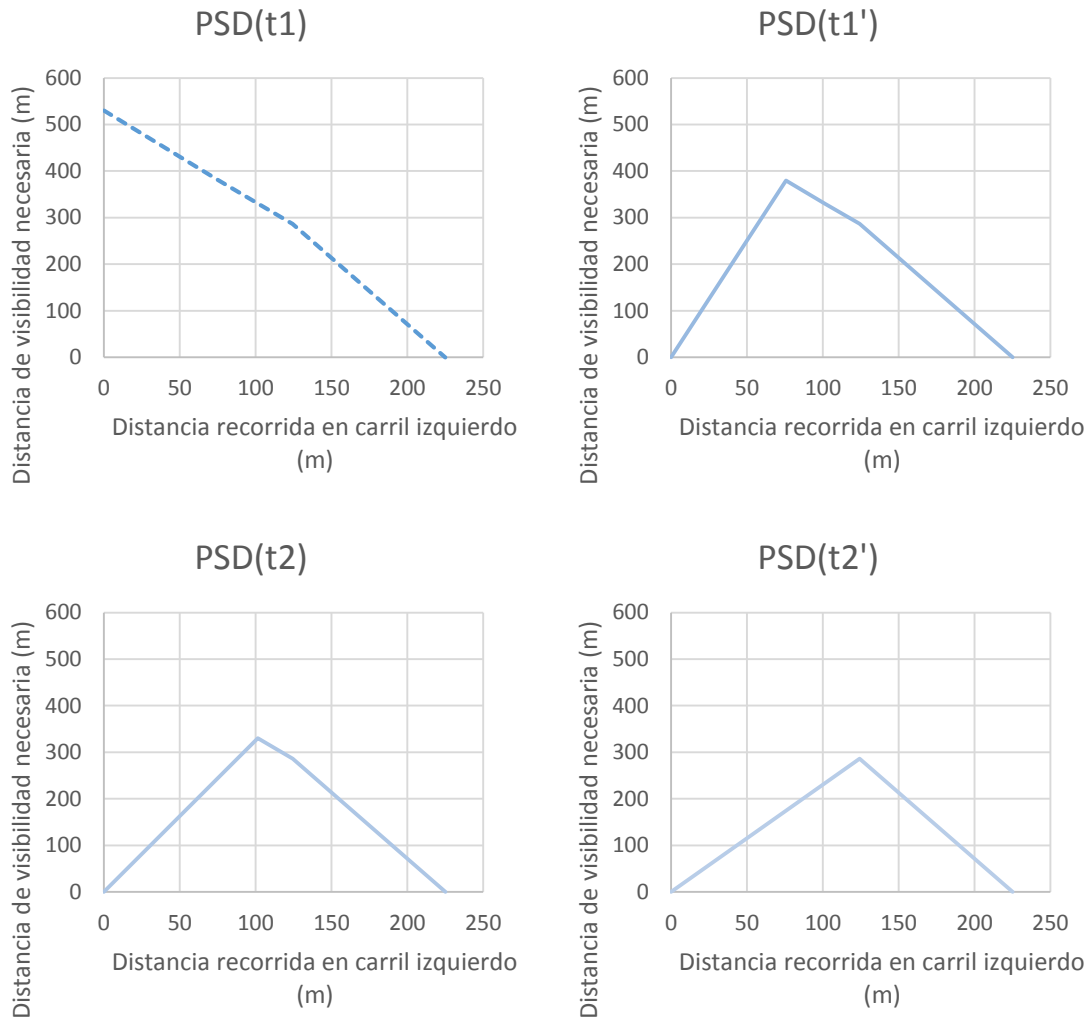


Figura 12-8. Distancia de visibilidad desde la posición crítica "head to tail" PSD(t1'), en paralelo PSD(t2) y "tail to head" PSD(t2')

12.2.2. Visibilidad disponible

Una vez obtenidos los perfiles de visibilidad necesaria, el establecimiento de zonas de adelantamiento se obtiene de la comparación de la visibilidad necesaria con la disponible (llamadas oferta y demanda en el análisis de fiabilidad).

En general, la visibilidad disponible se define como la máxima distancia, medida sobre el eje de la carretera, que el conductor es capaz de observar sin interrupción al conducir por la misma. La visibilidad está limitada por diversos elementos propios de la carretera, como la propia geometría o elementos de señalización y balizamiento, o del entorno, como taludes, vegetación o edificaciones.

Considerando el rango de valores de distancia de visibilidad de adelantamiento, las zonas de adelantamiento se sitúan en elementos rectos o en curvas de radio amplio, en las que las visibilidades se mantienen en valores relativamente elevados, en contraposición a las curvas de radio reducido, en las que la visibilidad es generalmente inferior.

En este sentido, para el estudio de la visibilidad disponible, se asumieron dos modelos simplificados de zona de adelantamiento: la zona en recta y la zona en curva. Estos modelos simplificados describen las características de las zonas de adelantamiento empleando dos parámetros geométricos: la visibilidad al inicio de la zona y la longitud de la zona de adelantamiento.

El perfil de visibilidad de las zonas de adelantamiento en recta se asemeja al de la Figura 12-9. La visibilidad aumenta de forma brusca en el momento en el que el conductor puede observar la totalidad del tramo recto, y decrece de forma lineal con pendiente igual a menos uno, ya que el punto visible más alejado se mantiene prácticamente en la misma posición al final de la recta. El perfil de visibilidad es más tendido en el momento en el que el conductor se acerca a la curva, pero el final de la zona se sitúa, en general, bastante antes de llegar a la curva.

Del total de tramos de carretera en los que llevó a cabo el estudio mediante el vehículo instrumentalizado, este perfil de visibilidad simplificado era adecuado en la gran mayoría de las zonas de adelantamiento en rectas en planta y en alzado, o rectas en planta con acuerdos cóncavos que no restringen la visibilidad.

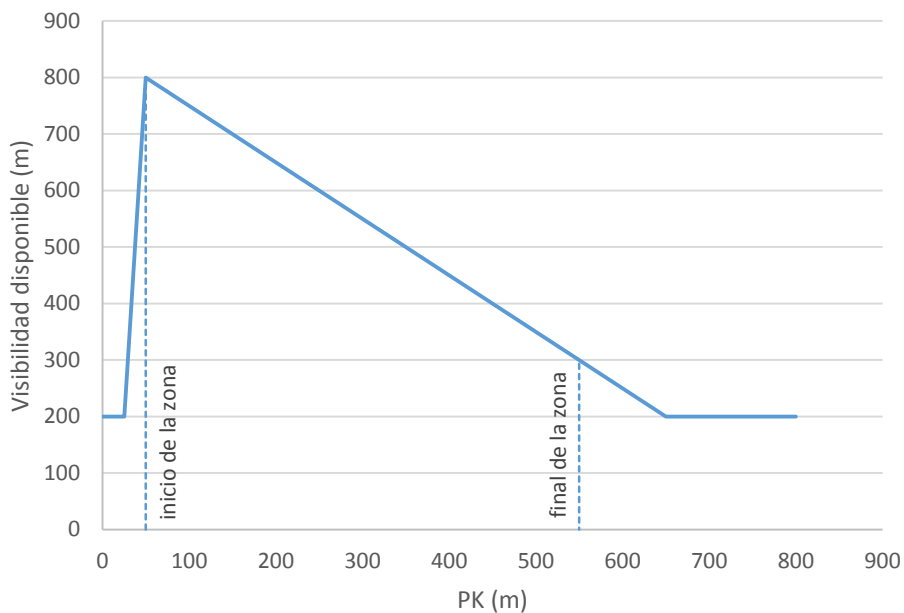


Figura 12-9. Perfil de visibilidad en zona de adelantamiento en recta

El perfil de visibilidad disponible de una zona de adelantamiento completamente contenida en una curva (ya sea en planta o en alzado) se asemeja al representado en la Figura 12-10. Este perfil es el correspondiente a una curva larga, por lo que la visibilidad es constante.

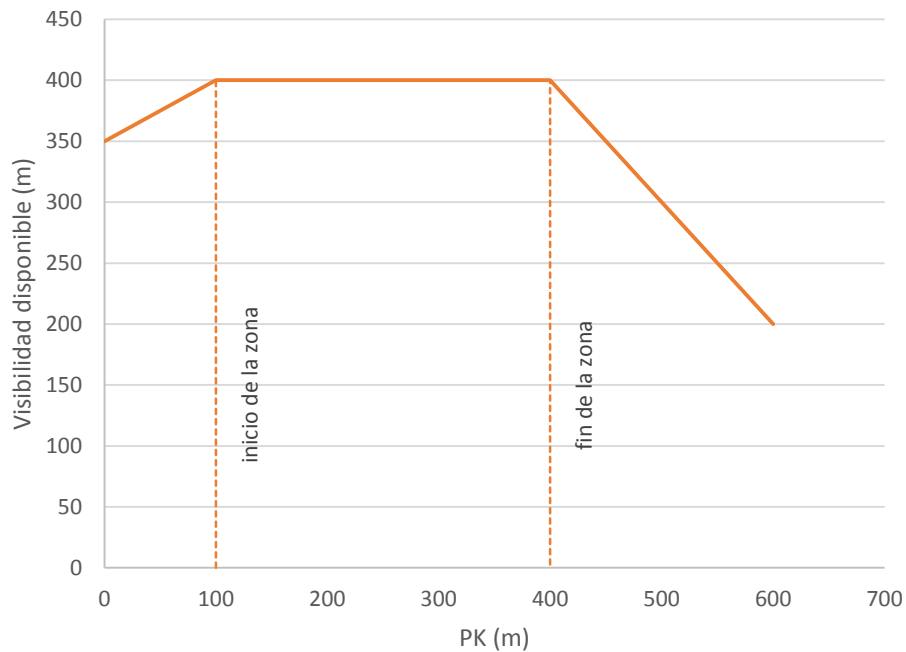


Figura 12-10. Perfil de visibilidad en zona de adelantamiento en curva

12.2.3. Probabilidad de no-cumplimiento

Los modelos deterministas, en los que se basan la gran mayoría de normativas, tanto en España como a nivel internacional, proporcionan valores fijos de las distancias de visibilidad necesarias para adelantar. De acuerdo a esta aproximación, la evaluación del nivel de riesgo sería una simple comparación de dos valores, de modo que si la visibilidad disponible en la zona más pequeña (la de menor visibilidad y la de menor longitud de zona) fuera superior a la necesaria, el criterio debería considerarse seguro. De este modo, para cada uno de los dos tipos de geometría de zona de adelantamiento, se debe verificar que el perfil de visibilidad necesaria está por debajo del perfil de visibilidad disponible.

La comparación entre la visibilidad disponible y la requerida permite establecer los criterios de distancia de visibilidad mínima y de longitud mínima de la zona. Tal como se muestra en la Figura 12-11 esta comparación proporciona también la distancia de visibilidad mínima al final de la zona.

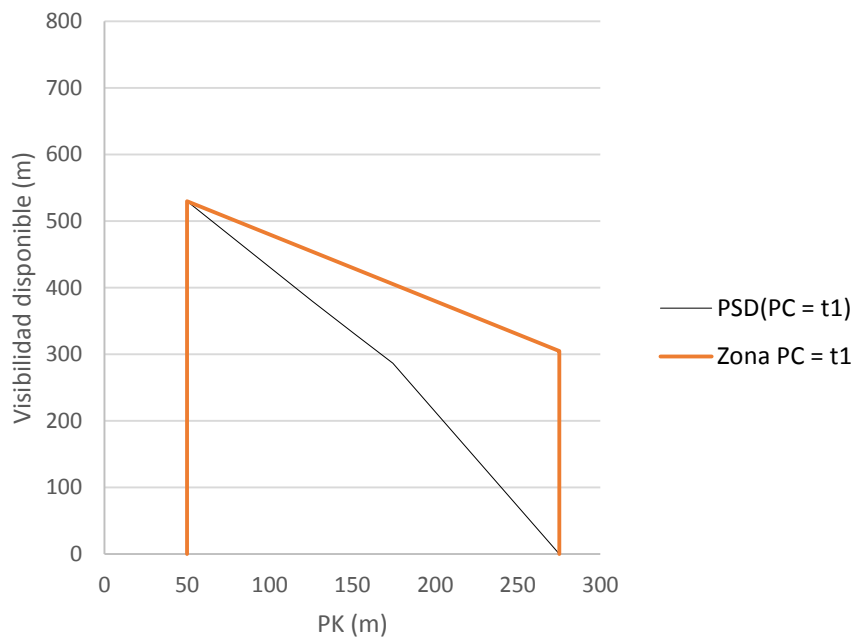


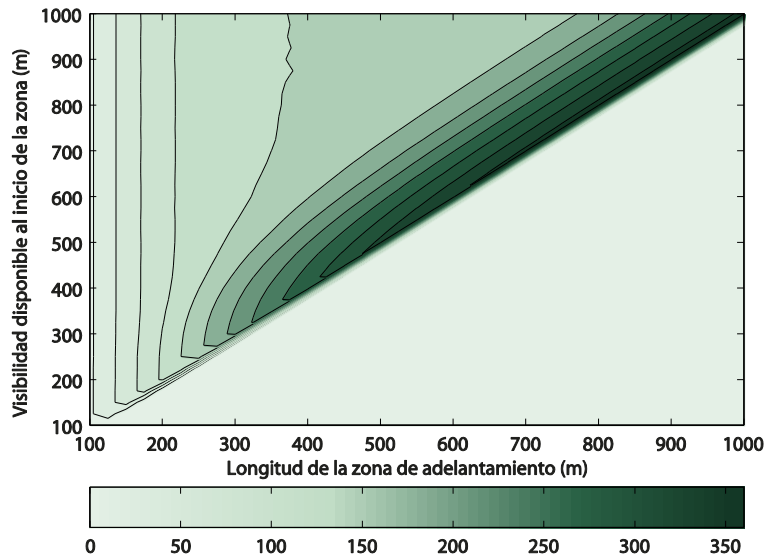
Figura 12-11. Zona de adelantamiento mínima en recta

Sin embargo, este planteamiento determinista no es suficiente para la formulación de criterios seguros, o para evaluar el riesgo asumido por los existentes, pues no tiene en cuenta la distancia entre el valor de visibilidad disponible y el valor de visibilidad necesaria. Al situarse a unos pocos metros del mismo, no hay una gran diferencia en cuanto al riesgo existente. En cambio, una aproximación determinista llegaría a la conclusión de que el criterio es adecuado (o inadecuado), al estar el valor geométrico por encima (o por debajo) del umbral.

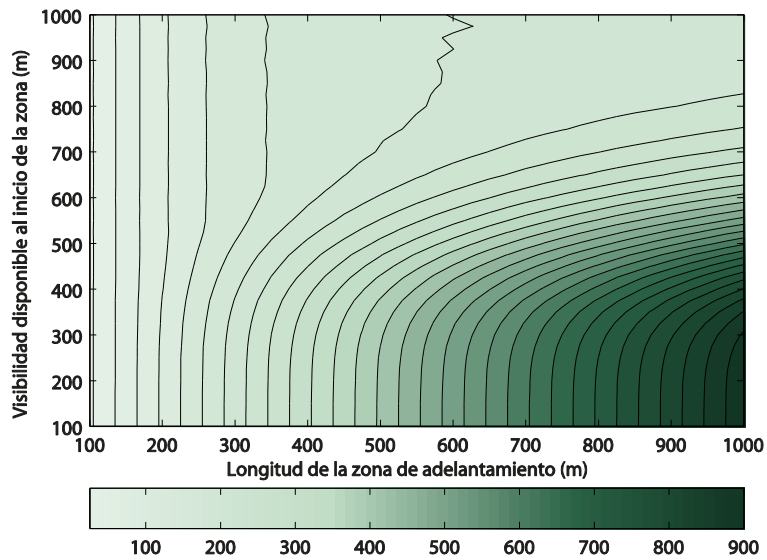
Por este motivo, los resultados del presente trabajo se encaminaron a la definición y calibración de modelos probabilísticos, que permitieron conocer, para cada valor de visibilidad necesaria, la probabilidad de ocurrencia. De este modo, al comparar los criterios de distancia de visibilidad de adelantamiento con los modelos probabilísticos resultantes, se caracterizó la probabilidad de no-cumplimiento, en lugar de únicamente el propio cumplimiento. Por lo tanto, el volumen y la fiabilidad de la información que se dispuso fueron mucho mayores en el caso de la formulación probabilística.

El análisis del nivel de riesgo de una zona de adelantamiento obligó a considerar de forma conjunta la probabilidad de no-cumplimiento en cada una de las fases de la maniobra, y no únicamente al inicio de la maniobra. Para ello, se evaluaron las probabilidades de no-cumplimiento resultantes del análisis de fiabilidad, en cada una de las etapas de la maniobra, concretamente, en los instantes $t1$, $t1'$ y $t2'$. Además, se verificó que la maniobra pudiera completarse dentro de la zona, sin rebasar la prohibición de adelantamiento.

Además, dado que las maniobras de adelantamiento pueden iniciar en cualquier punto dentro de la zona de adelantamiento, el estudio de la probabilidad de no-cumplimiento debe extenderse a toda la longitud de la zona. Por este motivo, se empleó la integral de la función de la probabilidad de no-cumplimiento (definida anteriormente como pf) a lo largo de una zona de adelantamiento, variable que ya había sido definida en el capítulo de análisis de seguridad vial.



(a) zona recta, sin posición crítica



(b) Zona curva, sin posición crítica

Figura 12-12. Integral de la probabilidad de no-cumplimiento, en función de la longitud de zona y de la visibilidad al inicio

En la Figura 12-12 se muestran los distintos niveles de la variable integral de la probabilidad de no-cumplimiento (pf), ya definida en el apartado del análisis de fiabilidad. El eje X representa la longitud de la zona y el eje Y la visibilidad disponible al inicio de la misma. El plano de la figura recoge distintas geometrías de zona y no solo las condiciones más estrictas. En zonas rectas no es posible que la visibilidad al inicio supere a la longitud de la zona, por lo que la diagonal delimita el rango de aplicación. De este modo, la gráfica muestra los niveles de riesgo existentes en zonas de un amplio de rango de longitudes y de visibilidades.

En las gráficas de contorno, los colores oscuros reflejan los valores más altos de dicha variable. En el caso de zonas rectas, la probabilidad de no-cumplimiento (pf) es máxima en el entorno de la recta en la que se iguala la longitud de zona y visibilidad al inicio, lo cual representaría a zonas con una distancia de visibilidad disponible al final igual a cero (teóricamente). En zonas curvas, los máximos se alcanzan con visibilidades disponibles bajas y longitudes altas, al disponer de largos tramos con visibilidades restringidas.

Por su parte, en los resultados del análisis de seguridad vial, se advirtió que la variable que mayor efecto tenía en el número de accidentes asociados a maniobras de adelantamiento, era la integral del producto de probabilidad de aceptación de huecos y probabilidad de no-cumplimiento ($paxpf$), pues incluía, tras una observación del fenómeno, la frecuencia con la que se llevan a cabo las maniobras. Siguiendo este mismo planteamiento, se calculó el valor de dicha integral, pero además teniendo en cuenta la probabilidad de no-cumplimiento por rebase de la prohibición de adelantamiento, algo razonable teniendo en cuenta que se está evaluando un criterio de diseño o señalización. Esta variable no solo recoge la proporción de maniobras que no satisfacen el criterio, sino la cantidad de fallos por volumen de tráfico.

En la Figura 12-13 se observan los distintos niveles del valor promedio de dicha variable ($paxpf$), desde los más bajos (en color claro) hasta los más altos (en color oscuro), todo ello en función de la longitud de una zona de adelantamiento y de la visibilidad disponible al inicio.

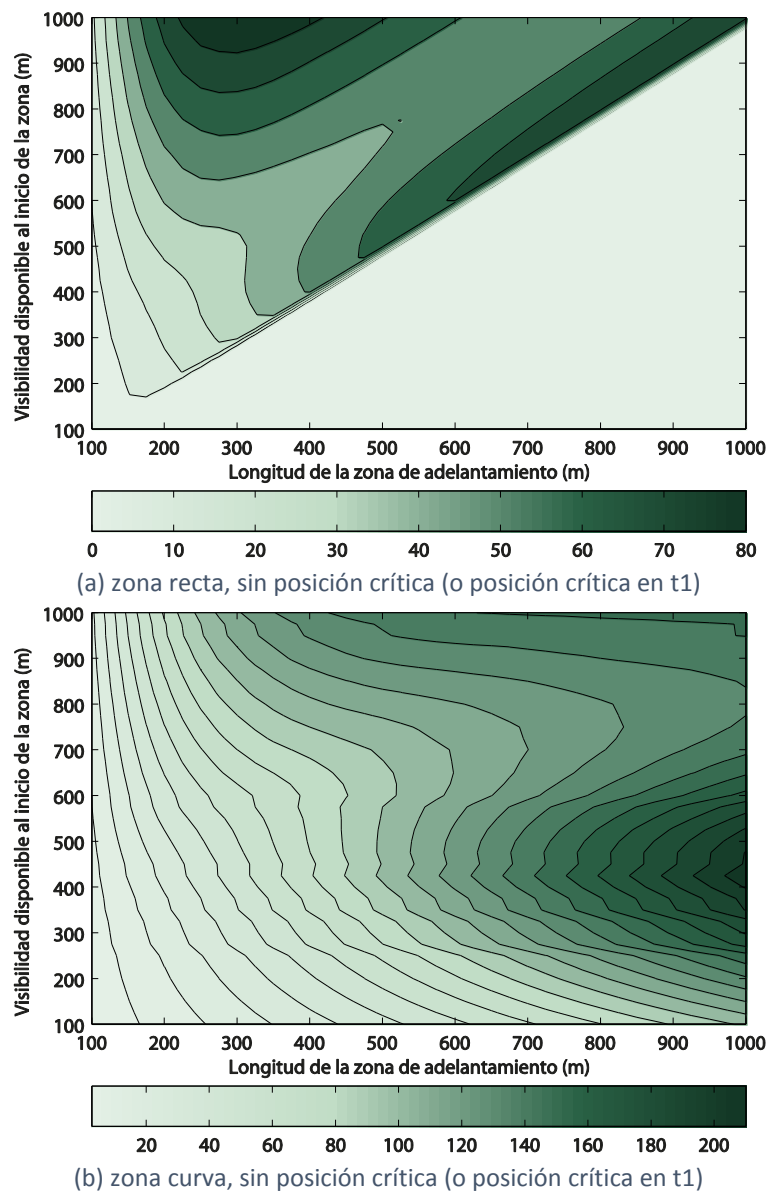
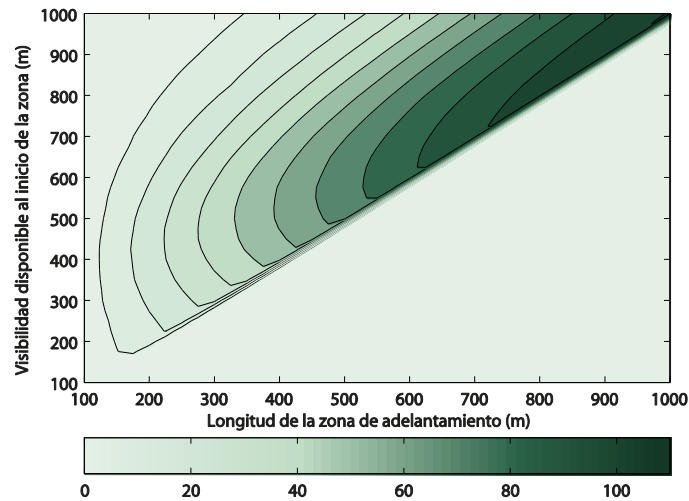


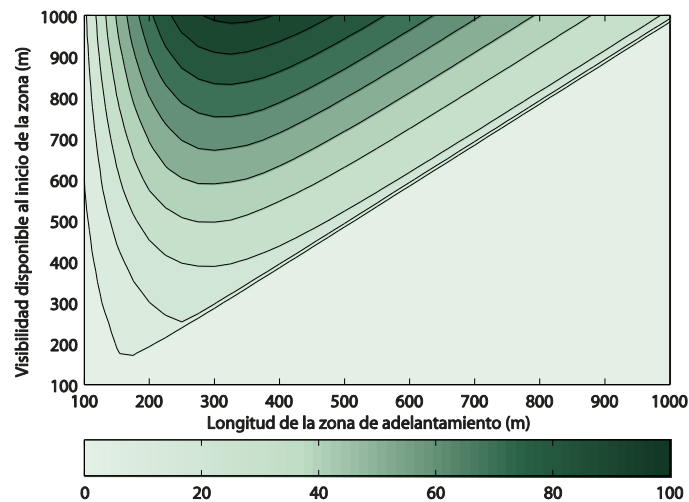
Figura 12-13. Integral del producto de la probabilidad de no-cumplimiento y la probabilidad de aceptar un hueco, en función de la longitud de zona y de la visibilidad al inicio

El fallo recogido en el valor de la integral del producto de probabilidades ($paxpf$) puede deberse tanto al rebase de la prohibición de adelantar como a una potencial colisión con un vehículo que

se aproximara en sentido opuesto. Tal como se observa en la Figura 12-14, ejemplificado para una zona en recta, el mayor riesgo por colisión con el vehículo opuesto se situaría en el caso de que la distancia de visibilidad al final de la zona fuera muy reducida (zona próxima a la diagonal de la gráfica), mientras que el mayor riesgo asociado al rebase de la prohibición de adelantar se sitúa en zonas muy cortas pero que disponen de visibilidad suficiente.



(a) fallo por colisión con el opuesto



(b) fallo por rebase de la prohibición de adelantar

Figura 12-14. Descomposición de $paxpf$, en el caso de una zona recta

12.2.4. Análisis de sensibilidad

El efecto de las características geométricas de una zona de adelantamiento (principalmente la visibilidad disponible, tanto al inicio como al final, y la longitud de la zona) en los indicadores de seguridad presentados (integral de la probabilidad de no-cumplimiento, pf y la integral del producto de la probabilidad de no-cumplimiento por la de aceptación de huecos, $paxpf$) se estudió a partir de un análisis de sensibilidad.

Además, se tuvieron en cuenta otros factores, como el tipo de vehículo adelantado (ligero o pesado) o la velocidad de diseño.

12.2.4.1. Zona en recta

En el caso de zonas de adelantamiento situadas en tramos rectos, la relación entre la longitud de la zona de adelantamiento y la visibilidad al final de la misma permitió identificar las siguientes tendencias, tal como se observa en la Figura 12-15:

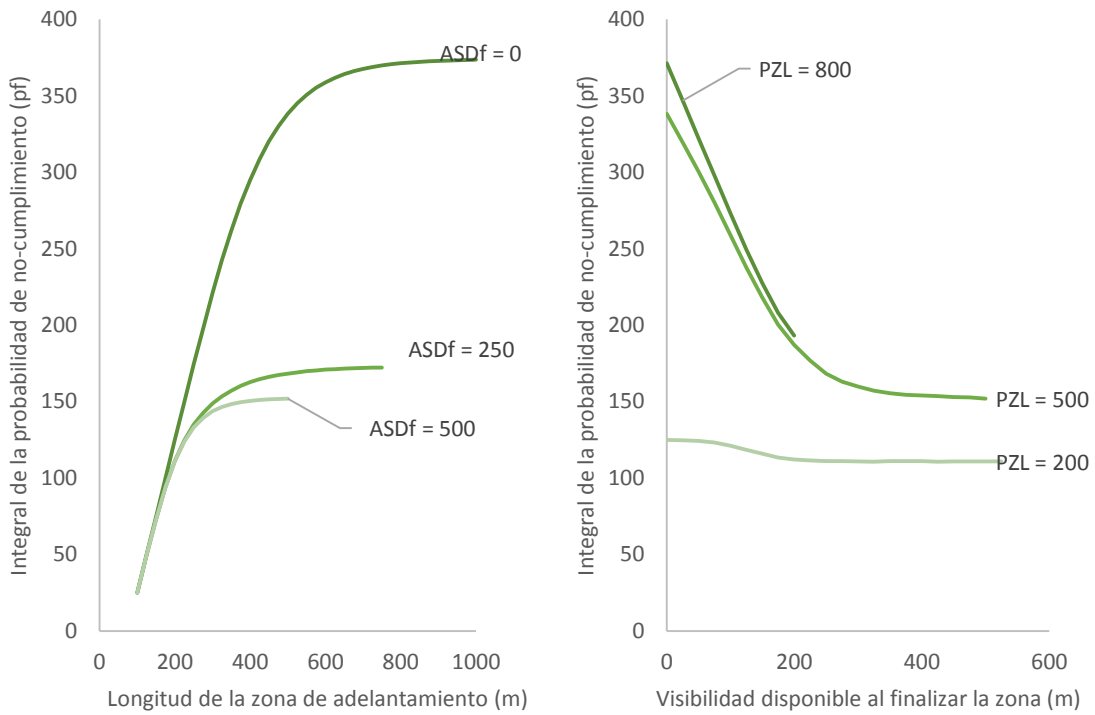
- Cuando la visibilidad al final de la zona es inferior a 250 m, la integral de la probabilidad de no-cumplimiento (pf) es mayor, especialmente en zonas largas. Cuando la visibilidad al final de la zona es superior a 250 m, no hay una variación significativa de la integral de la probabilidad de no-cumplimiento.
- En zonas de adelantamiento medias y largas, el valor de la integral del producto de probabilidades ($paxpf$) se minimiza para el rango de visibilidades al final de la zona de entre 200 y 400 m.

De todo ello se concluye que la longitud mínima de las zonas de adelantamiento debe situarse entre 200 y 400 m y que la visibilidad al final de la zona más adecuada está entre 200 y 400 m.

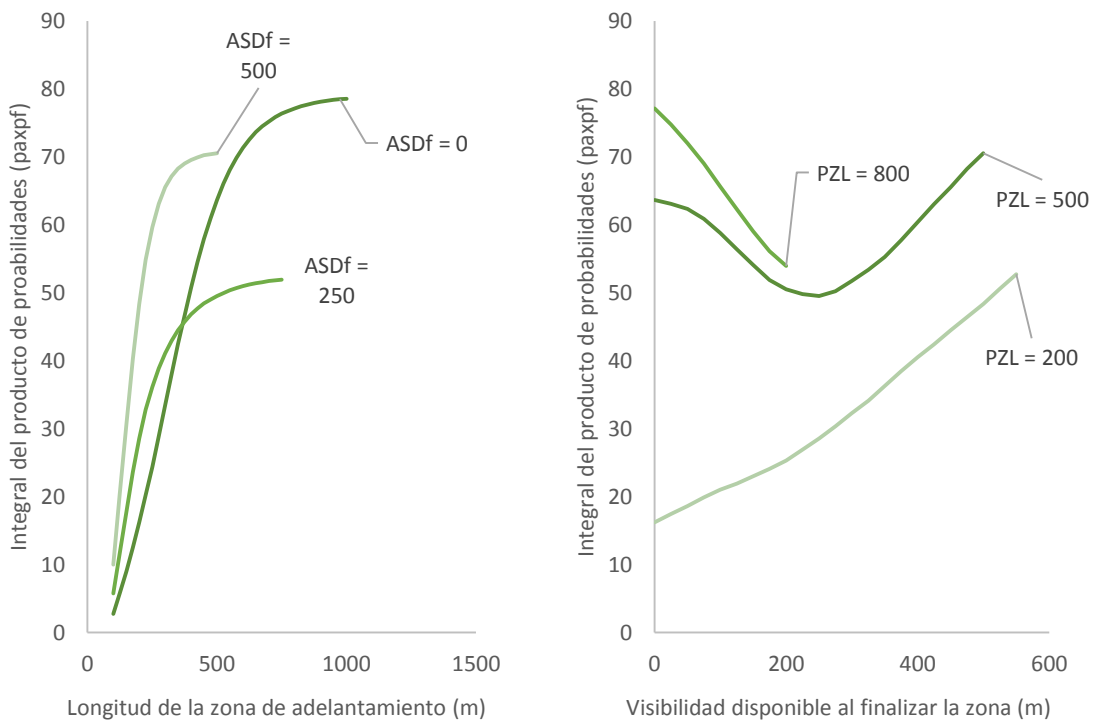
Además de la influencia de la geometría de la zona de adelantamiento, en la Figura 12-16 se muestra el efecto del tipo de vehículo adelantado, y en la Figura 12-17, el de la velocidad de diseño.

La integral del producto de la probabilidad de no-cumplimiento y la probabilidad de aceptación ($paxpf$) aumenta cuando el vehículo a adelantar es pesado, en comparación con el caso en el que es ligero. El aumento es tanto mayor cuanto mayor es la zona de adelantamiento.

Por su parte, el aumento en la velocidad de diseño (o en su caso de operación) conlleva un aumento en el valor de la citada integral, a un ritmo uniforme a partir de zonas cuya longitud excede los 300 m.



(a) Integral de la probabilidad de no-cumplimiento (pf)



(b) Integral del producto de probabilidades ($paxpf$)

Figura 12-15. Indicadores de riesgo de zonas de adelantamiento rectas

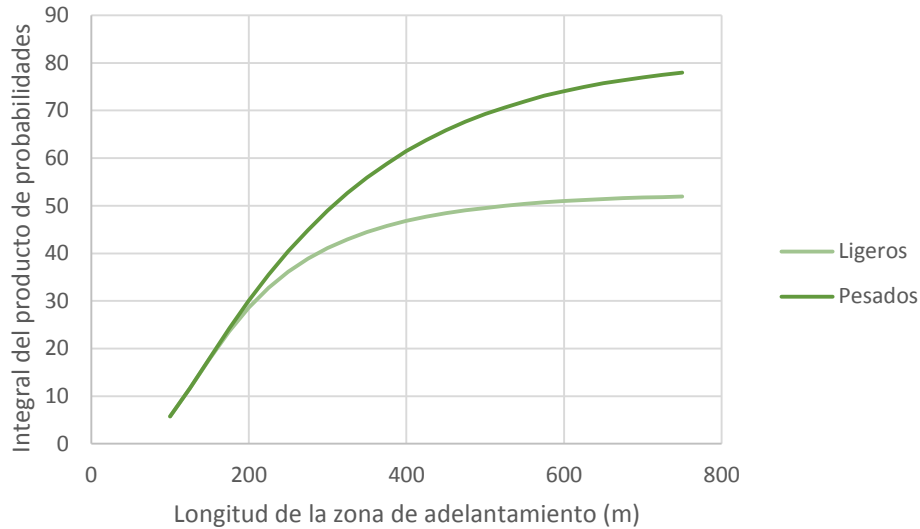


Figura 12-16. Efecto del tipo de vehículo adelantado en la integral del producto de probabilidades (ASD al final de la zona igual a 250 m)

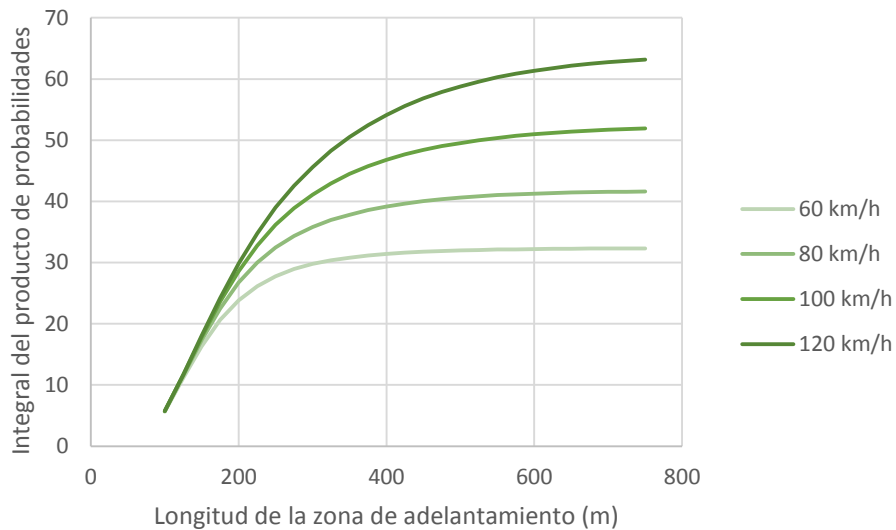


Figura 12-17. Efecto de la velocidad de diseño (en km/h) en la integral del producto de probabilidades (ASD al final de la zona igual a 250 m)

12.2.4.2. Zona en curva

Las zonas de adelantamiento en tramos curvos presentaron un comportamiento sensiblemente diferente. En este caso, las conclusiones obtenidas en el análisis de sensibilidad son las siguientes:

- Un aumento en la longitud supone un aumento en la integral de la probabilidad de no cumplimiento (pf) y en la del producto de probabilidades ($paxpf$). Sin embargo, el ritmo de crecimiento es distinto, dependiendo de la visibilidad disponible a lo largo de la zona, siendo las zonas de adelantamiento con gran visibilidad al inicio en las que menor aumento se produce.

- Para zonas de adelantamiento de longitud media y larga existe un valor óptimo de distancia de visibilidad, alrededor de 600 a 700 m, a partir del cual aumentan las probabilidades de llevar a cabo maniobras que terminen más allá de la prohibición de adelantamiento.

No obstante, en el caso de zonas localizadas en curvas, no es posible referir los resultados directamente a velocidades de diseño. La relación entre V_{85} y V_d fue obtenida, en el presente estudio, para velocidades de operación máximas en el centro de tramos rectos. La extrapolación de esta relación a curvas no puede realizarse para curvas de radios inferiores a los dados por la Tabla 12-9. No obstante, en casos en los que el ángulo girado sea muy reducido, es posible reducir el caso de zona en curva al de zona en recta, siendo necesario un estudio pormenorizado.

En dicha Tabla, la relación entre radio y velocidad de operación se obtuvo a partir de los modelos de velocidad propuestos por Pérez (2012). A partir de los datos de velocidad instantánea obtenidos mediante dispositivos GPS instalados en una amplia muestra de vehículos, se obtuvo el modelo de la Ecuación 12-4, para obtener el percentil 85 de la mínima velocidad de operación en curva.

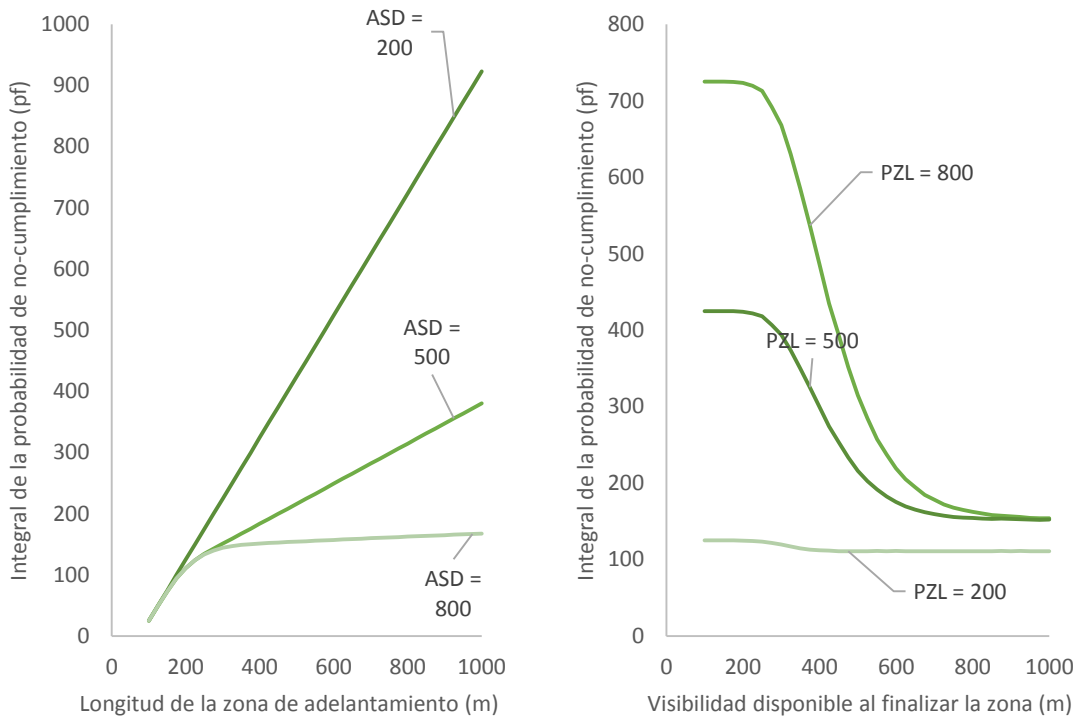
$$V_{85} = \sqrt{9933.38 - 3144,03 \ln(R)} \quad \text{Ecuación 12-4}$$

Donde:

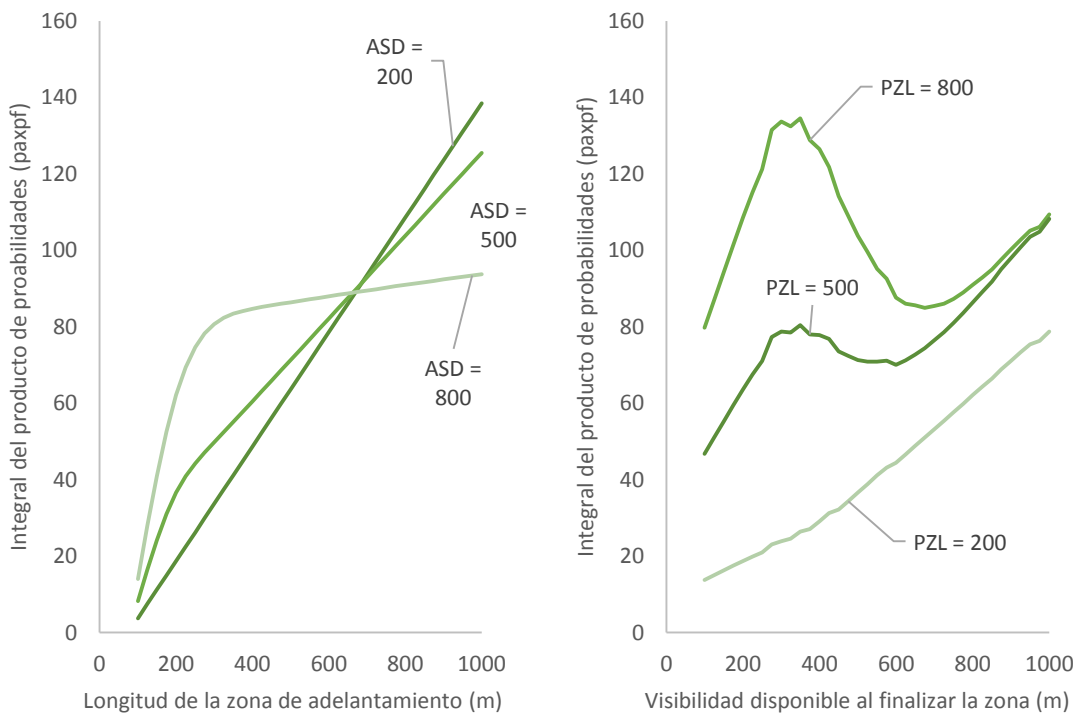
- V_{85} es el percentil 85 de la mínima velocidad de paso por curva.
- R es el radio de la curva

Velocidad de diseño (km/h)	V_{85} en recta (km/h)	Radio asociado a V_{85} (m)
60	85	234
70	92	343
80	99	517
90	105	804
100	112	1.289
110	119	2.126
120	126	3.612

Tabla 12-9. Relación entre radio, velocidad de operación y velocidad de diseño



(a) Integral de la probabilidad de no-cumplimiento (pf)



(a) Integral del producto de probabilidades ($paxpf$)

Figura 12-18. Indicadores de riesgo en zonas de adelantamiento curvas

El efecto de la velocidad de diseño y del tipo de vehículo adelantado es muy similar al obtenido en zonas en recta.

12.2.5. Revisión de criterios en España

A continuación se compararon los criterios actualmente vigentes en España con los resultados del análisis de fiabilidad de zonas de adelantamiento, a través de los valores asociados de probabilidad de no-cumplimiento y de su producto con la probabilidad de aceptación de huecos.

La mayor parte de estudios centrados en el problema de la distancia de visibilidad de adelantamiento se ocuparon del problema de hallar los valores de dicha variable que son necesarias para completar la maniobra de forma segura. Sin embargo, no se ha analizado hasta el momento cuál es el verdadero riesgo asociado a las zonas de adelantamiento que cumplen determinados criterios. En este apartado, por su parte, se estudiaron los valores medios de los indicadores obtenidos en el anterior, para estimar la probabilidad de no-cumplimiento y el producto de esta por la probabilidad de aceptación en zonas de longitudes variable que satisfacen los criterios de distancia de visibilidad establecidos en las dos normativas aplicables en España. Conviene destacar que este planteamiento analiza el nivel de riesgo presente en zonas de longitudes y visibilidades diversas, y no solo en las zonas que se ajustan al valor crítico determinado por el criterio. Con este análisis es posible obtener mayor información de la seguridad del criterio de diseño o señalización, y de las consecuencias de alejarse de él.

En todos los casos solo se tuvieron en cuenta maniobras simples con vehículos adelantados ligeros. A efectos de comparación entre los distintos criterios, se utilizaron como indicadores los valores medios de la probabilidad de no cumplimiento y del producto de probabilidades, correspondientes a dividir los valores de la integral por la longitud de la zona. Estos valores ya se definieron en el apartado de análisis de seguridad vial, por medio de las variables pfm y $pamxpfm$.

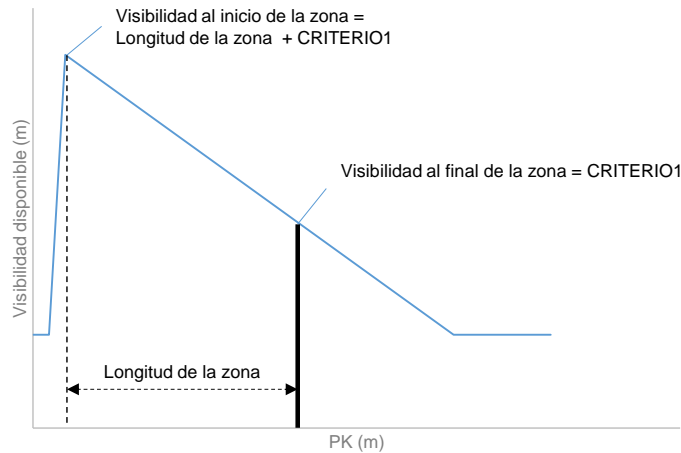
12.2.5.1. Instrucción 3.1 IC: "Trazado"

La Instrucción 3.1 IC de Trazado (Ministerio de Fomento, 2000) se emplea en la fase de diseño, y establece que debe disponerse de una visibilidad superior a la de adelantamiento en, al menos, un 40% del trayecto, lo más uniformemente repartida. No se define, por el contrario, la longitud mínima de la zona de adelantamiento. La velocidad de referencia empleada es la de diseño, y los valores de distancia de visibilidad se muestran en la Tabla 12-10.

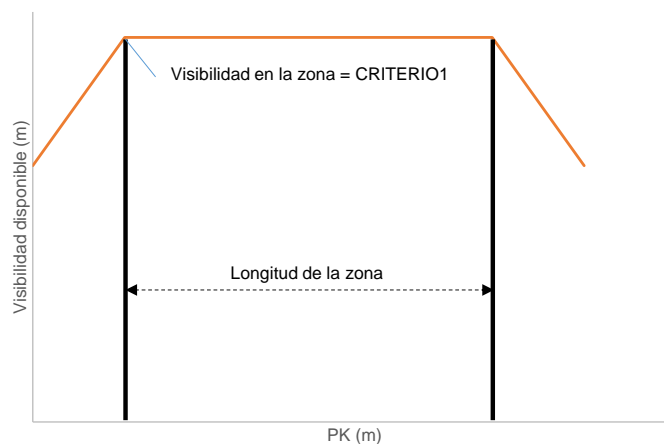
Velocidad de diseño (m)	60	80	100	120
Distancia de visibilidad de adelantamiento (m)	400	500	600	700 (extrapolado linealmente)

Tabla 12-10. Valores de distancia de visibilidad de adelantamiento empleados en el estudio de la 3.1 IC

Según esto, la visibilidad disponible que define en la Instrucción es la señalada en la Figura 12-19 como *CRITERIO 1*. Las otras dimensiones de las zonas modelo recta y curva no están limitadas por esta normativa.



(a) zona de adelantamiento recta



(b) zona de adelantamiento curva

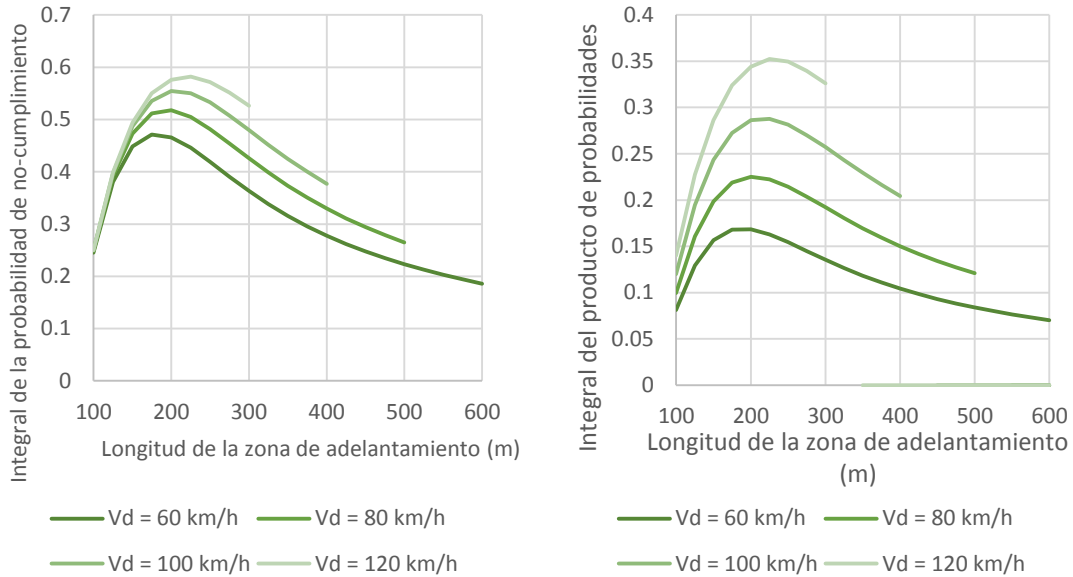
Figura 12-19. Interpretación del criterio de la Instrucción 3.1 IC

Teniendo en cuenta los resultados del análisis de fiabilidad presentados en los anteriores apartados, la Figura 12-20 muestra los valores medios de la probabilidad de no-cumplimiento y del producto de la misma por la probabilidad de aceptación en zonas de adelantamiento que satisfacen el criterio de la Instrucción 3.1 IC. En la Figura, las combinaciones de longitud y visibilidad que exceden los rangos calculados (por encima de 1000 m) no se han representado.

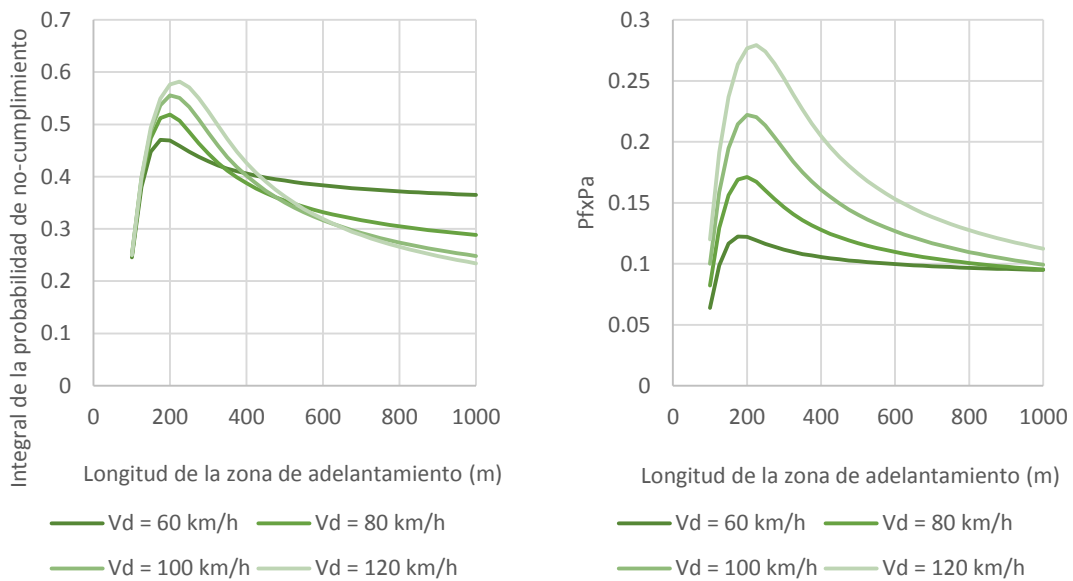
En general, se observa que, dadas una geometría de zona de adelantamiento, los criterios son más inseguros para velocidades de diseño altas, ya que las probabilidades de no-cumplimiento (pfm) y el producto de probabilidades ($pam \times pfm$) son superiores. No obstante, en el caso de zonas curvas, si se produjera una maniobra, sería más peligrosa en el caso de velocidades de diseño bajas. Las zonas cuya longitud es inferior a 400 m, por su parte, presentan probabilidades de incumplimiento muy altas. Entre zonas rectas y curvas, los niveles de riesgo serían similares.

Teniendo en cuenta la posición de las zonas de adelantamiento que cumplen estrictamente este criterio dentro de las gráficas de contorno (Figura 12-21), se observa que la mayor parte de los incumplimientos se deben al rebase de la prohibición de adelantamiento. Esto se debe a que las zonas que satisfacen el criterio (representadas mediante una línea roja) se sitúan en el área que cubre zonas cortas con visibilidad elevada (de la misma forma que se representó en la Figura

12-14). En este caso, el criterio de distancia de visibilidad para la finalización de la zona de adelantamiento es tan elevado que lleva asociada una probabilidad de que se inicie un adelantamiento en sus proximidades muy alta.



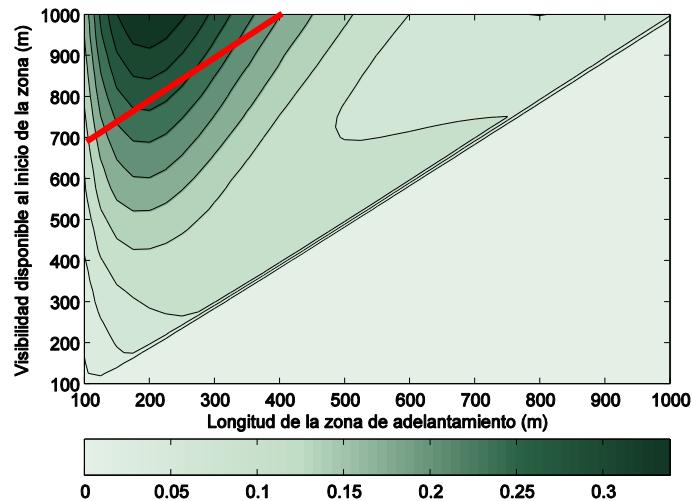
(a) zona recta (según velocidad de diseño)



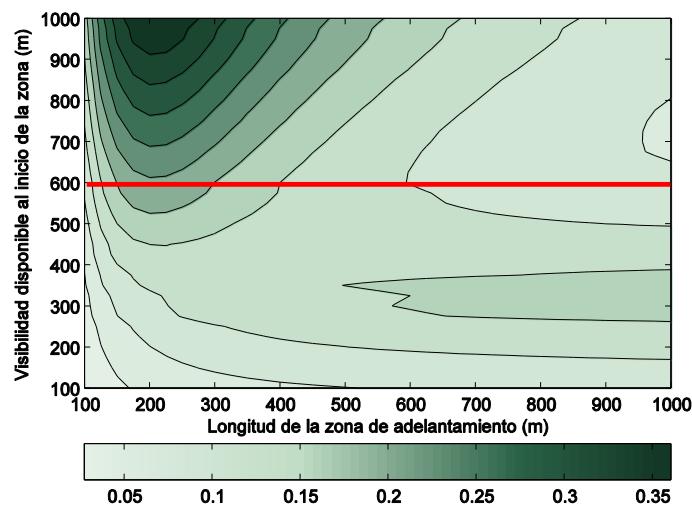
(b) zona curva (según velocidad de diseño) para radios mayores a los determinados en la Tabla 12-9

Figura 12-20. Indicadores de riesgo en zonas de adelantamiento que cumplen el criterio de la Instrucción 3.1

IC



(a) zona recta ($Vd = 100$ km/h)



(b) zona curva ($Vd = 100$ km/h)

Figura 12-21. Producto de la probabilidad de no-cumplimiento y la de aceptación de huecos media ($pamxpfm$) y criterio de la Instrucción 3.1 IC

Por este motivo, a pesar de que el criterio proporcione un margen de seguridad elevado, respecto a la probabilidad de colisionar con un vehículo que se aproximara en sentido contrario, la probabilidad de rebasar la prohibición de adelantamiento es muy elevada, de modo que el criterio no cumple sus funciones de forma apropiada.

12.2.5.2. Instrucción 8.2 IC: "Señalización horizontal"

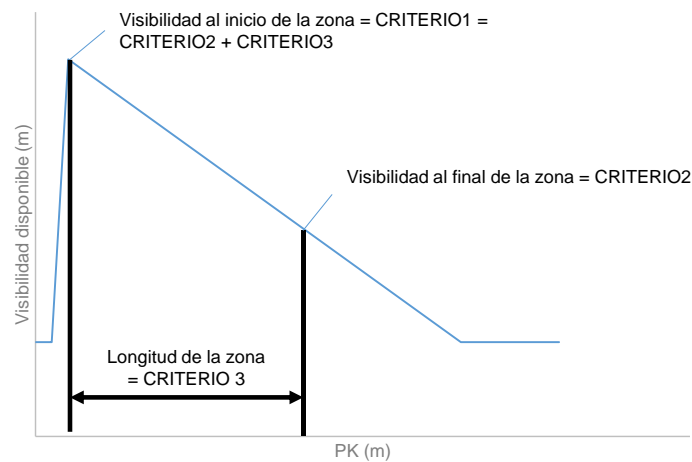
El criterio contenido en la Instrucción 8.2 IC (Ministerio de Fomento, 1987) es el que establece la señalización horizontal de las zonas de adelantamiento en carreteras convencionales. Las zonas en las que se llevaron a cabo las maniobras observadas en el presente estudio estaban definidas, de forma más o menos exacta, siguiendo lo establecido en este conjunto de criterios.

La Instrucción 8.2 IC establece criterios de distancia de visibilidad en el inicio y en el final de la zona, así como de la longitud mínima que esta puede tener. La velocidad de referencia es la máxima permitida, que en la práctica totalidad de las zonas estudiadas fue igual a una de las velocidades máximas genéricas para este tipo de vías, es decir, 90 y 100 km/h.

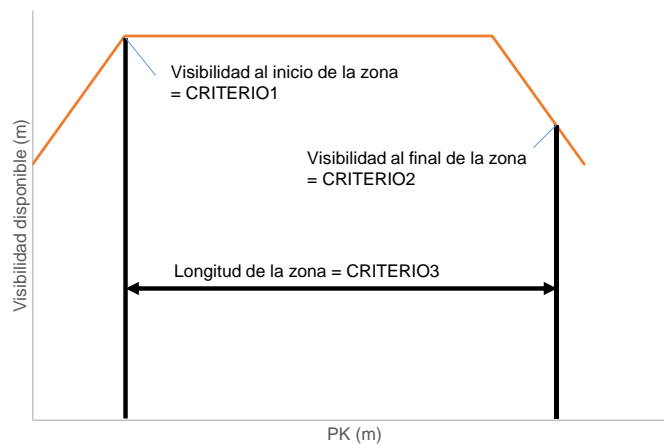
Velocidad máxima (km/h)		90	100
Vías existentes	Distancia de visibilidad mínima para iniciar una zona de adelantamiento (m)	205	250
	Distancia de visibilidad para finalizar una zona de adelantamiento (m)	205	250
	Longitud mínima de la zona (m)	205	250
Vías de nuevo trazado	Distancia de visibilidad mínima para iniciar una zona de adelantamiento (m)	355	395
	Distancia de visibilidad para finalizar una zona de adelantamiento (m)	205	250
	Longitud mínima de la zona (m)	385	435

Tabla 12-11. Valores de distancia de visibilidad de adelantamiento y de longitud mínima empleados en el estudio de la 8.2 IC

Los valores propuestos por la Instrucción 8.2 IC establecen requisitos no solo para la visibilidad mínima que debe tener una zona de adelantamiento, sino para la visibilidad necesaria al inicio y la longitud mínima de la misma. Por este motivo, todas las zonas deben cumplir las visibilidades y longitudes definidas como *CRITERIO 1*, *CRITERIO 2* y *CRITERIO 3*, en la Figura 12-22.



(a) zona de adelantamiento recta



(b) zona de adelantamiento curva

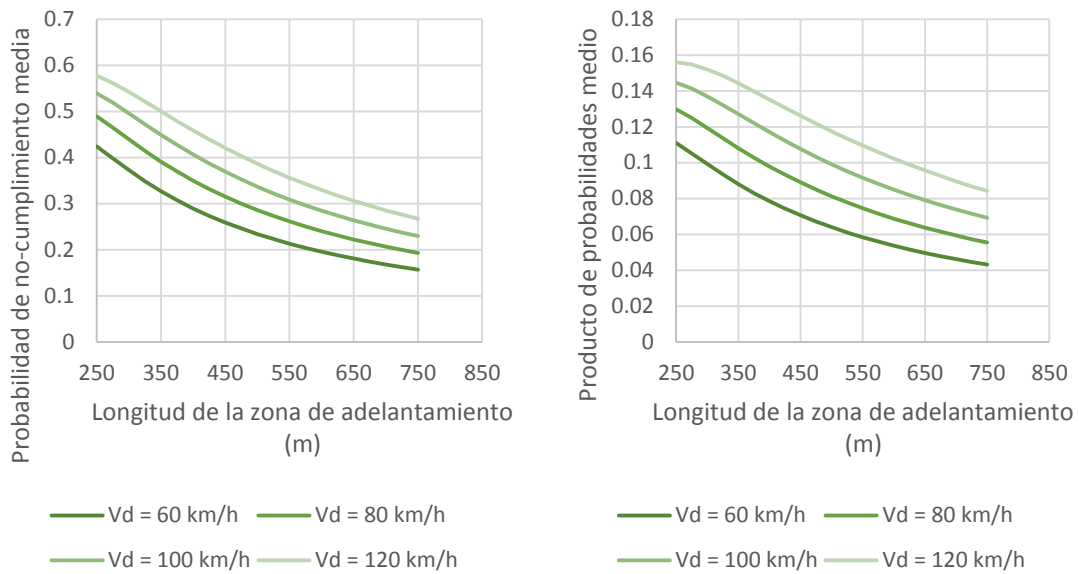
Figura 12-22. Interpretación del criterio de la Instrucción 8.2 IC

Se debe tener en cuenta que la velocidad de referencia que se emplea en este criterio es la velocidad máxima permitida en la vía. En ausencia de limitaciones específicas, la velocidad máxima permitida genérica es, actualmente, de 100 km/h en vías con arcén pavimentado de 1,5 m o más ancho, y de 90 km/h en los restantes casos. Sin embargo, es habitual encontrar tramos de carretera, como los observados en el estudio experimental, cuyas velocidades de diseño inheridas por la geometría están por debajo o por encima de la velocidad máxima permitida.

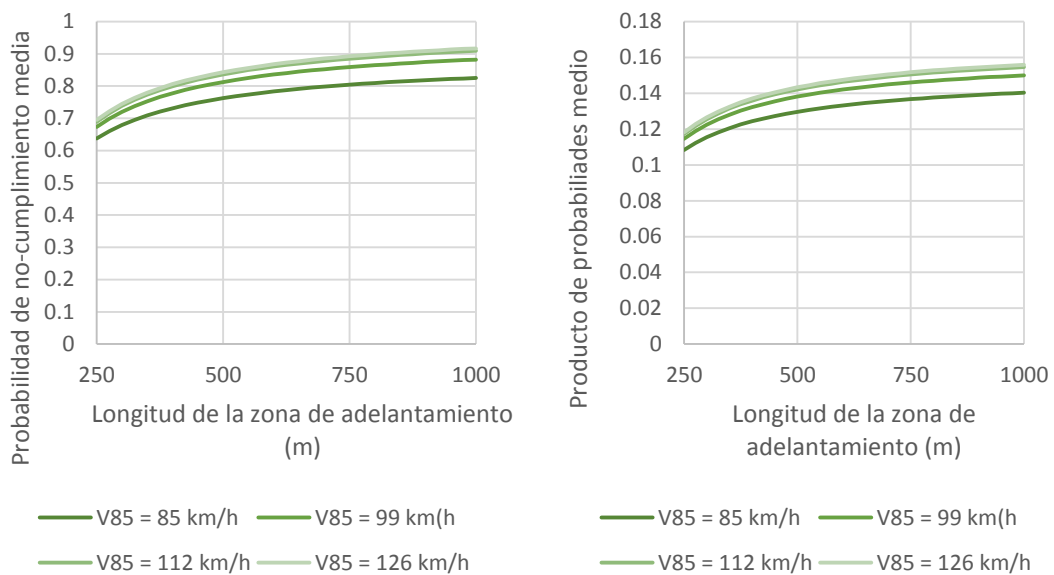
12.2.5.2.1. Vías existentes

En la Figura 12-23 se muestran los indicadores de riesgo para zonas de adelantamiento rectas o curvas que satisfacen el criterio de la Instrucción 8.2 IC, para vías existentes y con un límite de velocidad de 100 km/h. En general, los criterios son más inseguros para velocidades de diseño altas. En el caso de zonas rectas, la probabilidad de que se produzca una maniobra peligrosa o ilegal decrece con la longitud, mientras que en zonas curvas se da el fenómeno contrario. Las probabilidades de no-cumplimiento (pfm) son superiores en zonas curvas, pero el producto de probabilidades ($pam \times pfm$) es similar, puesto que en zonas cuya visibilidad es 250 m, la probabilidad de que llegue a iniciarse una maniobra es muy baja. No obstante, en zonas de adelantamiento largas, el riesgo es mayor en zonas curvas, y además se encuentra asociado al peligro por colisión con un vehículo opuesto (tal como se muestra en la Figura 12-24).

Por otra parte, en el caso de zonas rectas, aunque el criterio para iniciar una zona sea igualmente una visibilidad superior a 250 m (en el caso de velocidad máxima de 100 km/h), la visibilidad realmente disponible desde el inicio de la recta es igual a la visibilidad al final más la longitud de la zona, es decir, 500 m. En este sentido, el criterio de la Instrucción 8.2 IC está sobre-determinado, pues la visibilidad al inicio, la visibilidad al final y la longitud son características geométricas linealmente dependientes en zonas rectas.

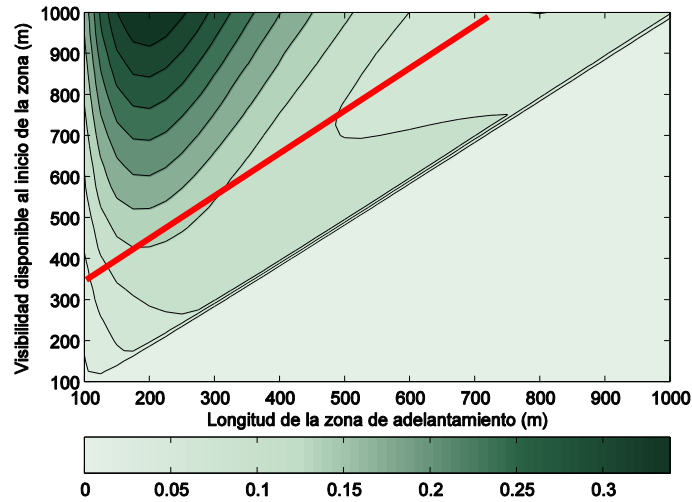


(a) zona recta (según velocidad de diseño)

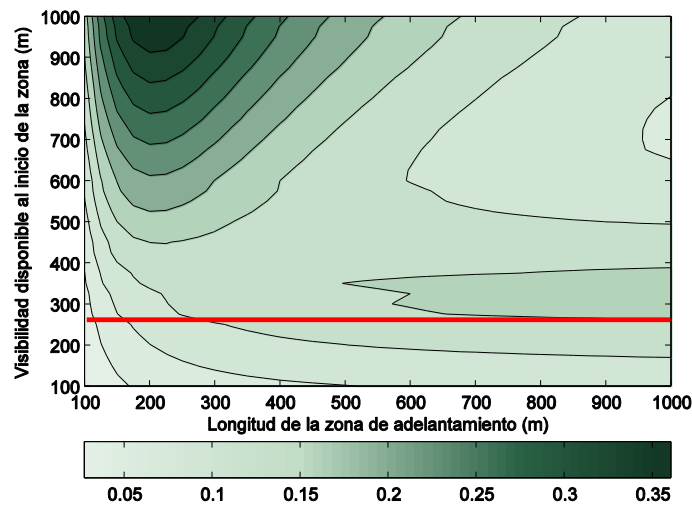


(b) zona curva (según velocidad de operación)

Figura 12-23. Indicadores de riesgo en zonas de adelantamiento que cumplen el criterio de la Instrucción 8.2 IC para vías existentes (Velocidad máxima = 100 km/h)



(a) zona recta ($Vd = 100$ km/h y $Vm = 100$ km/h)



(b) zona curva ($Vd = 100$ km/h y $Vm = 100$ km/h)

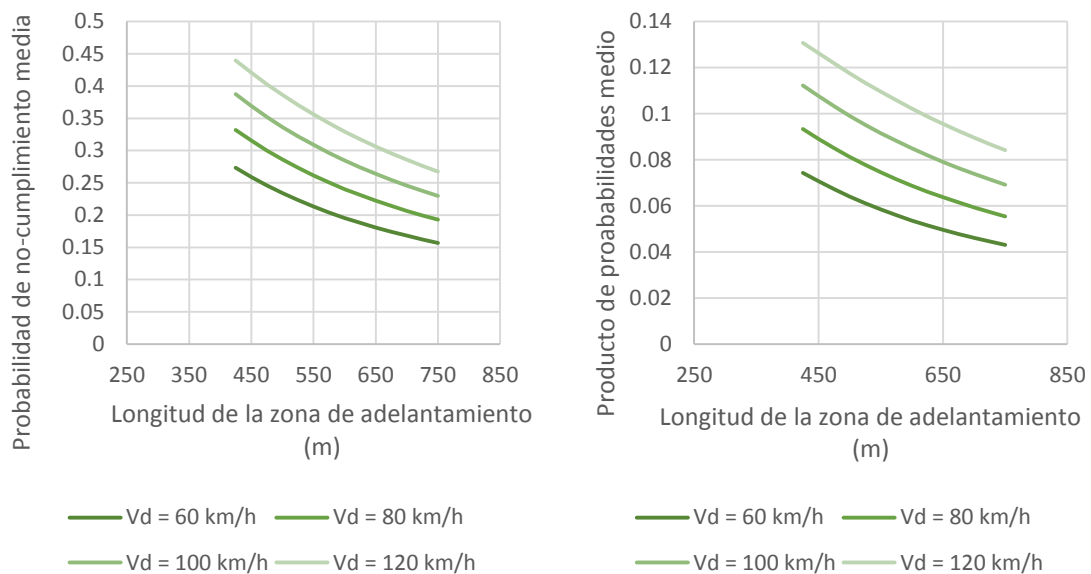
Figura 12-24. Producto de la probabilidad de no-cumplimiento y la de aceptación de huecos media ($pamxpfm$) y criterio de la Instrucción 8.2 IC

12.2.5.2.2. Vías de nuevo trazado

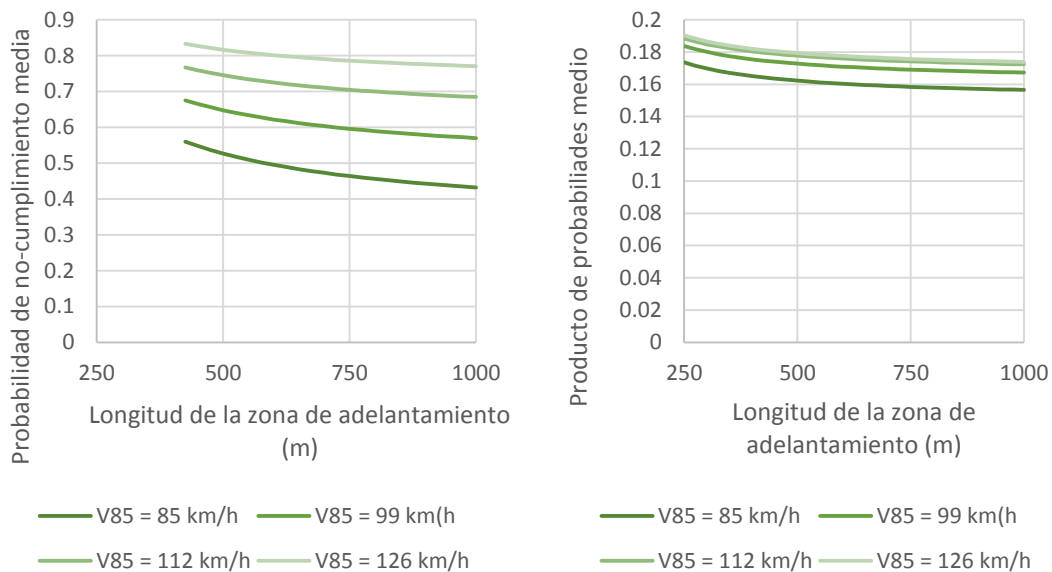
La Figura 12-25 muestra los valores de la probabilidad de no-cumplimiento y de su producto por la probabilidad de aceptación en zonas de adelantamiento que cumplen el criterio de la Instrucción 8.2 IC para vías de nuevo trazado, siendo el límite de velocidad igual a 100 km/h. Generalmente, la probabilidad de no-cumplimiento, y el producto de esta por la probabilidad de aceptar un hueco son más elevados para velocidades de diseño altas. Además, el nivel de riesgo medio decrece con la longitud de la zona de adelantamiento. Las zonas curvas, por su parte, presentan productos de probabilidades ($pamxpfm$) algo mayores que las zonas rectas, especialmente cuando su longitud se aleja del mínimo establecido en la normativa. Esta zona de las gráficas representa los casos de riesgo por colisión con el vehículo opuesto. Al considerar el producto de probabilidades ($pamxpfm$), el riesgo es mayor al emplear el criterio para vías de nuevo trazado.

Este último resultado podría ser contrario al sentido común, pero se debe, sin embargo, a la mayor probabilidad de aceptar un hueco al disponer de mayor distancia de visibilidad.

De nuevo, en el caso de zonas rectas, el criterio de visibilidad al inicio de la zona no es aplicable, pues la suma de la visibilidad al final y de la longitud de la zona es superior. Por lo tanto, el criterio de vías de nuevo trazado y el de existentes es idéntico en rectas.



(a) zona recta (según velocidad de diseño)



(b) zona curva (según velocidad de operación)

Figura 12-25. Indicadores de riesgo en zonas de adelantamiento que cumplen el criterio de la Instrucción 8.2 IC para vías de nuevo trazado (Velocidad máxima = 100 km/h)

12.2.6. Propuesta de nuevos criterios

Partiendo de los resultados del análisis de sensibilidad, y tras evaluar los criterios actualmente existentes, se procedió a la elaboración de una propuesta de criterio de diseño y señalización de zonas de adelantamiento.

Los principios básicos del criterio propuesto se resumen a continuación:

- Solo existe un conjunto de criterios, válidos tanto para el diseño como para la señalización de las zonas de adelantamiento. Teniendo en cuenta el grado de detalle que es

posible obtener actualmente en la obtención de los perfiles de visibilidad disponible durante la fase de diseño, ya es posible determinar con relativa precisión la localización de las zonas de adelantamiento sin necesidad de esperar a la medición de la visibilidad in situ.

- El criterio está basado en la velocidad de operación. La velocidad de operación debe ser medida (en tramos existentes) o estimada mediante modelos (tanto en tramos existentes como en tramos en fase de diseño).
- El criterio propuesto minimiza conjuntamente la probabilidad de incumplimiento de la prohibición de adelantamiento y la de la colisión con un vehículo opuesto, en situaciones de maniobras limitadas por la distancia de visibilidad disponible. De esta forma, no se tiene en cuenta la influencia del tráfico en sentido opuesto en la funcionalidad del tráfico.

Para la obtención de los valores de distancia de visibilidad y de longitud mínima de la zona de adelantamiento, se analizaron los valores del producto de la probabilidad de no cumplimiento por la probabilidad de aceptación ($paxpf$), para cada uno de los niveles de velocidad de diseño, transformándolos posteriormente a la velocidad de operación, a partir de las relaciones existentes entre las mismas, caracterizadas en el capítulo de análisis.

12.2.6.1. Zonas en recta

En zonas de adelantamiento en recta, la definición del criterio de diseño y señalización proporcionó los valores de distancia de visibilidad para finalizar la zona y la longitud mínima de la misma. Teniendo en cuenta la geometría de este tipo de zonas de adelantamiento, la visibilidad al inicio de la zona será la suma de las dos anteriores distancias.

Al observar el valor de la integral del producto de probabilidades de no cumplimiento y de aceptación de huecos ($paxpf$) (Figura 12-26) se detecta que existe un valor de visibilidad al final de la zona óptimo, en el que la probabilidad de que la distancia hasta un vehículo opuesto sea insuficiente o de que la longitud de la zona sea insuficiente se minimiza. En dicha figura, los valores de distancia de visibilidad al final se representan por diagonales de pendiente igual a la unidad. En este nivel de visibilidad al final de la zona óptimo se verifica que la probabilidad conjunta ($paxpf$) es la menor, y que al aumentar la longitud de la zona, esta variable aumenta al menor ritmo posible, algo detectable por la mayor separación entre isolíneas.

Por su parte, la longitud mínima de la zona se determinó en el entorno en el que la integral de la probabilidad de no-cumplimiento comienza a estabilizarse, tal como se detectó en el análisis de sensibilidad.

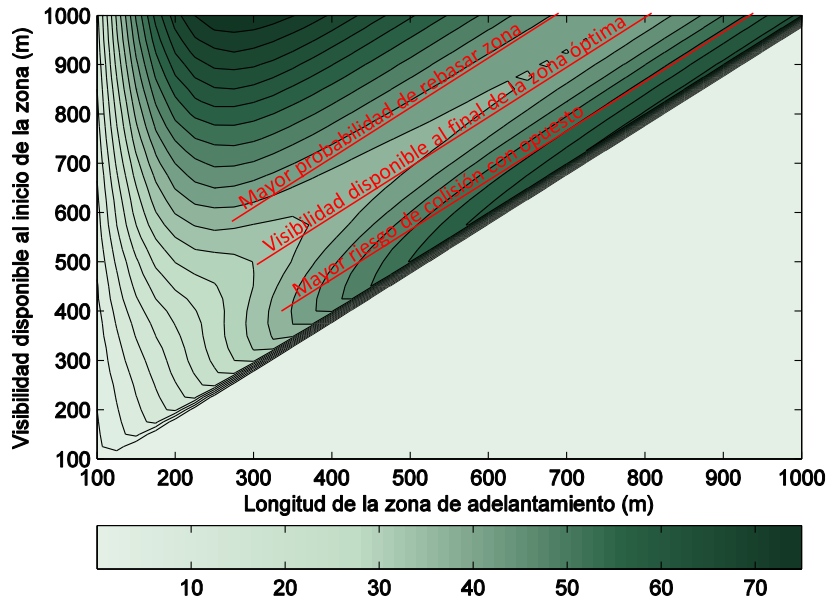


Figura 12-26. Producto de probabilidades medio en zonas rectas ($V_d = 100$ km/h)

Por lo tanto, la definición del criterio de distancia de visibilidad al final de la zona debe plantearse como un valor fijo, y no como un valor mínimo. De hecho, un aumento en dicha visibilidad aumentará la probabilidad de llevar a cabo maniobras dentro de la zona que supongan una mayor frecuencia de rebase de la prohibición de adelantamiento.

Por último, partiendo de la relación existente entre las velocidades de diseño y de operación, que se observó en el apartado de análisis, los criterios se presentaron para valores determinados del percentil 85 de la velocidad de operación en la recta. La relación existente entre ambas definiciones de velocidad se estudio en la Sección 9.2.2.1.4.

Con todo ello, en la Tabla 12-12 se muestran los valores mínimos necesarios para el establecimiento de zonas de adelantamiento en elementos rectos de la carretera. Dado que los criterios están basados en la velocidad de operación en el centro de la recta (velocidad de operación máxima), este dato debe ser conocido previamente, ya sea mediante modelos o mediante mediciones.

Velocidad de operación (Percentil 85) (km/h)	Velocidad de diseño (km/h)	Distancia de visibilidad al finalizar la zona de adelantamiento (m)	Mínima longitud de zona de adelantamiento (m)	Distancia de visibilidad mínima al iniciar la zona de adelantamiento (m)
80	53	193	236	429
90	68	208	265	473
100	82	222	293	515
110	97	237	311	548
120	112	252	335	587

Tabla 12-12. Criterio de zonas de adelantamiento en recta

12.2.6.2. Zonas en curva

En el caso de zonas de adelantamiento contenidas en zonas curvas, el criterio de diseño y señalización proporcionó los valores de la distancia de visibilidad constante a lo largo de la zona que optimizan la probabilidad de no-cumplimiento (pf) y la integral del producto de las probabilidades de aceptación y de no-cumplimiento ($paxpf$).

Esta distancia de visibilidad deberá considerarse como fija, y no como mínima, si se trata de zonas completamente contenidas en curvas (Figura 12-27). Si se trata de segmentos de zonas de adelantamiento situados entre dos rectas se deberá considerar como un valor mínimo, tal como se desarrollará más adelante.

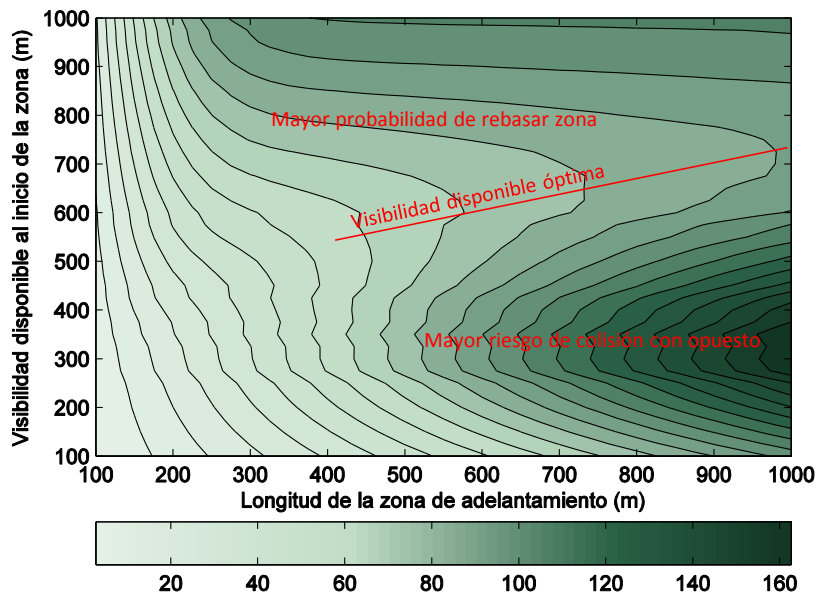


Figura 12-27. Selección de la visibilidad óptima en zonas en curva ($V_d = 100$ km/h)

Los valores obtenidos, dependiendo de la longitud de la zona de adelantamiento, son los de la Tabla 12-13. Los valores asociados a una longitud de zona determinada se interpolarán linealmente a partir de los proporcionados en la tabla. Igualmente, la longitud de la zona será superior a la longitud mínima de zona definida para el caso de zonas en recta. En el caso de zonas curvas, no es posible proporcionar una relación con la velocidad de diseño, puesto que como ya se ha comentado, la velocidad de operación en curvas será inferior a la de operación en el centro de la recta, para los radios inferiores a los mostrados en la Tabla 12-9. No obstante, dicha relación no es necesaria puesto que se recomienda encarecidamente emplear la velocidad de operación como referencia.

Velocidad de operación (Percentil 85) (km/h)	Distancia de visibilidad (PZL = 200 m) (m)	Distancia de visibilidad (PZL = 1000 m) (m)
80	391	529
90	409	547
100	428	565
110	446	584
120	465	602

Tabla 12-13. Criterio de zonas de adelantamiento en curva

El motivo de proporcionar una visibilidad distinta en función de la longitud de la zona de adelantamiento obedece a la intención de obtener niveles homogéneos de la probabilidad de aceptación de huecos multiplicada por la probabilidad de no-cumplimiento. Por ello, en zonas cortas, para disminuir la frecuencia del rebase de la prohibición de adelantamiento, disponer de menor visibilidad reduce la frecuencia con la que se llevan a cabo las maniobras.

Por último, conviene destacar el fenómeno de obstrucción visual causado por vehículos pesados en curvas a derechas. Este fenómeno puede ocultar la presencia de vehículos opuestos cuando

el vehículo perseguidor se dispone a adelantar al pesado, siendo necesario un estudio pormenorizado en cada caso.

12.2.6.3. Zonas compuestas por tramos rectos y curvos

Con el objeto de poder aplicar los anteriores criterios a zonas complejas formadas por rectas y curvas, se formularon los siguientes criterios adicionales:

- Las zonas de adelantamiento deben descomponerse en sub-zonas rectas y curvas. Las zonas rectas incluyen tramos con trazado en planta rectilíneo, y trazado en alzado recto o con cóncavos. Las zonas curvas se corresponden con trazados curvilíneos en planta o con acuerdos verticales convexos.
- Cada una de las sub-zonas (excepto la última) debe cumplir los criterios de distancia de visibilidad anteriores (recta o curva, respectivamente), entendiéndolos como criterios de visibilidad mínima, pudiendo excederlos. Además, no se tendrán en cuenta los criterios de longitud mínima de zona de adelantamiento.
- La última de las sub-zonas debe ajustarse a los valores de visibilidad disponible determinados en los anteriores criterios.
- La longitud total de la zona no deberá ser inferior a las longitudes mínimas definidas para el caso de zonas rectas para garantizar de esta forma la posibilidad de completar, al menos, una maniobra.

12.2.7. Conclusiones de la propuesta de criterios

Este apartado ha profundizado en la aplicación de criterios de distancia de visibilidad de adelantamiento, para la señalización de zonas de adelantamiento permitido en carretera convencional. En ese sentido, la propuesta de nuevos criterios obtuvo las siguientes conclusiones:

- Es necesario basarse en la velocidad de operación de los vehículos en rectas, en lugar de en la velocidad de diseño en tramos de carretera más largos. La velocidad límite tampoco es un valor de referencia adecuado.
- Se unifican los criterios de diseño y de señalización en un único criterio.
- En general, y en consonancia con el análisis de seguridad vial, las zonas en curva presentan indicadores de riesgo más elevados que las zonas en recta.
- Los criterios aplicables en zonas rectas que se proponen en este estudio implican un ligero aumento de los propuestos en la instrucción 8.2. IC (para finalizar la zona de adelantamiento). Esta diferencia no es directamente cuantificable al estar basados cada uno de los criterios en velocidades de referencia distintas.
- Los criterios aplicables en zonas curvas suponen un cambio mucho más significativo respecto a los establecidos en la instrucción 8.2 IC, implicando un aumento de la visibilidad disponible, variable en función de la longitud de zona de adelantamiento contenida en la curva.

13. Aplicaciones metodológicas

Este capítulo destaca las principales aportaciones metodológicas de la tesis. Se trata de potenciales aplicaciones de la metodología desarrollada a otras líneas de investigación similares.

La principal aportación metodológica fue el desarrollo de una técnica de toma de datos novedosa, basada en la utilización de vehículos instrumentalizados. Si bien esta metodología se basaba en otros estudios experimentales llevados a cabo con anterioridad, a lo largo de la presente tesis se incluyeron elementos y métodos novedosos que permitieron ampliar la validez y el grado de detalle alcanzable mediante la obtención de los datos.

La idea fundamental de este tipo de metodología es el empleo de un vehículo instrumentalizado desde el que se realiza la toma de datos del comportamiento de otros vehículos. El vehículo instrumentalizado se introduce dentro del tráfico y actúa de forma normal, de modo que su presencia no debe ser detectada por el resto de usuarios, que son el objeto de la recogida de información.

Hasta este momento, otros investigadores habían empleado vehículos instrumentalizados para el estudio del adelantamiento. Se habían empleado, principalmente, cámaras de video delante y detrás para el registro completo de la maniobra, así como receptores GPS u odómetros para el posicionamiento del propio vehículo.

Esta investigación incorporó la utilización de medidores de distancia láser para la caracterización precisa de las distancias existentes entre el vehículo instrumentalizado y los que se sitúan delante y detrás de él. Además, fue posible la medición de velocidades instantáneas al iniciar o al finalizar el adelantamiento.

Por otra parte, la utilización de cámaras de alta definición junto a la toma de notas por parte del copiloto permitió caracterizar algunas variables que nunca se habían tenido en cuenta en estudios experimentales de maniobras de adelantamiento, como fue el caso del sexo y la edad del conductor.

Esta metodología ha sentado las bases de diversos estudios posteriores, que emplearon el concepto de vehículo instrumentalizado para la toma de otros datos de tráfico. A continuación se resumen algunos de los estudios realizados partiendo de la experiencia adquirida en el desarrollo del estudio experimental de la presente tesis:

- Medición de velocidades de operación en travesías y vías urbanas: en este caso, el vehículo instrumentalizado persigue a otros vehículos a lo largo de corredores urbanos, como es el caso de vías arteriales o travesías. El objetivo es imitar su comportamiento, y obtener su velocidad instantánea. Para ello, se equipó al vehículo instrumentalizado con un distanciómetro láser delantero, montado en forma de pistola láser. Durante el seguimiento, el copiloto apunta al vehículo perseguido. Posteriormente, el procesamiento de los datos permite reconstruir, a partir del registro del GPS del vehículo instrumentalizado y del registro de medidas del distanciómetro láser, la trayectoria real del vehículo

perseguido. La repetición de este proceso en una muestra suficiente de vehículos permite construir perfiles de velocidad de operación de los tramos estudiados.

- Caracterización de maniobras de adelantamiento a bicicletas en carreteras convencionales: los equipos instalados a bordo del vehículo instrumentalizado se instalaron en una bicicleta. Este estudio requirió la adaptación de baterías y ordenador portátil (sustituyéndolos por otros más pequeños) de modo que fuera posible instalarlos en la bicicleta. Además, se colocó el medidor de velocidad láser, apuntando hacia el lado izquierdo de la bicicleta. El método es análogo al empleado en adelantamientos entre vehículos a motor: la bicicleta circula a lo largo de tramos de carretera, por el arcén o ceñida a la parte derecha del carril, y captura datos de todos los vehículos que le adelantan, destacando entre todos ellos la distancia entre la bicicleta y el vehículo a motor y la velocidad relativa entre ambos, ambas caracterizadas con gran precisión gracias a los dispositivos láser.
- Caracterización de comportamientos de ciclistas en carriles bici: la misma instrumentación que en el anterior caso se empleó para el estudio de maniobras de cruce entre bicicletas dentro de carriles bici urbanos, así como para el estudio de conflictos con peatones y con vehículos a motor. Igualmente, los investigadores recorrieron los carriles bici actuando de forma normal y a velocidades habituales para los carriles, recogiendo de esta forma datos sin que otros usuarios detectaran su presencia. En este caso, se añadió al equipamiento cámaras de alta definición adicionales, que permitían mejorar la identificación del comportamiento del resto de ciclistas, por ejemplo, en el momento en el que accionaban los frenos o dejaban de pedalear.

Todos estos estudios se han realizado partiendo de los resultados y de la experiencia adquirida en la tesis. Esto ha permitido aprovechar de forma eficiente los recursos adquiridos en el marco de un proyecto de investigación, y ha contribuido a la obtención masiva de datos de tráfico, cuyo análisis ha supuesto un avance significativo en distintas líneas de investigación.

El desarrollo de vehículos altamente instrumentalizados, con equipamiento versátil y adaptable a diversas necesidades en el campo de la ingeniería de tráfico constituye, por lo tanto, una de las principales aportaciones de la presente tesis, desde el punto de vista metodológico.

14. Conclusiones

Las principales conclusiones de la tesis son las siguientes:

1. Desarrollo de un **método de observación** de maniobras de adelantamiento desde un **vehículo instrumentalizado**. Este método consiste en la grabación de maniobras desde un vehículo que, al circular a una velocidad ligeramente reducida, es adelantado por otros conductores dentro del flujo normal de tráfico. Esta técnica permite obtener un conjunto de variables que hasta el momento no era posible disponer. Es el caso del **sexo y la edad del conductor del vehículo adelantante**, o de la **demora acumulada durante el proceso de seguimiento** previo al adelantamiento. No obstante, al fijar la velocidad del vehículo adelantado, todavía es necesaria la realización de observaciones desde puntos externos a la vía para obtener una descripción completa del proceso de adelantamiento, especialmente en cuanto a la distribución de velocidades del vehículo adelantado.
2. Amplio estudio experimental, que incluyó la caracterización de hasta **1.179 maniobras** (648 mediante la metodología estática – u observaciones desde el exterior de la vía – y 531 mediante la metodología dinámica – desde el vehículo instrumentalizado). Además, se midieron las velocidades puntuales de más de 1000 vehículos. El estudio de campo abarcó una gran variedad de condiciones. Las velocidades de diseño se situaron entre 60 y 120 km/h, las zonas de adelantamiento tuvieron longitudes entre 99 y 1.855 m, la sección transversal abarcó los casos de 7 y 10 m de anchura de plataforma y la IMD osciló entre aproximadamente 2.300 y 15.300 veh/día. Además, se realizaron observaciones tanto en horario diurno como en horario nocturno, siendo este uno de los pocos estudios que ha considerado este factor.
3. Modelos de **decisión de adelantamiento** por parte de los conductores que se sitúan en una cola, por detrás de un vehículo más lento. Se han calculado las distribuciones de huecos críticos, es decir, de aquellos valores de huecos cuya probabilidad de ser aceptados es igual a la de ser rechazados. Para ello, se emplearon modelos de decisión binaria (aceptación o rechazo) de tipo probit. Esto permitió caracterizar las variables que mayor influencia tienen en este proceso.
 - a. El **tamaño de hueco**, al ser medido en **unidades de distancia**, presenta una **mejor correlación con** el resultado de la **decisión de adelantar**. Esto puede deberse a la forma en la que los conductores detectan los huecos. En cambio, si los huecos se miden en unidades de tiempo, la correlación es inferior, lo cual se ajusta, posiblemente, a la dificultad de apreciar la velocidad de un vehículo opuesto y de estimar la duración de la maniobra de adelantamiento por parte de un conductor.
 - b. Después del tamaño del hueco, la variable que mayor influencia tiene en la decisión de adelantar, es la **visibilidad del vehículo opuesto**. El simple hecho de que el vehículo opuesto sea visible aumenta el hueco crítico medio de 500 m a

800 m, indicando un comportamiento muy diferente de los conductores en ambos tipos de maniobra. Este hecho verifica una de las hipótesis iniciales de la investigación, a pesar de que **nunca se había estudiado**.

- c. Pese a que algunos autores sugieren (y algunos lo han detectado en accesos o intersecciones) que tras largos tiempos de demora es más probable la aceptación de huecos más pequeños, este efecto no ha sido detectado en el caso de maniobras de adelantamiento, refutando la hipótesis inicial formulada al respecto. Este hecho podría deberse al carácter opcional de la maniobra de adelantamiento, frente a la obligatoriedad de las maniobras de cruce o de entrada a una intersección.
 - d. Los tamaños de huecos críticos medios son más elevados que en otros estudios, y mucho más altos que los valores propuestos por los modelos de distancia de visibilidad de adelantamiento existentes en la bibliografía. Sin embargo, esta tendencia podría confirmar la hipótesis de que **el comportamiento de los conductores es más conservador en la actualidad**, por el hecho de demandar menos adelantamientos y estar menos habituados a ellos. El carácter conservador, tal como se había formulado en las hipótesis, también se relacionó con la ausencia de maniobras abortadas.
4. Cuantificación del efecto de diversos factores en el tiempo de ocupación del carril izquierdo, así como la adecuación de diversos modelos de evolución del vehículo adelantante a los datos experimentales:
- a. Un **aumento en el número de vehículos** adelantados implica un **aumento** de aproximadamente 3 s **en el tiempo de ocupación del carril izquierdo** (pasando de 7 s en el caso de un único vehículo ligero a casi 10 s en el caso de que se adelanten dos vehículos ligeros).
 - b. El tipo de vehículo adelantado afecta de forma muy significativa al tiempo de ocupación del carril izquierdo. **El tiempo medio aumenta 2,1 s** (de 7,0 s a 9,1 s) cuando **se pasa de adelantar a un vehículo ligero a adelantar a uno pesado**, debido a su mayor longitud.
 - c. Por la **noche**, el **tiempo de ocupación** del carril izquierdo **disminuye** de forma significativa, si bien solo **en el caso de que el vehículo opuesto sea visible**. La hipótesis tradicional implica que es más sencillo adelantar por la noche, puesto que los faros de los vehículos opuestos anticipan su posición. Esta hipótesis sería válida solo para maniobras sin el vehículo opuesto visible. Sin embargo, si el conductor que puede adelantar está observando a vehículos en sentido opuesto, es posible que realice el adelantamiento con mayor celeridad. Esto refleja la mayor dificultad de detectar el tamaño del hueco y la velocidad del vehículo opuesto cuando únicamente se ven sus faros.
 - d. Dentro del conjunto de conductores, se ha detectado que los **hombres de edad inferior a 30 años** son el grupo de conductores que **adelantan más rápido**, ocupando un menor tiempo el carril destinado al tráfico en sentido opuesto. Este hecho se ajusta a resultados de otros investigadores, si bien en aquél caso se habían basado en un simulador de conducción.
 - e. En cuanto a la caracterización de la **trayectoria del vehículo adelantante**, el estudio se ha centrado en las maniobras simples que afectaron a vehículos ligeros, las más numerosas dentro de la muestra obtenida. En este caso, **se han calibrado hasta seis modelos**, basándose en los existentes en la bibliografía y en

nuevas formulaciones. Entre otros, se han propuesto modelos de velocidad constante, aceleración constante, aceleración en dos fases o variaciones lineales de la aceleración.

- i. Los resultados sugirieron que es razonable emplear un **modelo de aceleración constante**, centrada en torno a $0,77 \text{ m/s}^2$, para el caso de maniobras **en seguimiento**. Para **maniobras lanzadas**, es más adecuado un modelo de **velocidad constante**, un 40% superior a la del adelantado. El modelo de aceleración constante fue escogido para el desarrollo de un modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento. Dicho modelo se alimentó con las distribuciones de frecuencia de cada una de las variables de entrada, obteniendo por lo tanto la distribución de frecuencias de la distancia de visibilidad de adelantamiento.
 - ii. A pesar de la generalización, los datos indicaron que el mejor ajuste se obtendría considerando varios grupos de conductores (o escenarios), a cada uno de los cuales se les adapta mejor un modelo distinto. Realizando un análisis conjunto, asignando a cada una de las observaciones el mejor modelo, se detectó que la mayoría de vehículos adelantantes alcanza su **velocidad máxima al finalizar el adelantamiento** o (después del mismo), si bien **la tasa de aceleración suele disminuir a lo largo de la maniobra**. Generalmente, dicha **aceleración se sitúa, de media, entre 0 y 1 m/s^2** , y su valor máximo supera 2 m/s^2 solo en el 21% de los casos. Sin embargo, el empleo de un único modelo más complejo no fue adecuado para representar a la totalidad de la muestra de conductores.
 - iii. La utilización de uno u otro modelo (o una combinación de ellos) dependería en cada caso de la necesaria precisión y de la simplicidad o velocidad de cálculo. En este sentido, debería valorarse en cada caso qué variable o variables se deben determinar.
5. **Análisis de fiabilidad** (o análisis de estados límite) para estimar el riesgo existente en la maniobra, por la **colisión con un vehículo** que se aproximara en sentido **opuesto**. Además, se ha computado la probabilidad de que la ocupación del carril izquierdo supere a la longitud de la zona de adelantamiento, obligando al **rebase de la prohibición**. De esta forma, se ha ampliado la aplicabilidad del análisis de fiabilidad, pasando del estudio de maniobras individuales a la determinación de la probabilidad de no-cumplimiento de zonas de adelantamiento completas, e incluso a la corrección de la misma por la probabilidad de que tengan lugar adelantamientos. Para ello, se ha empleado el **producto de la probabilidad de no-cumplimiento** de cada valor de distancia de visibilidad multiplicada **por la probabilidad de aceptar un hueco** del dicho tamaño.
6. **Análisis de siniestralidad** a partir de una base de datos de accidentes de la Conselleria de Infraestructuras y Transporte de la Generalitat Valenciana. La base de datos contiene registros de más de 23.000 accidentes, estando 1.180 relacionados con maniobras de adelantamiento. En este caso, se ha profundizado en los accidentes asociados a maniobras de adelantamiento, verificándose las hipótesis planteadas, por medio de las siguientes conclusiones:
- a. Hay una **gran diversidad de tipologías** de accidente asociadas a la maniobra de adelantamiento, que no se limitan solo a la **colisión frontal** con el vehículo opuesto. Por el contrario, esta tipología solo representa el **21%** de los casos. En el **44%** de los casos la colisión se relaciona con vehículos que **entran o salen de**

- la vía principal**, destacando el adelantamiento fallido de vehículos que se disponían a girar a la izquierda desde la calzada principal. También en un 14% de los casos se produjeron colisiones entre el adelantante y el adelantado, y en un 9% la tipología de accidente fue la pérdida de control del vehículo adelantante.
- b. La **proporción de heridos graves** por cada 100 accidentes con víctimas fue un **10% mayor en accidentes relacionados con adelantamiento**, y en la base de datos estudiada. En cambio, no se apreciaron diferencias en la mortalidad.
 - c. En la muestra de tramos de carretera convencional considerada, la importancia relativa de los **accidentes debidos a adelantamientos** fue de **entre el 5 y el 8%**, cifra que se reduce a entre el 3 y el 5% al excluir los accidentes ocurridos por salida o entrada de vehículos en accesos o intersecciones. El porcentaje aumenta de forma asintótica con la intensidad de tráfico.
 - d. En una sub-muestra de 138 zonas de adelantamiento, se detectó que la **geometría de las zonas de adelantamiento** tenía cierta influencia en la frecuencia de accidentes asociados a adelantamientos. La variable que mejor representaba esta relación fue la **integral extendida a toda la zona** de adelantamiento **del producto de la probabilidad de aceptar un hueco** por la **probabilidad de no-cumplimiento** de la distancia de visibilidad equivalente a dicho hueco. De esta forma, valores elevados de dicha integral se relacionaban con zonas de adelantamiento con accidentes más frecuentes. Este tipo de zonas de adelantamiento corresponde, generalmente, con **zonas de adelantamiento largas que contienen tramos curvos** en su interior (ya sea una curva en planta o un acuerdo convexo).
7. Módulo de un modelo de **microsimulación que representa la decisión y ejecución** de adelantamientos. Este módulo ya forma parte de un software comercial de microsimulación, e incluye, como **novedad**, algunas variables cuyo efecto fue detectado por primera vez en el estudio experimental, como es el caso de la **influencia de la visibilidad disponible**, y de la **presencia de vehículos opuestos** en el momento de llevar a cabo la decisión de adelantar.
 8. Nivel de riesgo asociado a los **criterios de diseño y señalización** de zonas de adelantamiento existentes en España. Para ello, se han estudiado los valores de no-cumplimiento y aceptación de huecos en zonas de adelantamiento de diversas longitudes y que disponen de distintos valores de distancia de visibilidad. La evaluación del riesgo se representó por medio del promedio del producto de la probabilidad de no cumplimiento y la de aceptación de huecos, variable que representa la proporción de **maniobras ilegales** (por **terminar más allá de la prohibición** de adelantamiento) o **peligrosas** (por **no disponer de suficiente distancia** ante la repentina aparición de un vehículo en sentido opuesto). Este planteamiento ha abarcado **longitudes de zona de entre 100 y 1000 m** y **distancias de visibilidad disponible entre 100 y 1000 m**, asumiendo que más allá de estos valores las zonas son más seguras. Los resultados de este análisis son los siguientes:
 - a. En general, la probabilidad de no-cumplimiento es más elevada para velocidades de diseño altas, asociadas a velocidades de operación altas.
 - b. La **Instrucción de Trazado 3.1 IC** proporciona un valor mínimo de distancia de visibilidad muy elevado, que da lugar a zonas con gran visibilidad. Este criterio, si se aplicara también para la señalización, presentaría, sobre todo **en zonas de**

entre 150 y 300 m de longitud, una gran probabilidad de que los vehículos rebasen la prohibición de adelantamiento. Eso se debe a que al disponer de una gran distancia de visibilidad la probabilidad de iniciar una maniobra se incrementa, tal como se dedujo del análisis de aceptación de huecos. En este caso, el promedio del producto de la probabilidad de no cumplimiento y la de aceptación de huecos alcanza el valor de 0,35 (es decir, que **hasta el 35% de las maniobras podrían ser ilegales**).

- c. La Instrucción de Señalización Horizontal 8.2 IC, si se aplica en su definición para vías existentes, se asocia un valor del promedio del producto de la probabilidad de no cumplimiento y la de aceptación de huecos de entre 0,14 y 0,06 (es decir, que entre el 6 y el 14% de las maniobras son ilegales o peligrosas).
 - d. La Instrucción de Señalización Horizontal 8.2 IC, si se aplica en su definición para vías de nuevo trazado, se asocia con valores del promedio del producto de la probabilidad de no cumplimiento y la de aceptación de huecos de entre 0,18 y 0,06 (es decir, que entre el 6 y el 18% de las maniobras serían ilegales o peligrosas). En este caso, se detectó que **una mayor visibilidad no siempre mejora la seguridad y el cumplimiento del criterio**, puesto que aumenta la frecuencia de maniobras y en consecuencia, la probabilidad de que algunas de ellas rebasen la prohibición de adelantamiento o carezcan de suficiente espacio.
 - e. Tal como se había indicado en las hipótesis iniciales, **el cumplimiento de las normas o recomendaciones no garantiza** en todo momento **unas condiciones de seguridad** adecuadas. De hecho, en el caso de zonas curvas, al disponer de más visibilidad que la mínima exigida por la Instrucción 8.2 IC existe un rango de valores para los que se está favoreciendo la demanda de adelantamiento, y cuyo resultado sería un aumento de las maniobras inseguras o ilegales.
 - f. **No se ha encontrado justificación** científica alguna **a la existencia de dos criterios distintos, uno para el diseño y otro para la señalización**. De hecho, el criterio de la Instrucción 3.1 IC solo debe cumplirse en la redacción de los proyectos de carretera, y no existe posteriormente ninguna materialización de las zonas de adelantamiento que dependa de él.
9. Nuevos criterios de diseño de zonas de adelantamiento. Estos criterios se basan en los siguientes principios:
- a. **Solo existe un criterio**, válido tanto en fase de diseño como en fase de señalización de la carretera.
 - b. El criterio está **basado en la velocidad de operación**, y no en la velocidad de diseño o en la máxima permitida. Dicha velocidad deberá ser medida o estimada.
 - c. El criterio **minimiza conjuntamente la probabilidad de colisión** con un vehículo en sentido opuesto **y el incumplimiento de la prohibición** de adelantar al finalizar la zona.
 - d. El criterio se puede aplicar a **zonas rectas, con visibilidad que decrece linealmente**, y a zonas curvas, con visibilidad constante, en un rango de **radios de curvatura amplios**, en el que las velocidades no están afectadas por la geometría. Además, se puede aplicar a zonas compuestas por elementos rectos y curvos. Para ello, se debe dividir la zona y tener en cuenta lo siguiente:

- i. En los primeros elementos los criterios de distancia de visibilidad suponen valores mínimos, pudiendo la visibilidad exceder dichos valores, ya que no existe riesgo de rebase de la prohibición de adelantamiento.
 - ii. En el último elemento, o en el caso de zonas completamente contenidas en rectas o en curvas, el valor de la visibilidad debe ajustarse al criterio, no debiendo excederlo, para no provocar un aumento en el número de maniobras que incumplan la prohibición.
- e. Para una **velocidad de operación de 100 km/h**, los valores de **distancia de visibilidad para finalizar una zona de adelantamiento** en recta son de unos **222 m**, siendo la **longitud mínima de 293 m**. En tramos curvos, por el contrario, estos valores varían entre 428 m en zonas cortas (de 200 m de longitud) y 565 m en zonas largas (de 1000 m de longitud).

La presente tesis ha supuesto un amplio estudio de la maniobra de adelantamiento en carreteras convencionales, incorporando un gran número de factores y variables. De forma adicional a las limitaciones establecidas en la sección 6, se han identificado algunas adicionales.

Los resultados del estudio no deben extrapolarse, o deben extrapolarse con precaución, a otros escenarios u otras condiciones distintas a las de la toma de datos. De esta forma, se limitan, en principio, a las carreteras convencionales en el área geográfica de la provincia de Valencia. No puede afirmarse que el comportamiento de los conductores sea igual en otras regiones o países, por lo que alguno de los resultados puede variar de forma significativa.

Igualmente, existen algunos factores que potencialmente influyen en el desarrollo de la maniobra de adelantamiento, y no se han tenido en cuenta en el estudio. Dentro de este conjunto de factores se encuentran, entre otros, la meteorología adversa o la existencia de pendientes pronunciadas en la carretera, tal como se comentó.

Otras limitaciones más concretas ya han sido comentadas, de forma particular, en cada uno de los apartados del documento. En el siguiente capítulo se formulan, además, un conjunto de futuras líneas de investigación dirigidas a la resolución de las limitaciones halladas en este trabajo.

15. Futuras líneas de investigación

Tal como se ha destacado, la presente tesis ha supuesto un avance significativo en el conocimiento del fenómeno del adelantamiento en carretera convencional, respecto a estudios anteriores a nivel mundial, y de forma todavía más destacada, respecto a los estudios realizados en el ámbito geográfico de España.

No obstante, en este capítulo, se recogen a modo de resumen, una serie de líneas de investigación que el propio estudio no ha sido capaz de abarcar, o que se han ido descubriendo a lo largo del mismo.

La mayor parte de las mismas se centran en un análisis más profundo del comportamiento del conductor, o en las posibles aplicaciones de los resultados del estudio a sistemas inteligentes de tráfico para carreteras convencionales.

A continuación se enumeran algunas de estas posibles líneas de investigación:

1. Estudio de los efectos de la maniobra de adelantamiento en la operación del tráfico. Tal como se ha comentado, además de la seguridad vial, otro de los aspectos fundamentales relacionados con el adelantamiento es la operación del tráfico y la potencial mejora del nivel de servicio. Los datos obtenidos, junto a las herramientas de microsimulación desarrolladas, permiten realizar este estudio. Los resultados pretenden caracterizar el efecto del adelantamiento a partir de la distribución de zonas de adelantamiento en tramos de carretera convencional, de manera que sería posible ampliar los criterios de distancia de visibilidad con criterios de distribución de zonas a lo largo de la vía. Esta línea de investigación se desarrolló de forma paralela a lo largo del presente trabajo, si bien se encuentra contenida en otra tesis doctoral.
2. Caracterización de la posición crítica: la ausencia de observaciones de maniobras abortadas sugirió, en este estudio, que el comportamiento de los conductores era conservador y no se llevaban a cabo maniobras si no se estaba seguro de que fuera posible completarlas con seguridad. Por este motivo, no se asumió la existencia de la posición crítica o punto de no-retorno de forma experimental, y simplemente se dedujeron, de forma teórica, varias posibles localizaciones. La ampliación del tamaño de la muestra podría conducir a la observación de más maniobras abortadas, lo que permitiría formular un segundo modelo de decisión binaria (abortar o seguir adelantando), válido durante el transcurso del adelantamiento. Entre las variables explicativas que podrían afectar a esta elección se encuentran la capacidad de aceleración del vehículo, la distancia de visibilidad disponible o el porcentaje de avance dentro de la maniobra de adelantamiento.
3. Análisis de la influencia de distintos tipos de recorrido: a pesar de no existir datos al respecto, la mayor parte de observaciones, al estar obtenidas en el entorno más o menos cercano a la ciudad y en días laborables, corresponderían con viajes de corto recorrido, como desplazamientos por motivo de acudir al trabajo. Sin embargo, existen otros

tramos de carretera más alejados de núcleos de población en los que es posible que la mayor parte de los conductores realicen viajes de largo recorrido. La hipótesis que se desprende de ello es que el comportamiento de los conductores, en relación a asumir riesgos o demandar maniobras de adelantamiento, puede ser distinta en función del periodo de tiempo o de la zona geográfica donde se sitúa el tramo de carretera. Para ello, debería extenderse la toma de datos en tramos de carretera en los que se espere que existan viajes de largo recorrido. El inconveniente, hasta el momento, es el mayor alejamiento al centro de investigación y el menor volumen de tráfico de dichos tramos, lo que incrementa los recursos necesarios.

4. Análisis de la influencia del tiempo hasta el final del viaje: el adelantamiento supone una maniobra que, en mayor o menor medida, implica asumir un riesgo. Lo lógico es que exista una ganancia o ventaja al adelantar, que es la reducción de la demora sufrida por circular a menor velocidad que la deseada. Por ello, si las ventajas de adelantar son despreciables, como por ejemplo sucede cuando en muy poco tiempo va a finalizar el viaje o en muy pocos metros comienza un tramo de más de un carril por sentido, sería razonable esperar que la demanda de adelantamientos sea inferior. El estudio de este comportamiento requeriría la selección de tramos de carretera convencional adyacentes a tramos de autovía, a la vez que de tramos de carretera convencional de idénticas características, pero alejados de vías de más de un carril por sentido.
5. Estudio de la reducción de visibilidad causada por vehículos adelantados en curvas a derechas de radio amplio, con adelantamiento permitido: de la presente tesis se concluyó que al adelantar a vehículos pesados es necesario ocupar durante un mayor tiempo el carril izquierdo. Sin embargo, no se analizó la interacción existente entre un vehículo pesado y el que desea adelantarlo. El gran tamaño de este tipo de vehículos supone una obstrucción a la visibilidad, especialmente significativa en curvas a derecha en las que es posible adelantar. En estos elementos del trazado, los vehículos pesados pueden llegar a ocultar a vehículos en sentido opuesto durante un tiempo elevado, provocando situaciones potencialmente conflictivas. Con el objetivo de adaptar los criterios de diseño de zonas de adelantamiento a esta problemática, es necesario ampliar la toma de datos experimentales a tramos de carretera en los que existan curvas a derecha. Con ello, será posible identificar umbrales para los radios de curvatura y longitudes de curva en los que podría ser necesario prohibir el adelantamiento.
6. Mejora de los criterios de diseño de zonas de adelantamiento, para tramos con intensidades de tráfico compuestas por un gran porcentaje de pesados.
7. Comparación de los datos experimentales con datos de simuladores de conducción: otros investigadores han empleado simuladores de conducción para estudiar el fenómeno del adelantamiento. Las ventajas de ello, a parte de la mayor rapidez para adquirir datos, son el mejor conocimiento de los conductores. Los posibles problemas se derivan de la ausencia de riesgo y de la falta de resolución de las pantallas, lo que dificulta la detección de vehículos opuestos muy alejados. Sin embargo, ninguna investigación ha comparado la validez de los datos procedentes del simulador de conducción, a pesar de emplear sus resultados para distintos estudios.
8. Mejora de los modelos de seguimiento (car-following), con el objeto de caracterizar esta maniobra en carreteras convencionales. A diferencia de otros tipos de vía, en estas carreteras se observaron distancias de seguridad más bajas (por debajo de los umbrales considerados seguros), que oscilaban de forma paralela a la toma de decisiones de adelantar. En este sentido, se debería realizar una evaluación ambiental y energética de los

vehículos seguidores, respecto a la conducción en flujo libre, así como un análisis de conflictos durante la maniobra de seguimiento.

9. Aplicación a sistemas de ayuda al adelantamiento: los datos obtenidos en esta investigación suponen una fuente de información valiosa para el desarrollo de sistemas de ayuda a la conducción, en concreto, para la ayuda al adelantamiento. Hasta el momento, apenas existen estudios que abarquen este tema, si bien sí que se han propuesto algunos prototipos. Uno de los requisitos para el desarrollo de estos sistemas de asistencia es la caracterización detallada de los márgenes de seguridad asumibles en el desarrollo de la maniobra de adelantamiento. Es posible, por lo tanto, que los datos obtenidos puedan significar un punto de partida para el desarrollo y calibración de sistemas de alerta para el adelantamiento en carretera convencional, y orientados hacia la conducción automática.

16. Agradecimientos

El desarrollo de la presente tesis no hubiera sido posible sin la participación de las siguientes entidades:

- Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, por la concesión de la ayuda del programa de Formación de Profesorado Universitario (FPU).
- Ministerio de Economía y Competitividad, por la subvención del proyecto “Desarrollo de modelos de distancias de visibilidad de adelantamiento”, con referencia TRA 2010-21736.
- Conselleria de Educación de la Generalitat Valenciana, por la subvención de la ayuda complementaria “Caracterización del adelantamiento a vehículos pesados”, con referencia ACOMP2012/071.
- Programa Transatlantic Partnership for Excellence in Engineering (TEE) en el marco del programa Erasmus Mundus Action 2, por la ayuda concedida para la realización de una estancia breve de 6 meses en la Universidad de British Columbia (Canadá).

Igualmente, destaca la colaboración y apoyo durante la realización de la toma de datos de la Dirección General de Tráfico, la Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente, la Diputación Provincial de Valencia y la Demarcación de Carreteras del Ministerio de Fomento en la Comunidad Valenciana.

17. Referencias

American Association of State Highway and Transportation Official, 2004. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 5th Edition.

American Association of State Highway and Transportation Official, 2011. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 6th Edition.

Área de Carreteras de la Diputación Provincial de Valencia, 2011. Libro de aforos.

Barceló, J., 2010. Models, traffic models and traffic simulation, in: Fundamentals of Traffic Simulation. Springer Science + Business Media, New York (US), pp. 1–62.

Bar-Gera, H., Shinar, D., 2005. The tendency of drivers to pass other vehicles. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 8, 429–439. doi:10.1016/j.trf.2005.06.001

Bella, F., 2011. How Traffic Conditions Affect Driver Behavior in Passing Maneuver, in: 3rd International Conference on Road Safety and Simulation. Indianapolis, US, pp. 1–17.

Bessa, J.E., Setti, J.R., 2011. Derivation of ATS and PTSF Functions for Two-lane, Rural Highways in Brazil. Procedia - Social and Behavioral Sciences 16, 282–292. doi:10.1016/j.sbspro.2011.04.450

Cafiso, S., Garcia, A., Cavarra, R., 2011. Before-and-After Study of Crosswalks Using Pedestrian Risk Index, in: Transportation Research Board 90th Annual Meeting. Washington DC (US), p. 14.

Carlson, P., Miles, J., Johnson, P., 2006. Daytime High-Speed Passing Maneuvers Observed on Rural Two-Lane, Two-Way Highway: Findings and Implications. Transportation Research Record 1961, 9–15. doi:10.3141/1961-02

Carlsson, A., 1991. Overtaking Behavior on Two-Lane Rural Roads, in: VTI Report 372A:PT3.

Clarke, D.D., Ward, P.J., Jones, J., 1998. Overtaking road-accidents: differences in manoeuvre as a function of driver age. Accident; analysis and prevention 30, 455–67.

Conselleria de infraestructuras Territorio y Medio Ambiente, 2012. Memoria Anual de Aforos.

Devarasetty, P.C., Zhang, Y., Fitzpatrick, K., 2012. Differentiating between Left-Turn Gap and Lag Acceptance at Unsignalized Intersections as a Function of the Site Characteristics. Journal of Transportation Engineering 138, 580–588. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.00003680

Dey, P.P., Chandra, S., Gangopadhyay, S., 2008. Simulation of Mixed Traffic Flow on Two-Lane Roads. Journal of Transportation Engineering 134, 361–369. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2008)134:9(361)

El-bassiouni, S., Sayed, T., 2010. Design Requirements for Passing Sight Distance : A Risk-based Approach, in: 90th Transportation Research Board Annual Meeting.

- Farah, H., 2011. Age and Gender Differences in Overtaking on Two-Lane Rural Highways, in: Transportation Research Board 90th Annual Meeting. Washington DC (US), pp. 1–23.
- Farah, H., Bekhor, S., Polus, A., 2009a. Risk evaluation by modeling of passing behavior on two-lane rural highways. *Accident; analysis and prevention* 41, 887–94. doi:10.1016/j.aap.2009.05.006
- Farah, H., Bekhor, S., Polus, A., 2009b. Risk evaluation by modeling of passing behavior on two-lane rural highways. *Accident; analysis and prevention* 41, 887–94. doi:10.1016/j.aap.2009.05.006
- Farah, H., Toledo, T., 2010. Passing behavior on two-lane highways. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 13, 355–364. doi:10.1016/j.trf.2010.07.003
- Farber, E., 1969. Passing Behavior on Public Highways Under Daytime and Nighttime Conditions. *Highway Research Record* 1292, 11–23.
- Federal Highway Administration, 1994. The Magnitude and Severity of Passing Accidents on Two-Lane Rural Roads (HSIS Summary Report). Report No. FHWA-RD-94-068.
- Federal Highway Administration, 2003. Surrogate Safety Measures From Traffic Simulation Models - Final Report. Publication No: FHWA-RD-03-050.
- Federal Highway Administration, 2009. Manual on Uniform Traffic Control Devices.
- Fitzpatrick, K., Chrysler, S.T., Brewer, M., 2012. Deceleration Lengths for Exit Terminals 768–775. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000380.
- Ghods, A.H., Saccomanno, F.F., 2014. Microscopic Overtaking Gap Acceptance Model for Two-lane Highways, in: 93rd Transportation Research Board Annual Meeting. Washington DC (US).
- Gipps, P.G., 1981. A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological* 15, 105–111. doi:10.1016/0191-2615(81)90037-0
- Glennon, J.C., 1988. New and improved model of passing sight distance on two-lane highways, *Transportation Research Record*.
- Haleem, K., Abdel-aty, M., Mackie, K., 2010. Using a reliability process to reduce uncertainty in predicting crashes at unsignalized intersections 42, 654–666. doi:10.1016/j.aap.2009.10.012
- Hanley, P.F., Forkenbrock, D.J., 2005. Safety of passing longer combination vehicles on two-lane highways. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 39, 1–15. doi:10.1016/j.tra.2004.09.001
- Harwood, D.W., Fambro, D.B., Fishburn, B., Joubert, A., Lamm, R., Psarianos, B., 1998. International Sight Distance Design Practices, in: *Transportation Research Circular E-003*.
- Harwood, D.W., Gilmore, D.K., Richard, K.R., 2010. Passing Sight Distance Criteria for Roadway Design and Marking. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2195, 36–46.
- Harwood, D.W., Gilmore, D.K., Richard, K.R., Dunn, J.M., Sun, C., 2008. Passing Sight Distance Criteria. NCHRP Report 605.
- Harwood, D.W., Glennon, J.C., 1976. Framework for Design and Operation of Passing Zones on Two-Lane Highways. *Transportation Research Record* 601, 45–50.

- Harwood, D.W., Glennon, J.C., 1989. Passing Sight Distance Design for Passenger Cars and Trucks. *Transportation Research Record* 1208, 59–69.
- Harwood, D.W., May, A.D., Anderson, L.B., Leiman, L., Archilla, A.R., 1999. Capacity and quality of service of two-lane highways. Publication NCHRP Project 3-55.
- Hassan, Y., Easa, S.M., El Halim, A.O.A., 1996. Passing sight distance on two-lane highways: Review and revision. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 30, 453–467. doi:10.1016/0965-8564(95)00032-1
- Hayward, J., 1972. Near miss determination through use of a scale of danger. Report no. TTSC 7115, The Pennsylvania State University.
- Hegeman, G., 2008. Assited Overtaking, An Assessment of Overtaking on Two-Lane Rural Roads. PhD Thesis. TU Delft.
- Hegeman, G., Tapani, A., Hoogendoorn, S., 2009. Overtaking assistant assessment using traffic simulation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 17, 617–630. doi:10.1016/j.trc.2009.04.010
- Hunt, G., Mahdi, T.A., 1991. Overtaking Behavior on Single Carriageway Roads in the United Kingdom, in: VTI Report 372A:PT3.
- Ibrahim, S.E., Sayed, T., 2011. Developing safety performance functions incorporating reliability-based risk measures. *Accident Analysis and Prevention* 43, 2153–2159. doi:10.1016/j.aap.2011.06.006
- Ismail, K., Sayed, T., 2009. Risk-based framework for accommodating uncertainty in highway geometric design. *Canadian Journal of Civil Engineering* 36, 743–753. doi:10.1139/L08-146
- Jenkins, J.M., Rilett, L.R., 2004. Application of distributed traffic simulation for passing behavior study, in: *Transportation Research Record*. pp. 11–18.
- Kaub, A.R., 1990. Passing Operations on a Recreational Two-lane, Two-way Highway. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1280, 156–152.
- Kaysi, I.A., Abbany, A.S., 2007. Modeling aggressive driver behavior at unsignalized intersections. *Accident; analysis and prevention* 39, 671–8. doi:10.1016/j.aap.2006.10.013
- Khoury, J. El, Hobeika, A., 2007a. Incorporating Uncertainty into the Estimation of the Passing Sight Distance Requirements. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 22, 347–357. doi:10.1111/j.1467-8667.2007.00491.x
- Khoury, J. El, Hobeika, A.G., 2007b. Assessing the Risk in the Design of Passing Sight Distances. *Journal of Transportation Engineering* 370–377.
- Khoury, J. El, Hobeika, A.G., 2012. Integrated Stochastic Approach for Risk and Service Estimation: Passing Sight Distance Application. *Journal of Transportation Engineering* 571–579. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000366.
- Kim, J., Elefteriadou, L., 2010. Estimation of Capacity of Two-Lane Two-Way Highways Using Simulation Model. *Journal of Transportation Engineering* 136, 61–66. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2010)136:1(61)

- Lenning, S., Goodley, S., Starner, G., 2003. Gap acceptance and risk taking behavior by young and mature drivers, both sober and under the influence of alcohol in a simulated driving task. Motor Accident Authority of New South Wales.
- Li, J., Washburn, S.S., 2011. Implementing Two-lane Highway Simulation Modeling into CORSIM. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 16, 293–305. doi:10.1016/j.sbspro.2011.04.451
- Lieberman, E.B., 1982. Model for Calculating Safe Passing Sight Distance on Two-Lane Rural Roads. *Transportation Research Record* 869, 70–76.
- Minderhoud, M.M., Bovy, P.H., 2001. Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment. *Accident; analysis and prevention* 33, 89–97.
- Ministerio de Fomento, 1987. Instrucción de Carreteras 8.2 IC: Señalización horizontal.
- Ministerio de Fomento, 1999. Instrucción de Carreteras 8.1. IC: Señalización vertical.
- Ministerio de Fomento, 2000. Instrucción de Carreteras 3.1 IC: Trazado.
- Ministerio de Fomento, 2012. Mapa de Tráfico 2012.
- Ministerio de Fomento, 2014. Instrucción de Carreteras 8.1 IC: Señalización vertical.
- Ministerio del Interior, 2003. Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Circulación.
- Ministerio del Interior, 2012. Anuario Estadístico de Accidentes.
- Mohaymany, A.S., Kashani, A.T., Ranjbari, A., 2010. Identifying driver characteristics influencing overtaking crashes. *Traffic injury prevention* 11, 411–6. doi:10.1080/15389588.2010.485283
- Molinero, A., Carter, E., Naing, C., Simon, M., Hermintte, T., 2008. Accident causation and pre-accidental driving situations. Part 1. Overview and general statistics, TRACE - Traffic Accident Causation in Europe Report.
- Morrall, J.F., Werner, A., 1982. Measurement of Level of Service for Two-Lane Rural Highways. *Canadian Journal of Civil Engineering* 9, 1982.
- Normann, O.K., 1939. Progress in Study of Motor Vehicle Passing Practices. *Highway Research Board Proceedings*, 19, 206–217.
- Normann, O.K., 1958. Driver passing practices. *Bulletin* 195, HRB 8–13.
- Ortega, V., Garcia, A., 2000. Estudio de los factores relacionados con los vehículos que influyen en las visibilidades de las redes viarias, in: IV Congreso de Ingeniería del Transporte. Valencia (ES).
- Pérez, A.M. Caracterización y modelización de la velocidad de operación en carreteras convencionales a partir de la observación naturalística de la evolución de vehículos ligeros. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.
- Perkins, S., Harris, J., 1967. Criteria for Traffic Conflict Characteristics. Report GMR632, Warren, MI, General Motors Corporation.
- Polus, A., Livneh, M., Frischer, B., 2000. Evaluation of the Passing Process on Two-Lane Rural Highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1701, 53–60.

- Prisk, C.W., 1941. Passing Practices on Rural Highways. Highway Research Board Proceedings 21, 366–378.
- Rakha, H., Snare, M., Dion, F., 2004. Vehicle Dynamics Model for Estimating Maximum Light-Duty Vehicle Acceleration Levels. Transportation Research Record 1883, 40–49. doi:10.3141/1883-05
- Rillet, L.R., Hutchinson, B.G., Whitney, M., 1990. Mechanics of the Passing Maneuver and the Impact of Large Trucks. Transportation Research Part A: Policy and Practice 24A, 121–128.
- Rocci, S., 1998. A System for No-passing Zone Signing and Marking Setup, in: Transportation Research Circular E-003.
- Romana, M., 1999. Passing Activity on Two-Lane Highways in Spain. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1678, 1–6.
- Saito, M., 1984. Evaluation of the MUTCD Minimum Passing Sight Distance Requirement for Aborting the Passing Maneuvers. ITE Journal 54, 18–22.
- Sparks, B.G.A., Neudorf, R.D., Robinson, J.B.L., Good, D., 1993. Effect Of Vehicle Length On Passing Operations. Journal of Transportation Engineering 119.
- Tapani, A., 2005. Versatile model for simulation of rural road traffic. Transportation Research Record 169–178.
- Transport Simulation Systems, 2013. TSS Aimsun 8.0.2. User Manual.
- Transportation Research Board, 2010. Highway Capacity Manual.
- Troutbeck, R.J., 1981. Overtaking Behavior on Australian Two-Lane Rural Highways. Australian Road Research Board Special Report SR20.
- Valencia-Alaix, V., García, A., 2010. Procedures to facilitate passing on conventional highways by means of simulation, in: 4th International Symposium on Highway Geometric Design. Valencia (ES).
- Van Valkenburg, G.W., Michael, K., 1971. Criteria for No-Passing Zones. Highway Research Record 377, 1–19.
- Vlahogianni, E.I., 2013. Modeling duration of overtaking in two lane highways. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 20, 135–146. doi:10.1016/j.trf.2013.07.003
- Vlahogianni, E.I., Golias, J.C., 2012. Bayesian modeling of the microscopic traffic characteristics of overtaking in two-lane highways. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 15, 348–357. doi:10.1016/j.trf.2012.02.002
- Wakabayashi, H., Muramatsu, S., 2007. Traffic Conflict Analysis using Vehicle Tracking System with Digital VCR and New Conflict Indicator under High Speed and Congested Traffic Environment, in: 19th Dresden Conference on Traffic and Transportation Sciences, “Mobility and Traffic Management in a Networked World.”
- Wang, Y., Cartmell, M.P., 1998. New model for passing sight distance on two-lane highways. Journal of Transportation Engineering 124, 536–544.
- Weaver, G.D., Glennon, J.C., 1972. Design and Stripping for Safe Passing Operations. Highway Research Record 388, 36–39.

Younsi, K., Floris, J., Rajaonah, B., Simon, P., Loslever, P., Popieul, J.-C., 2011. Study of driver ' s behavior during overtaking situations. *Advances in Transportation Studies: an international Journal* 25, 29–38.

I) Publicaciones propias relacionadas

Las publicaciones directamente relacionadas con la tesis son las que se han subrayado. El resto se corresponde con temas derivados del proyecto de investigación “Desarrollo de modelos de distancias de visibilidad de adelantamiento”.

Revistas (inglés)

1. Llorca, C., García, A., 2011. Evaluation of Passing Process on Two-Lane Rural Highways in Spain with New Methodology Based on Video Data. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2262, 42–51. doi:10.3141/2262-05.
 - . Citado por:
 - i. Farah, H., 2013. Modeling drivers’ passing duration and distance in a virtual environment. IATSS Research 37, 61–67. doi:10.1016/j.iatssr.2013.03.001
 - ii. Mwesige, G., Farah, H., Bagampadde, U., Koutsopoulos, H.N., 2014. Capacity and Safety of Passing Zones on Two-Lane Rural Highways: A Review of Theory and Practice. Journal of Traffic and Logistics Engineering 2, 156–163. doi:10.12720/jtle.2.2.156-163
2. Llorca, C., García, A., Moreno, A.T., Pérez-Zuriaga, A.M., 2013a. Influence of age, gender and delay on overtaking dynamics. IET Intelligent Transport Systems 7, 174–181. doi:10.1049/iet-its.2012.0147
3. Llorca, C., Moreno, A.T., García, A., Pérez-Zuriaga, A.M., 2013b. Daytime and Nighttime Passing Maneuvers on a Two-Lane Rural Road in Spain. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2358, 3–11. doi:10.3141/2358-01
 - . Citado por
 - i. Yang, A., Yuan, S., Zhao, Y., Ding, Q., Yan, L., 2014. Research of two-factor optimization model of a multi-lane freeway traffic rules. BioTechnology: An Indian Journal 10, 299–305.
4. Llorca, C., Moreno, A.T., García, A., Pérez-Zuriaga, A.M., 2014a. Multiple Passing Maneuvers: New Design and Marking Criteria to Improve Safety. Advances in Transportation Studies: an international Journal Special Is, 71–82.
5. Moreno, A.T., Llorca, C., García, A., Perez, A.M., 2013. Operational Effectiveness of Passing Zones Depending on Length and Traffic Volume. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2395, 57–65.
6. Llorca, C., Moreno, A.T., Lenorzer, A., Casas, J., García, A., 2014b. Development of a new microscopic passing maneuver model for two-lane rural roads. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. In press. doi:10.1016/j.trc.2014.06.001
7. Llorca, C., Moreno, A.T., Sayed, T., García, A., 2014c. Sight Distance Standards Based on Observational Data Risk Evaluation of Passing. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2404, 18–26. doi:10.3141/2404-03

8. Moreno, A.T., Llorca, C., Lenorzer, A., Casas, J. y García, A., 2015. Minimum Passing Zone Length Design Criteria Considering Operational and Safety Impacts. Aceptado para Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.

Revistas (español)

1. García, A., Romero, M.A., Moreno, A.T., Llorca, C., 2010. Desarrollo y aplicaciones de un nuevo Laboratorio Móvil de Tráfico. Rutas 139, 10-17.
2. García, A., Llorca, C., Moreno, A.T., Perez, A.M., 2012. Desarrollo y Aplicaciones de un Vehículo Instrumentalizado: Observación de Maniobras de Adelantamiento. Rutas 148, 28–37.
3. Moreno, A.T., Llorca, C., Bessa, J.E., García, A., Hale, D.K., 2014. Evaluación de medidas de desempeño del tráfico considerando las zonas de adelantamiento de carreteras convencionales con TWOPAS, Carreteras, in press.

Libros

1. Llorca, C., Moreno, A.T., García, A., 2014. Revisión de criterios de distancia de visibilidad de adelantamiento. Cuaderno de la Plataforma Tecnológica de la Carretera.

Congresos

1. Llorca C., García, A. "Evaluation of passing process on Two-Lane Rural Highways in Spain Using a New Methodology Based on Video Data" , 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., Jan 2011.
 - . Citado por
 - i. Vlahogianni, E.I., Golias, J.C., 2012. Bayesian modeling of the microscopic traffic characteristics of overtaking in two-lane highways. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 15, 348–357. doi:10.1016/j.trf.2012.02.002
 - ii. Vlahogianni, E.I., 2013. Modeling duration of overtaking in two lane highways. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 20, 135–146. doi:10.1016/j.trf.2013.07.003
 - iii. Bella, F., 2011. How Traffic Conditions Affect Driver Behavior in Passing Maneuver, in: 3rd International Conference on Road Safety and Simulation. Indianapolis, US, pp. 1–17.
2. Llorca, C., García, A., Perez, A.M., Moreno, A.T. "New experimental approach for passing gap acceptance", 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., Jan. 2012.
 - . Citado por
 - i. Vlahogianni, E.I., Golias, J.C., 2012. Bayesian modeling of the microscopic traffic characteristics of overtaking in two-lane highways. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 15, 348–357. doi:10.1016/j.trf.2012.02.002

- ii. Vlahogianni, E.I., 2013. Modeling duration of overtaking in two lane highways. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 20, 135–146. doi:10.1016/j.trf.2013.07.003
- 3. Llorca, C., García, A., Moreno, A.T., Perez, A.M. “Evaluación de la efectividad de las zonas de adelantamiento en carretera convencional en función de su longitud”, X Congreso de Ingeniería del Transporte, Granada, Jun. 2012.
- 4. Llorca, C., García, A., Moreno, A.T., Perez, A.M. “Human factor effects on passing decisions”, European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems”, Valencia, Jun 2012.
- 5. Moreno, A.T., Llorca, C., García, A., Perez, A.M. Operational effectiveness of passing zones depending on their length and traffic volume, 92nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., Jan 2013.
 - . citado por
 - i. Wu, L., Chu, J., Ci, Y., Feng, S., Liu, X., 2014. Engineering Solutions to Enhance Traffic Safety Performance on Two-Lane Highways. *Mathematical Problems in Engineering*. In press
- 6. Llorca, C., Moreno, A.T., García, A., Perez, A.M. Observations of daytime and nighttime passing maneuvers on a two-lane rural road in Spain, 92nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., Jan. 2013.
- 7. Llorca, C., Moreno, A.T., Garcia, A., Pérez, A.M. y Camacho, F.J. Multiple passing maneuvers: New design and marking criteria to improve safety, 4th International Conference on Road Safety and Simulation (RSS 2013), Roma, Oct 2013.
- 8. Perez, A.M., Camacho, F.J., Garcia, A., Llorca, C. y Moreno, A.T. Analyzing speeding behavior in two-lane rural roads, 4th International Conference on Road Safety and Simulation (RSS 2013), Roma, Oct 2013.
- 9. Llorca, C., Moreno, A.T., Sayed, T. y García, A. Risk Evaluation Of Passing Sight Distance Standards Based On Observational Data, 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB), Washington DC, Jan 2014.
- 10. Moreno, A.T., Llorca, C., Sayed, T. y García, A. Field Evaluation of Traffic Performance Measures for Two-Lane Highways in Spain, 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB), Washington DC, Jan 2014.
- 11. Llorca, C., Moreno, A.T. Valencia, V. y García, A. Daytime and Nighttime Following Behavior on a Monitored Two-Lane Rural Road, 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB), Washington DC, Jan 2014.
- 12. Llorca, C. Gómez, E.L., Garcia, A. Moreno, A.T. y Pérez, A.M. Estudio del adelantamiento a camiones en carretera convencional. XI Congreso de Ingeniería del Transporte, Santander, Jun 2014.
- 13. Moreno, A.T., Llorca, C., Bessa, J. Garcia, A. y Hale, D.K., Evaluación de medidas de desempeño del tráfico considerando las zonas de adelantamiento en carreteras convencionales con TWOPAS. XI Congreso de Ingeniería del Transporte, Santander, Jun 2014.
- 14. Moreno, A.T., Llorca, C., Lenorzer, A., Casas, J. y García, A., 2015. Minimum Passing Zone Length Design Criteria Considering Operational and Safety Impacts. 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB), Washington DC, Jan 2015.

II) Traducción al Inglés – Translation to English

Title of the Thesis: "Analysis of passing on two-lane rural roads and proposal of models to improve geometric design and marking".

2. Introduction

Passing maneuvers reduce interferences between vehicles travelling at different speeds, improving level of service of roads. On two-lane rural roads, this maneuver requires occupying the opposing lane. This affects both operation and safety.

This PhD Thesis focuses solely on passing maneuvers on two-lane rural roads.

2.1. Description of passing maneuver

Passing is a complex maneuver, which involves different stages, from the time a faster vehicle approaches a slower one until the end of the maneuver. The slow vehicle is also known as the "impeding" vehicle or the "leader" vehicle, while the faster vehicle is the "following" vehicle (before passing) or simply the "passing" vehicle (during passing).

Generally, passing is divided into the following three phases.

2.1.1. Passing desire

It is the passing demand. The passing desire or necessity depends on the difference between the speed of leader vehicle and the speed the following vehicle desires. The higher the difference, the higher the passing desire.

However, different drivers under different conditions perceive the delay in a different way, depending on the time until the end of the trip, impatience or their personal preferences, among other factors.

If passing desire is positive, drivers evaluate the possibility of performing a passing maneuver in the next phase.

2.1.2. Passing decision

Passing decisions are a gap acceptance process. Gaps between vehicles on the opposing traffic flow are evaluated in this phase. Drivers can reject or accept those gaps, depending on their size (time or distance between vehicles), available sight distance or impatience.

Drivers accepting a gap perform a passing maneuver, as described in the next phase.

2.1.3. Passing execution

Firstly, the passing vehicle changes to the opposing lane. The passing vehicle travels at a higher speed, until it passes by the impeding vehicle. After that, the passing vehicle returns to its own lane.

Two types of maneuvers are defined, according to the acceleration process. If the passing vehicles was travelling behind the impeding vehicle at the same speed, the maneuver is called “following”. On the other hand, if the passing vehicles approached the slower one and passed it without reducing significantly its speed, the maneuver is called “flying”.

During the maneuver, it is possible to abort, and return to the own lane without passing. This may occur when an opposing vehicle appears suddenly, or by a miscalculation of the available gap. Many authors define a critical point, or point of no return. After the critical point, it is better to complete the maneuver rather than abort it.

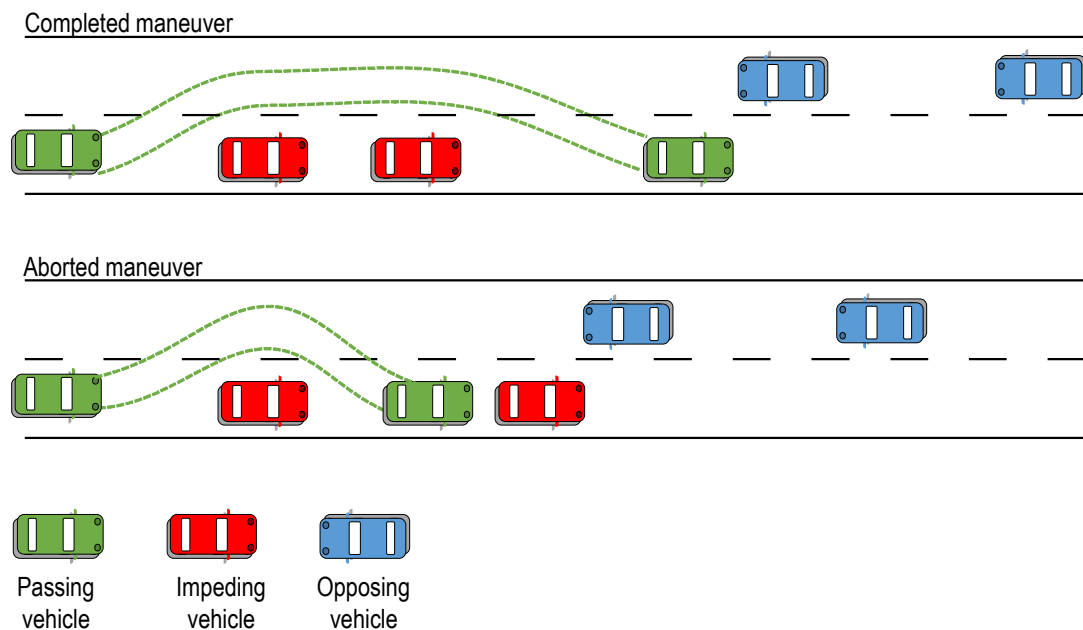


FIGURE II-1. PASSING AND IMPEDING VEHICLE TRAJECTORIES

Figure II-1 represents the trajectories of impeding and passing vehicles on completed and aborted maneuvers. Figure II-2 and Figure II-3 shows the space-time diagrams of completed, aborted, following and flying maneuvers.

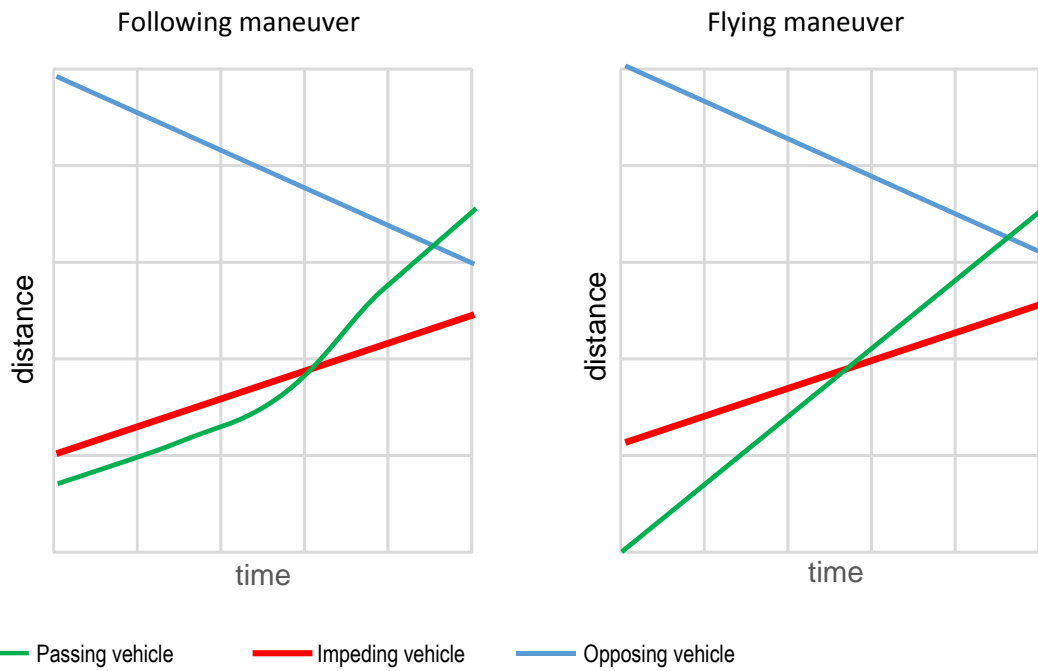


FIGURE II-2. SPACE-TIME DIAGRAM OF COMPLETED MANEUVERS

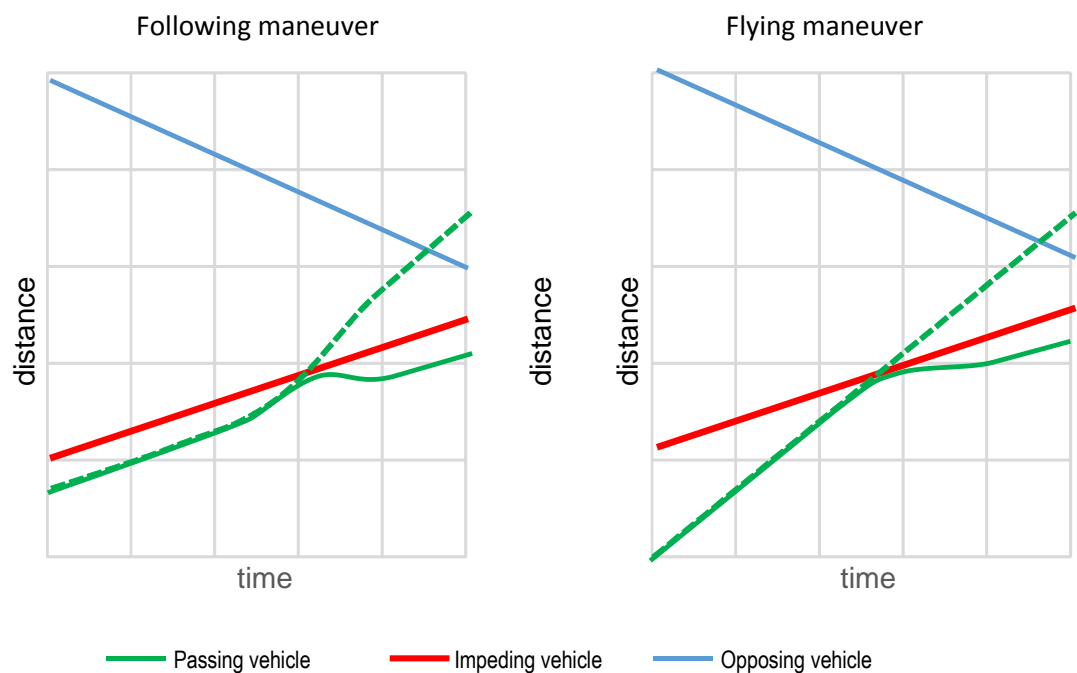


FIGURE II-3. SPACE-TIME DIAGRAM OF ABORTED MANEUVERS

2.2. Factors

As previously explained, passing is a complex maneuver, involving several decisions. The following factors may affect how drivers take these decisions.

Road geometry and presence of obstacles affect the available sight distance, which is required to pass other vehicles without risk. Besides, longitudinal gradient may affect acceleration and deceleration of vehicles during passing maneuvers.

Traffic on the road affects also passing. By increasing traffic volume, more drivers would desire passing. However, the existence of a higher opposing traffic flow reduces the opportunities. On the other hand, speed distribution is a significant factor. Higher dispersion of speeds increases the demand of passing maneuvers. For this reason, the higher the percentage of heavy vehicles, the higher the passing demand.

Both impeding and passing vehicle size and acceleration capacities affect the maneuver, especially if heavy vehicles are compared with light vehicles. The presence of trucks reduces the sight distance, due to their large size.

Moreover, driver's decisions are fundamental for passing maneuver. Drivers behavior depends on personal preferences, anger, risk taking, previous knowledge of the road, impatience, etc.

Lastly, external factors, such as road lighting or weather may affect passing maneuvers.

2.3. Road operation

Passing maneuver reduces the interferences between faster and slower vehicles on two-lane rural roads. For this reason, providing more passing zones improves the level of service of a road.

According to the Highway Capacity Manual (Transportation Research Board, 2010), level of service depends on Average Travel Speed (ATS) and on Percent of Time Spent Following (PTSF). PTSF depends on traffic volume, their proportion on both travel directions, and the percentage of no-passing zones.

2.4. Road safety

Passing is one of the most dangerous maneuvers, as it involves up to three vehicles (impeding, passing and opposing) travelling at higher speed. The passing and the opposing vehicle occupy the same lane during the maneuver and approach at a very high relative speed.

There are many types of crashes related to passing maneuver, apart from head-on collisions. Although frequency of crashes caused by passing maneuvers is relatively low, their severity is high. Usually, the consequences are severe injuries or fatalities.

2.5. Passing sight distance

Passing sight distance (PSD) is the distance required to pass a slower vehicle, considering an opposing vehicle approaching at the same time. A driver who wants to pass a vehicle must verify that there is no vehicle or obstacle on such a distance.

Passing sight distance is the sum of the distance required by the passing vehicle to pass the slower one, the distance travelled by an opposing vehicle at the same time plus an extra safety margin, as shown in the Figure II-4.

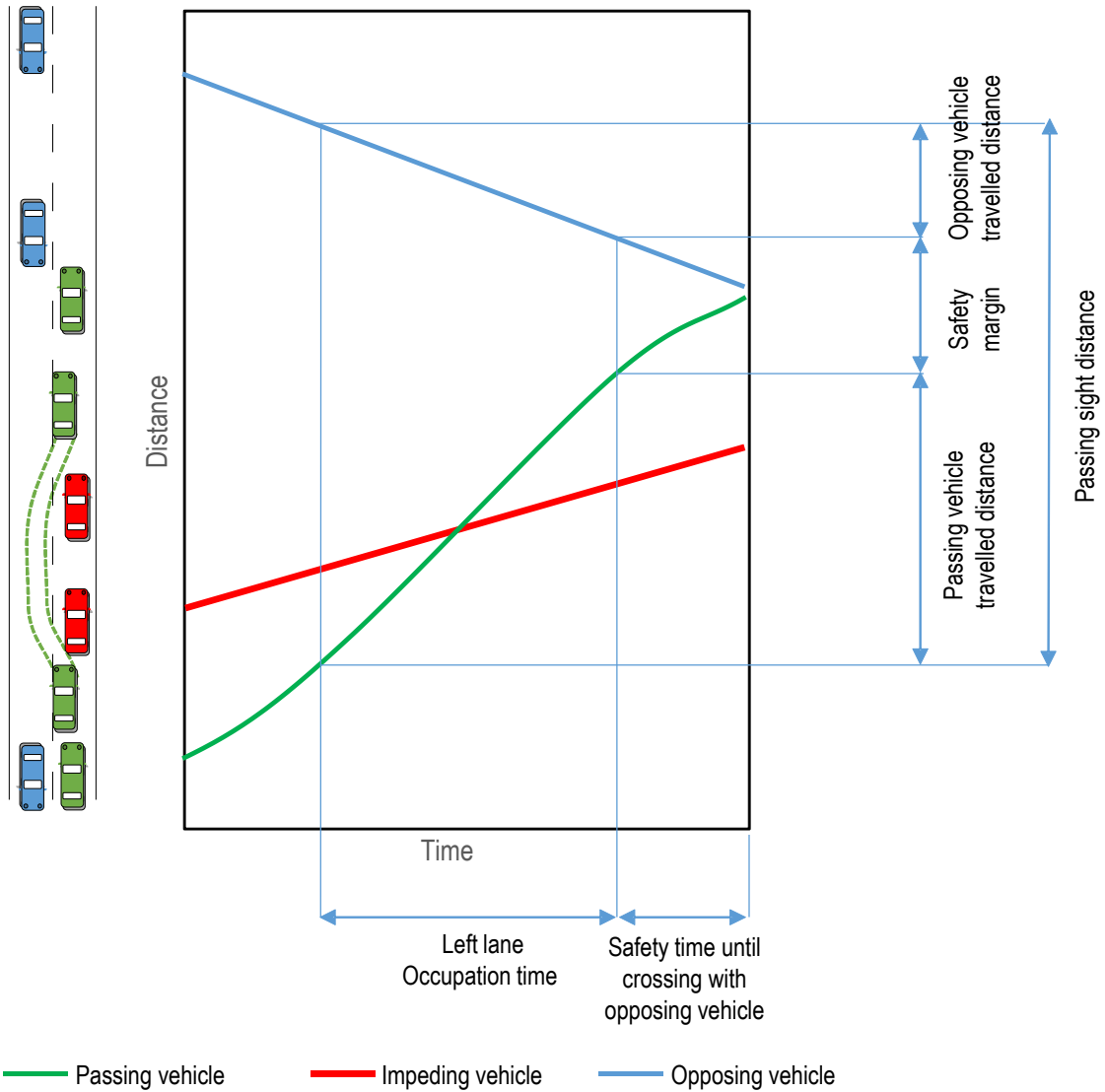


FIGURE II-4. PASSING SIGHT DISTANCE

Passing sight distance is the criteria for designing and marking passing zones and no-passing zones. Those road segments with sight distance over the passing distance are defined as passing zones (and marked with a broken line). This warrants the safe and comfortable performance of passing maneuvers.

4. Objectives

The aim of the present Thesis was the analysis of passing maneuver on two-lane rural roads, using observational data, in order to review and improve geometric design and marking criteria.

This aim was divided into the following objectives:

1. Design of an experimental methodology to study passing maneuvers on two-lane rural road segments. This involves the development of two alternative methodologies: firstly, by video recording from static points and secondly, by video recording from an instrumented vehicle, which is driven along a road segment and is passed by other drivers without being identified.
2. Data collection using the two developed methodologies in a sample of rural road segments in Spain, to obtain a sample of passing maneuver in different locations under different conditions.
3. Descriptive analysis of the obtained data to characterize passing process, taking into account driver factors (such as age, gender or delay), vehicle factors (such as number and type of impeding vehicles), and road factors (traffic and speed) as well as environment (lighting conditions).
4. Define and calibrate models for passing: gap acceptance models for passing desire and decision (binary choice models) and kinematic models (for passing vehicle trajectories).
5. Development of a passing sight distance model. Probabilistic approach for models, in order to provide the probability distributions of the output of the model.
6. Quantitative analysis of risk of passing sight distance, using reliability analysis of passing maneuvers.
7. Analysis of concurrent factors and main facts of road safety related to passing maneuvers, using crash data. Analysis of the influence on crash frequency of geometry of passing zones.
8. Application of the result to the development of a passing model for a microsimulation software for two-lane rural roads.
9. Review and proposal of new criteria for geometric design and marking of passing zones.

5. Hypothesis

The development of a new methodology to observe passing maneuvers would be able to increase the level of detail, in comparison with previous work. For this reason, it is expected to observe a set of variables that have never been observed in past research. For instance, it is expected to observe age and gender of drivers, vehicle characteristics or delay, thanks to the use of an instrumented vehicle.

Considering this increasing level of detail, as well as other conclusions of the state of the art, the following hypotheses were stated:

1. Driver's behavior may depend on the geographical area. Consequently, the results of this work may be different from other research studies carried out in a different region, even considering that other conditions (such as road and vehicle) are the same.
2. Driver's demographic characteristics (age and gender) may affect passing process. There could be some groups of drivers (such as young men) that have a more aggressive behavior, accepting shorter gaps and passing faster.
3. Lower passing gaps may be related to faster passing maneuvers, because of the reaction of drivers, increasing more their speed while passing to avoid a conflict with opposing traffic.
4. Visibility of opposing vehicles is an important decision factor when passing gap acceptance. Average opposing vehicle limited critical gaps may be lower than sight distance limited critical gaps.
5. Delay caused by following an slower vehicle may cause impatience to following drivers, encouraging them to pass taking more risk.
6. The type of impeding vehicle affects passing duration, and require passing gap, because of its larger size.
7. It is expected to observe a conservative behavior of passing drivers (detected by the rejection of longer gaps in the opposing traffic), related to a lower experience on two-lane rural roads (and therefore in passing), because of the increasing length of multilane and freeway network. According to this, two lanes are often only a small part of the trip and delays are less significant.
8. That conservative behavior may be related to the absence of aborted maneuvers, showing that drivers' decisions are very conservative.
9. The current design and marking standards are based on design speed or on posted speed limit. Consequently, the risk level may not be uniform for every speed level. Specifically, on long tangent segments, where passing zones are usually located, the differences between operating speed and design speed may be the highest.
10. Daytime passing behavior may be different to nighttime. The traditional hypothesis states that headlamps can anticipate the presence of opposing vehicles. However, once drivers are able to observe the headlamps, it may be more difficult to estimate passing gap.
11. Passing related crashes are not only related with head-on collisions, but also with many crash typologies.
12. Certain geometric characteristics of passing zones may affect the frequency of accidents. Among others, available sight distance and passing zone length may have an impact on road safety.
13. The current deterministic approach for passing sight distance standard may result in passing zones that, even accomplishing the criteria, are unsafe. This may occur in passing zones with available sight distances close to the thresholds set in the standards.

13. Conclusions

The main conclusions of the PhD Thesis were:

- 1) Development of a **methodology to observe passing maneuvers** on two-lane rural roads **from an instrumented vehicle**. This method consisted on recording maneuvers from a vehicle, which was **travelling at slightly low speeds**. The vehicle was **followed and passed by other** drivers. Data was collected during the entire following and passing process, being possible to detect variables that have not been previously characterized, such as **age and gender of following vehicle drivers, delay**, etc. Additional data collection was carried out using external video recordings, in order to analyze impeding vehicles speed and free flow speed distributions.
- 2) Data collection of **up to 1,179 passing maneuvers** (648 using the static method - or external recordings- and 531 using the dynamic method – or instrumented vehicle). Moreover, speeds of over 1,000 vehicles were measured. Data collection covered a wide range of road characteristics: design **speeds from 60 to 120 km/h, passing zones from 99 to 1,855 m, cross sections of 7 and 10 m wide**, and **AADT between 2,300 and 15,300 vehicles per day**. Observations were carried out during **day and night**. Nighttime observations were one of the most significant contributions, compared to previous studies.
- 3) **Passing gap acceptance models** characterized following drivers' decisions. The results provided the **distribution of critical gaps**, based on probit binary choice models. The following results were extracted:
 - a) **Gap length, measured in meters, had the highest correlation with gap acceptance**, rather than gaps measured in seconds. This result may be related to the perception of gaps, which is based on the observation of a distance, and not on the estimation of passing times. Besides, this may be linked with the difficult perception of speeds of opposing vehicles (used to calculate time-based gaps).
 - b) After gap size, the **most influential factor was the presence of opposing vehicles**. Being the opposing vehicle visible, **the critical gap increases from 500 to 800 m**. Drivers behavior was different, depending on the visibility of opposing vehicles, as the hypotheses indicated.
 - c) In contrast to other studies of gap acceptance on intersections, **delay did not affect passing gap decision**. In fact, those drivers suffering long delays accepted longer gaps. Probably, the effect of delay on passing maneuver is not visible because passing is optional, in contrast to merging and crossing maneuvers on intersections.
 - d) Critical gaps were higher than on other research studies. This result might **confirm the hypothesis of conservative driving**. Having less passing demand and performing less passing maneuvers than in the past would be related to longer critical gaps, but also with the **absence of aborted maneuvers**.
- 4) Analysis of factors affecting left lane occupation time (passing time), and calibration of passing trajectory models with observational data:
 - a) The **higher the number of passed vehicles, the higher the passing time**. The mean passing time increased from 7 to 10 s when two light vehicles were passed.
 - b) **Passing a heavy vehicle required 2.1 s additional passing time** (increasing from 7.0 to 9.1 s).
 - c) At **night, passing times decreased if opposing vehicles were visible**. This might be related to a more difficult perception of opposing vehicle position during night. This

- contrasts the traditional hypothesis, which stated that nighttime passing was safer because headlights anticipated the presence of vehicles, even before they were visible.
- d) **Men under 30 years passed faster** than the other age and gender groups.
 - e) Up to six trajectory models were evaluated and calibrated using field data. Among other, uniform speed, uniform acceleration or linear variation of acceleration were compared:
 - i) A reasonable model, balancing goodness of fit and simplicity, was a **uniform acceleration model, centered on 0.77 m/s² for accelerative maneuvers**. For **flying maneuvers**, a **uniform speed model was adequate**, being the speed 1.4 times the speed of the impeding vehicle. These models were chosen for the development of a passing sight distance model.
 - ii) However, the best fit would be achieved using more than one trajectory model. Using this procedure, the evolution of speeds of the whole sample was analyzed. **Most of drivers reached the maximum speed at the end** of (or after) the maneuver, although acceleration rates tended to decrease along time. **Mean acceleration rates were mainly between 0 and 1 m/s²**. Only in 21% of maneuvers the instant acceleration rate exceeded 2 m/s² some time during the maneuver.
 - 5) **Reliability analysis** (or limit state analysis) of passing maneuvers. This analysis evaluated the **risk of head-on collisions** and the **possibility of violating no-passing zones**. The probability of non-compliance was aggregated within the entire passing zone. In addition to this, it was multiplied by the probability of gap-acceptance, obtaining a more accurate measure of risk exposure.
 - 6) Analysis of **crash database** of Valencia region. This database contained 23,000 crashes, **1,180 of them associated with passing maneuvers**. The analysis of these crashes revealed the following conclusions:
 - a) **Apart from head-on collisions**, there were **other collision typologies related to passing** maneuver. In fact, head-on collisions represented only 21% of crashes. In 44% of cases, passing crashes took place on intersections and entrances, being the most common a **collision between a passing and a left-turning vehicle** (from the major road to a secondary one). In 14% of the total, the accident involved a rear-end or swipe collision between passing and impeding vehicles, and in 9% of cases, the passing driver lost the control of the vehicle.
 - b) The **severity of passing related** crashes **was high**. The number of severe injuries per 100 crashes was 10% higher than in other crashes, while number of fatalities per 100 crashes was equal.
 - c) In a sample of two-lane roads, **crashes related to passing maneuvers were between 5 and 8%**. This number decreases to 3 and 5% if crashes on intersections are excluded. The proportion increased asymptotically with traffic demand.
 - d) In a sub-sample of 138 passing zones, the effect of road geometry had a significant effect on the number of crashes related to passing maneuvers. Specifically, the **integral of the probability of gap acceptance multiplied by the probability of non-compliance** along the entire passing zone was **correlated** with the **observed number of passing related crashes**. This result showed that passing zones with the same length might have different frequency of crashes, depending on the available sight distance. The most dangerous passing zones were those located on curves.
 - 7) Development of a **microsimulation model for passing maneuvers**. This module has been included in a commercial microsimulation software. It included a higher number of variables

than existing models, such as the **effect of sight distance** or the **presence of opposing vehicles**.

- 8) Analysis of risk of **current design and marking criteria**, using the results of reliability analysis and gap acceptance analysis. The study covered **passing zone lengths** ranging 100 to 1000 m and **available sight distances ranging 100 and 1000 m**. Risk was estimated using the integral of the product of probability of non-compliance and probability of gap acceptance on the entire passing zone, which was correlated with the number of passing crashes. The probability of non-compliance included the probability of violating the passing prohibition.
 - a) In general, the probability of non-compliance is higher at high design speeds and high operating speeds, given the same passing zone.
 - b) **Spanish road design guideline** (3.1 IC) provided a **high passing sight distance value**. These values could be the cause of a **high number of vehicles violating passing prohibitions**, because the higher sight distance encourage drivers to pass. The mean of the product of probability of non-compliance and probability of gap acceptance was 35% on short passing zones between 150 and 300 m. It means that up to 35% of drivers could violate the passing prohibition.
 - c) **Spanish marking guidelines for existing roads** (8.2 IC) resulted in a **mean of the product of probability of non-compliance and probability of gap acceptance** between **6 and 14%**.
 - d) **Spanish marking guidelines for new roads** (8.2 IC), which provides higher sight distance than for existing roads, resulted in a mean of the product of probability of non-compliance and probability of gap acceptance **between 6 and 18%**. In this case, it was observed that **increasing the sight distance does not always benefit safety**, because it may **encourage drivers to pass having near-to-critical gaps**.
 - e) As previously stated, the compliance of criteria does not ensure safety. In some cases, providing more sight distance may benefit passing frequency and increase the exposure to risk.
 - f) There was **no scientific evidence** to justify **the existence of two different criteria for design and for marking**. Design criteria must be verified during the project phase, but passing zones are physically defined using the marking criteria.
- 9) **New passing zone design and marking criteria**.
 - a) There is **only one criterion**, to be applied during both design and marking phases.
 - b) It is **based on operating speed** instead of design speed. Operating speed should be measured or estimated.
 - c) The criterion **minimizes the probability of a head on collision and the probability of violating the passing prohibition**.
 - d) The application of this criterion is **different on passing zones in tangents** (sight distance decreases linearly) and **on passing zones in curves** (sight distance is constant). For complex passing zones, the following rules apply:
 - i) The zone has to be divided in tangent and curve sub-zones.
 - ii) On every sub-zone, except the last one, the sight distance must exceed the given values.
 - iii) On the last sub-zone, the sight distance must be as close as possible to the given values, not exceeding them in order not to encourage drivers to pass and violate passing prohibitions.
 - e) At operating speeds of 100 km/h, the sight distance at the end of a tangent passing zone must be 222 m and the minimum passing zone length must be 293 m. On the contrary,

the uniform sight distance on curves must be between 428 m (for 200 m length passing zones) and 565 m (for 1000 m length passing zones).

- f) The **given values may increase when a higher frequency of heavy vehicles is expected.**

This PhD Thesis carried out a wide study of passing maneuvers on two-lane rural roads, incorporating a high number of variables and factors. However, the results should not be extrapolated (or should be extrapolated with caution) to other scenarios, conditions or geographical areas.

According to this, the results are valid on two-lane rural roads in Valencia region. It is possible that the behavior of drivers is different in other regions or countries, and the conclusions may vary significantly.

Additionally, there are some factors that were not considered during this study, such as adverse weather conditions, longitudinal gradient, etc. Other specific limitations are commented in the document.

Besides, the following chapter describes future research needs, which focus on part of the limitations of the study.

III) Compendio de publicaciones – Compendium of papers

This annex to the PhD Thesis includes a compendium of papers, which correspond to different parts of the Thesis. The following list explain the correspondence between the papers and the Thesis:

1. Llorca, C., García, A., 2011. Evaluation of Passing Process on Two-Lane Rural Highways in Spain with New Methodology Based on Video Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2262, 42–51. This paper explains the first data collection method, namely the static methodology (**Section 6.1.1**).
2. Llorca, C., García, A., Perez, A.M., Moreno, A.T. “New experimental approach for passing gap acceptance”, 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., Jan. 2012. This conference paper develops the data reduction process for opposing flow gaps (**Section 6.3.3.4**).
3. Llorca, C., García, A., Moreno, A.T., Pérez-Zuriaga, A.M., 2013. Influence of age, gender and delay on overtaking dynamics. *IET Intelligent Transport Systems* 7, 174–181. doi:10.1049/iet-its.2012.0147. This paper explains the second data collection method, namely the dynamic methodology (**Section 6.1.1**) as well as the effect of drivers characteristics on passing (**Section 8.2.2.2**).
4. Llorca, C., Moreno, A.T., García, A., Pérez-Zuriaga, A.M., 2013. Daytime and Nighttime Passing Maneuvers on a Two-Lane Rural Road in Spain. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2358, 3–11. doi:10.3141/2358-01. This paper further explains data collection method (**Section 6.1, 6.2 and 6.3**) as well as analysis of the effect of lighting conditions (**Section 8.2.2.2**).
5. Llorca, C., Moreno, A.T., Lenorzer, A., Casas, J., Garcia, A., 2014. Development of a new microscopic passing maneuver model for two-lane rural roads. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. In press. doi:10.1016/j.trc.2014.06.001. This paper further explains the data collection method (**Section 6.1, 6.2 and 6.3**) as well as the application to the development and calibration of a microsimulation model (**Section 11.1**).
6. Llorca, C., Moreno, A.T., Sayed, T., García, A., 2014. Sight Distance Standards Based on Observational Data Risk Evaluation of Passing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2404, 18–26. doi:10.3141/2404-03. This paper develops the passing sight distance model (**Section 8.3**) and the reliability analysis of **Section 9.1**.
7. Llorca, C. Moreno, A.T. and García, A. Modeling vehicles acceleration during passing maneuvers. To be sent to journal. This paper explains the calibration of passing vehicle trajectory models, included in **Section 8.2.2.3**).
8. Llorca, C. Moreno, A.T. and García, A. Passing sight distance standards based on drivers’ behavior and road safety. Sent to *Transportation Research Part C – Traffic Psychology and Behavior* on Jan. 2015. This paper includes the gap acceptance modeling (**Section 8.2.1.3**),

passing sight distance model (**Section 8.3**), crash data modeling (**Section 9.2.3**) as well as the development of passing sight distance standards (**Section 11.2**).

This compendium of papers includes author versions, even though the papers are already published.

1. Llorca, C., García, A., 2011. Evaluation of Passing Process on Two-Lane Rural Highways in Spain with New Methodology Based on Video Data. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2262, 42–51.

EVALUATION OF PASSING PROCESS ON TWO-LANE RURAL HIGHWAYS IN SPAIN USING A NEW METHODOLOGY BASED ON VIDEO DATA

Corresponding Author:

Carlos Llorca
Research Assistant
Department of Transportation
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera, s/n. 46022 – Valencia. Spain
Tel: (34) 96 3877374
Fax: (34) 96 3877379
E-mail: carlloga@cam.upv.es

Other Authors:

Alfredo García
Professor
Department of Transportation
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera, s/n. 46022 – Valencia. Spain
Tel: (34) 96 3877374
Fax: (34) 96 3877379
E-mail: agarciag@tra.upv.es

Word count:	Abstract:	250
	Manuscript:	5500
	Figures: 5 x 250 =	1250
	Tables: 2 x 250 =	500
	TOTAL:	7500

Key words: Passing sight distance, Rural road, Video data recording

ABSTRACT

Drivers need enough Passing sight distance (PSD) to pass slower vehicles with safety. This can help to improve traffic operation on two-way two-lane highways. Existing models propose different values of PSD, according to different assumptions. Only in some cases these models were based on field data of passing maneuvers.

This research proposes the design of a new methodology to observe passing maneuvers on existing highways with help of 6 video cameras installed on a fix point next to passing sections. The use of a larger number of cameras allows the complete registration of trajectories along the entire passing zone, with uniform image resolution. The methodology was applied to register a sample of 234 maneuvers on 4 passing zones. Trajectories of 58 of them were completely described and analyzed using specific restitution software.

Results are compared with existing PSD models. AASHTO model proposed distances travelled on the left lane are similar to average observed distances if the passed vehicle is one truck, and between 50 and 100 m higher if one passenger car is passed. Higher differences, over 100 m, were found between measured data and PSD model of Hassan et al., especially at high design speeds. Observed average speed difference between passing and impeding vehicles is significantly higher than in all models.

Variables with strongest influence on the time and distance travelled on the opposing lane are: type and speed of the passed vehicle and the length of the passing zone. Left lane time and distance increase with this length.

BACKGROUND

Passing on two-way two-lane highways is one of the most important maneuvers for the operation of traffic on these roads. Passing allows drivers of faster vehicles to drive at their own desired speed and to avoid interferences with slower vehicles that cause delays.

Rural two-lane highways represent still the longest part of the highway networks. Despite of traffic volume on these highways is lower than on motorways, accident rates are significantly higher (1).

Passing-related accidents are especially serious, because of the existence of up to three vehicles at high speeds (the passing, the impeding and the opposing vehicle), with opposing paths on the road. However, it is very difficult to identify the real causes of one accident, in order to associate it with the passing maneuver. Recent studies with these objectives are not common.

Driving safety analysis by means of traffic conflict techniques (TCT) could reinforce the study of passing-related accidents. However, there is not any specific conflict indicator defined for the passing maneuver, which could consider the particular problems of passing. Only some few research studies (2) have used the "Time to Collision (TTC)" as conflict indicator, despite it is usually used to analyze crossing safety.

Consequently, highways are designed and signed using criteria based on Passing Sight Distance (PSD). PSD must be seen by one driver along the opposing lane in order to pass a slower vehicle when a third opposing one is approaching.

PSD used in geometric design and marking criteria could be calculated with a large number of different PSD models. Dispersion in results of those PSD models is very high (3).

US design criteria for two-way two-lane highways are presented in AASHTO Green Book of 2004 (4). The last revision of this model was made in 1994. PSD components were calibrated with field data of passing maneuvers from different research between 1938 and 1958.

PSD of AASHTO models begins with a perception-reaction time and ends at the moment of the return to the own lane. Opposing vehicle is considered from the point when passing and passed vehicle are in abreast position. Aborting the maneuver is only considered until this abreast position.

In contrast of PSD model of AASHTO (4), Glennon (5) and Hassan et al. (6) propose analytic models of PSD. These models are based on equations of the movement of the three vehicles.

Glennon and Hassan et al. locate a 'critical position' at the point where sight distances to abort and to complete the maneuver are equal. After this point it is better to complete the pass than to abort. The difference between both authors and AASHTO model is the definition of PSD. Glennon and Hassan only consider the part of sight distance needed from the critical position to the end of the passing, instead the distance from the perception-reaction stage, which is considered by some authors as too conservative. Glennon and Hassan's PSD proposed values are consequently lower.

In addition to those cited PSD model, a higher number of PSD models were formulated. Some analytical deterministic PSD models are presented by Rillet (7), Rocci (8), or Wang and Cartmell (9). More recent are probabilistic models that associate PSD with levels of safety, like El Khoury and Hobeika (10) or El-Bassiouni and Sayed (11).

Clear differences are also found between geometric design and marking criteria employed in different countries. These two criteria are incompatible in all the analyzed cases, like in US (AASHTO Green Book for geometric design and MUTCD for marking (4), (12)) or in Spain (13), (14).

A quite small number of PSD models were based on field studies. Most recent extensive field data was obtained by Polus et al. (15) or Harwood et al. (3). These authors have recorded video from external fixed positions of passing zones. Only one camera was used in each passing zone, and times and distances were measured in video images. Traffic data was also recorded

Polus et al. observed up to 1,500 passing maneuver, but analyzed only a small part of them. Also Harwood analyzed 60 of over 360 maneuvers.

According to authors, some passing maneuvers could not be analyzed because they have started out of the camera field or too far to get accurate distance data. Curvilinear alignments did not allow the necessary accuracy either.

A different methodology was used by Carlson et al. in 2006 (16). Carlson took video data from a moving vehicle inside the traffic flow. The moving vehicle drives at slow speeds as impeding vehicle. Data from Carlson was combined and included in Harwood's study (3).

The final results of Polus et al. and Harwood et al. studies disagree. Polus recommends the AASHTO PSD values, or even higher, if the passed vehicle is a heavy vehicle. In contrast, Harwood considers AASHTO model too conservative because of the existence of the critical position. Harwood et al. recommend using the MUTCD criteria (with assumptions of Glennon's model) as geometric design criteria, instead of AASHTO criteria (17).

OBJECTIVES

High dispersion in criteria, models and field data suggests a new research of passing maneuvers on two-way two-lane highways. Moreover, the need of obtaining more accurate data of passing maneuvers motivates the test of a new methodology.

This research will design a new methodology to obtain data from observed maneuver on rural roads. Methodology must improve data acquisition by analyzing complete trajectories of all vehicles that participate in the passing maneuver.

Once the methodology is designed the second objective is to obtain an extensive database of passing maneuvers. Each maneuver should be described by the complete path of all the participating vehicles on the roads: position, time, speed and acceleration at any time.

After that, the research will analyze statistically the data and propose a revision of the most cited PSD models, and their assumptions, to be applied in Spain.

METHODOLOGY

The methodology of this research is based on video data recording and restitution of trajectories.

The first important advance in relation to past research with similar methodologies is the incorporation of a higher number of video cameras. Up to 6 digital cameras can be installed on a Mobile Traffic Laboratory developed by the Highway Engineering Research Group (HERG) of the Universidad Politécnica de Valencia (Spain), in order to make a description in detail of the complete evolution of vehicles in passing maneuvers.

Mobile Traffic Laboratory is an articulated platform which can be raised up to 12 m high. Cameras are installed on the highest point of the platform. Focus and zoom of these cameras is controlled from a laptop in real time by means of a wireless network.

A large area can be recorded with a correct position and zoom of each camera. Each camera records a smaller area than if only one camera was available. Consequently, video images are obtained for long zones up to 1,000 – 1,500 m when the Mobile Traffic Laboratory is installed in the middle of the passing zone. Video quality is also uniform along the whole zone. A passing maneuver along the six cameras is shown in FIGURE 1 through different frames.

Starting at distances of 300 m from the position of the Mobile Traffic Laboratory the resolution of cameras restricts the analysis of maneuvers. Trajectory processing is, according to that limitation, possible along up to 600 m of passing zone.

Potential effects over drivers should be reduced by choosing the appropriate position of the platform. The best position should ensure good visibility from the cameras and restricted visibility from drivers to the Moving Traffic Laboratory.

When the equipment is installed next to the highway, the six cameras record video simultaneously. After that video data is processed in order to obtain the trajectories and different characteristics of maneuvers.

Path restitution is based on perspective restitution. Real dimensions of objects are calculated from their representation in the video frame, thanks to geometrical relationships between reality and perspectives. Each video frame is treated as perspective drawing of the reality. Individual restitution of a frame locates the vehicles on their position on the highway at this time. If the process is repeated along all frames, the entire trajectory will be obtained.

This conversion of coordinates is possible after measuring reference polygons on the road, which are observed on videos and match up the road marking. Trajectories of the up to three vehicles

are obtained on a two-dimensional coordinate system, which matches up with length and width of the highway. Perspective distortion does not affect the restitution since reference lines which are observed in video data were measured before in the reality, along the entire passing zone.

All the process was made with specific software developed by the HERG of the Universidad Politécnica de Valencia. Several applications of this software have been already presented (18).

Positions of vehicles along the six cameras with a frequency of 5 points per second are combined and the complete trajectory can be calculated. Speed and acceleration profiles of the three vehicles along the maneuver are also calculated. This means that a sample vehicle in a passing maneuver of 10 seconds is described at least by 50 points.

FIELD STUDY

With these methodology a total of 234 maneuvers were observed. 58 passing maneuvers were analyzed with data of trajectories of, at least, the passing and impeding vehicles. Near 25 percent of maneuvers could be analyzed using the described restitution software.

The study took place on four passing zones in the surrounding of Valencia (Spain) in 2010, on two different rural roads. Passing zone length considered was between 245 m and 1,300 m, in order to study the effect of this length in passing maneuvers. These lengths are representative of almost that all existing passing zones in Spanish roads.

Short zones present a higher rate of analyzed maneuver (up to 63%) than long zones (13%) because off focus and resolution problems at 300 m on up.

Operating speed (85th percentile) on the passing zones was between 98 and 120 km/h. These speeds were calculated using the developed software. Free flow and total flow operating speeds were separately obtained.

Only day light passing maneuvers were studied, on horizontal passing zones with similar traffic volumes (between 250 and 300 veh/hour).

TABLE 1 presents the field study and characteristics of each location.

ANALYSIS

Data reduction

Video data and trajectories cannot be analyzed easily. It is necessary to define different variables to describe passing maneuvers. These variables can be studied from a statistical point of view.

The total number of 234 observed passing maneuvers can be described by some basic variables, including times. Maneuvers with complete trajectory data can be described using a larger number of variables, including distances, speeds and accelerations, which can define all the stages of the pass.

TABLE 2 shows a list of variables considered in the study, and their values obtained in this field study.

Moreover, variables that describe the passing zone or the traffic characteristics, not only the individual passing maneuver, were also calculated, and have been already shown in TABLE 1.

Traffic effects

In the field study all the passing zones had similar traffic volumes. Relationships with hour traffic volumes are consequently not possible. Percent of heavy vehicles was between 15 and 23%.

However, the length of the passing zone is an important factor of the passing frequency in each zone. Long zones, like locations 1 and 2 had a high passing frequency, while short zones, under the recommendation of Spain criteria, had a very low frequency. Constant traffic volumes facilitate this comparison. These results agree with Harwood's study of frequency of passes in short passing zones (3). In consequence, these short passing zones do not contribute much to the traffic efficiency of two-lane highways.

Travel on opposing lane

The main variables in the study were the time and distance travelled along the opposing lane. This time and distance measure the most important stage of the passing, because almost that all conflict situations at passing maneuvers are presented in this phase.

Time and distance, tI and dI , were analyzed. Multiple linear regression models were calculated in order to establish the main factors of both variables, and to explain their variability. Only significant variables were included in these models.

Time of travel on left lane in sample 1 (234 maneuvers)

The EQUATION 1 explains 42% of variability of tI caused by the number of passed vehicles, the type of passed vehicle and the length of the passing zone.

$$tI = 1.454 + 0.003 \cdot ZONELENGTH + 3.233 \cdot NUMI + 1.602 \cdot TYPEI \quad (R^2=0.42) \quad (1)$$

- “TYPEI” is the type of impeding vehicle (Codified as 0 for passenger cars and 1 for trucks).
- “NUMI” is the number of impeding (passed) vehicles.
- “ZONELENGTH” is the passing zone length in m.

Time of travel on left lane in sample 2 (58 maneuvers)

The EQUATION 2 explains the 52% of the variability of tI (only for simple passing, when there is only one impeding vehicle) caused by type of impeding vehicle and passing zone length.

$$tI = 4.161 + 2.248 \cdot TYPEI + 0.003 \cdot ZONELENGTH \quad (R^2=0.52) \quad (2)$$

Differential between passing and impeding average speeds (dV , during left lane travel) can be introduced as significant variable in the model (EQUATION 3).

$$tI = 6.972 + 2.174 \cdot TYPEI + 0.003 \cdot ZONELENGTH - 0.121 \cdot dV \quad (R^2=0.67) \quad (3)$$

The EQUATION 3 explains the 67% of variability of tI by inclusion in the model the differential dV . However dV is a very random variable, that not depends on any another variable of the maneuver. Variable dV cannot be controlled and should be treated as constant value in PSD models.

Speeds of impeding or passing vehicles have no influence on variable tI , in contrast to AASHTO or Hassan et al. models. Harwood et al. (3) propose also a constant time of left lane occupation, by observing passing maneuvers from video data (observed average time was 9.9 s according to Harwood).

Distance travelled on left lane in sample 2 (58 maneuvers)

72% of dispersion of distance travelled on left lane is explained with this model, in EQUATION 4. Relationships between dI and speed are stronger if the reference speed is the one of the impeding vehicle, named as V_i (km/h).

$$dI = -55.247 + 61.182 \cdot TYPEI + 0.084 \cdot ZONELENGTH + 2.354 \cdot V_i \quad (R^2=0.72) \quad (4)$$

Models for dI and tI in the same sample are coherent, because time and space on the left lane are related by average speed of passing vehicle. This coherence was verified.

Samples 1 and 2 were also compared, in order to extend results of sample 2 (better explained) to sample 1 (larger sample).

Regression models presented in this paper have only the objective of defining the most important correlations between these variables. The applicability of these models is restricted by the sample size. Safety levels assumed in these models were 50% (average values). Future models should assume higher levels of safety to cover human factors and be suitable as design or marking criteria.

Sample, and consequently scope of models, is reduced to Spanish rural roads with operating speeds (V_{85}) within 94 and 120 km/h, and passing zone lengths within 250 and 1300 m. Only one passed vehicle must be considered. Passing vehicle was always a passenger car.

Out of these restrictions quality of models must be checked, in order to apply them to the construction of PSD models in further research.

Evolution of the vehicles along the passing maneuver

Relationships found in the regression analysis are established within average values of different variables of the passing. The consideration of “instant” values is necessary to explain the evolution of the vehicles along maneuvers. This analysis is now available with the explained methodology.

Time on the opposing lane was additionally divided in four sub-phases, between the following points:

1. Start of left lane occupation (start of tI).
2. Rear part of impeding abreast to front of passing: “head to tail”.
3. Front part of both vehicles is abreast.
4. Rear part of passing abreast to front of impeding “tail to head”.
5. End of left lane occupation.

The distribution of time in the different stages along a typical passing maneuver is described as follows. Any significant difference was not found between types of passed vehicles:

- Phase 1: between points 1 and 2: $0.32 \cdot tI$.
- Phase 2: between points 2 and 3: $0.24 \cdot tI$.
- Phase 3: between points 3 and 4: $0.04 \cdot tI$.
- Phase 4: between points 4 and 5: $0.40 \cdot tI$.

Abreast position is located at 56% of the time on left lane, in contrast to AASHTO model, which proposes $2/3$ of tI .

FIGURE 2 shows the speeds of each vehicle along the passing maneuver. Time tI is normalized in order to compare the evolution of speeds of every individual pass, by assuming that tI in all maneuvers was the average time tI . Each colored line represents one passing or impeding vehicle of the total of 58 maneuvers (red represents the impeding vehicle and green the passing vehicle). Black broken lines cover the central tendency of 70 % of vehicles (percentiles 15th, 50th and 85th are plotted).

Passed vehicle keeps its speed constant or accelerates up to 15 km/h (70% of data). Assumptions of constant speed of this passed vehicle can be wrong; despite they are usual in all the existent PSD models. Speed profile of the impeding vehicle is similar to the typical operating speed profile of vehicles that come from to curve sections to tangents. This can explain the acceleration of the slow vehicle.

Passing vehicle accelerates along the entire passing maneuver. Acceleration rate is normally lower (in up to 50% of maneuvers) in last stage of passing maneuver. The change of acceleration rate is located at the change from stage 3 to stage 4, when passing vehicles completes the pass of impeding vehicle.

At beginning of tI speed difference mean between passing and impeding vehicle is 12.5 km/h. An initial acceleration during perception-reaction stage should be considered. Moreover, there are a large number of possibilities between accelerative and flying passes.

Speed relationships

Average speeds of passing and impeding vehicles were calculated and compared with the operating speeds and design speeds on each passing zone.

FIGURE 3 shows the relationship between speeds of passing and impeding vehicles and design speeds, in comparison with AASHTO and Hassan models.

The observed data show a linear relationship between speeds of passing and passed vehicle and design speed. Passing vehicle speeds are higher than AASHTO or Hassan proposed speeds, especially for lower design speeds (80 to 100 km/h)

Speed difference does not depend on design speed neither on type of passed vehicle. The average value of 23 km/h was the same for passenger cars and trucks, and was higher than in all the existing revised PSD models.

Critical position

Critical position is defined as the point of the last possibility of aborting a pass. From this point, it is better to complete the pass than to abort it. Many models like Glennon or Hassan et al. locate it in the point where sight distances to complete or abort the maneuver are equal.

Aborted maneuvers are less common on highways. Any aborted maneuver was not analyzed into the 58 completely described passing maneuvers. Estimations about the location of critical point are not possible in this study.

Opposing vehicle

Only in a few maneuvers an opposing vehicle was approaching and had influence on the behavior of passing and impeding vehicles. Only 15 of these maneuvers were analyzed including data of distances and speeds.

In these cases a uniform movement along the entire maneuver is adequate to represent the movement of the opposing vehicle, like assumptions of all the proposed models. Speed of opposing vehicle should be the 85th percentile of operating speed in the specified direction of traffic. Using design speed could be unsafe.

PSD MODELS REVISION

After data analysis, different PSD models can be compared with obtained data. Most cited models are AASHTO, Glennon and Hassan's models.

PSD cannot be compared directly because field data is restricted to the left lane travel of the passing maneuver. In contrast left lane travel times and distances will be compared in order to verify the assumptions of those models.

AASHTO PSD model

AASHTO PSD model defines the passing sight distance as the sum of four components:

- Distance d_1 : initial perception-reaction and acceleration distance.
- Distance d_2 : left lane travelled distance.
- Distance d_3 : clearance distance.
- Distance d_4 : two thirds of d_2 .

Existence of distance d_1 seems to be obvious, because of the need of a perception-reaction time and the initial acceleration. An initial acceleration before beginning the left lane occupation was observed. However, the starting point of the stage described by d_1 was not measured, due to the dependence of this point on driver's behavior.

Acceleration rates proposed by AASHTO depend on design speed level. They are between 0.62 m/s² and 0.67 m/s². Observed acceleration rates (average values in the acceleration stage along the entire maneuver) present very high dispersion. Percentiles 15th and 85th were 0.5 m/s² and 1.6 m/s². Dependence on speeds of passing or passed vehicle was not registered.

Consequently, AASHTO acceleration rate could be exceeded by almost that 85% of vehicles.

Distance d_2 of AASHTO model is the same distance that variable dI in the present study. This distance was also calibrated from different field studies.

The AASHTO model assumes that speed is not uniform, but calculates the distance d_2 as a uniform movement at the average speed of the passing vehicle V_p .

Comparison with field data, observed in FIGURE 4, uses the speed of impeding vehicle as speed of reference, because this speed has a stronger relationship with travelled distances than the speed of the passing vehicle in the observed maneuver. Tendency of observed data is shown by using simple regression linear models. In this case, only the type and speed of vehicles are included as input variables of these tendency lines.

Similar relationships are found with times of travel on the opposing lane. However, this model proposes a time of travel on the opposing lane which increases with the speed, between 9 and 12 seconds, similar to average time $t1$ for passed heavy vehicles in field data.

AASHTO model fits the distances to the average distances predicted if the passed vehicle is one truck. AASHTO model is conservative to represent the average distance $d1$ for passed passenger cars, although calibration of the model was made from data of passenger cars (19).

Distance d_3 is the gap between passing and opposing vehicle when the return to the own lane is completed. Data observed in 15 maneuvers with opposing vehicles with influence on passing maneuver were compared with distance d_3 . AASHTO proposed clearing gap can be considered as a lower threshold of observed distances, since only one case surpasses the AASHTO values.

Distance d_4 in AASHTO model represents the distance travelled by the opposing vehicle during the left lane travel of the passing one. Results of this research recommends consider 44% of left time travel instead $2/3$. Moreover, assumed opposing speed by AASHTO model is equal to speed of passing vehicle. This could be often unsafe because speed of opposing vehicle can be higher than average speed of passing vehicle. Expected speed of opposing vehicle could be the 85th percentile of the free flow operating speed at the beginning of the passing zone.

With respect to the speed of vehicles and their relationship with the design speed, as shown in FIGURE 3, AASHTO model proposes a constant speed differential of 16 km/h, lower than the observed of 23 km/h. Speed of passed vehicle matches with observed data, since it is always between percentiles 50th and 85th of the registered speeds. Speed of passing vehicles was higher in observed maneuvers. That explains the differences in distances of travel on opposing lane.

PSD model of Hassan et al.

Hassan et al. PSD model (6) is an analytical PSD model, which calculates the sight distance using the equations of the movement of the three vehicles of the maneuver.

PSD is, according to Hassan, the sight distance required to complete a pass from the critical position. Before that, the author have defined an initial stage, necessary to reach the critical point, but not included in PSD.

The passing vehicle accelerates with uniform rate during the initial stage before critical point, until it reaches this point. The location of the critical point is calculated by making sight distances to complete and to abort equal. Moreover, critical point cannot be never situated beyond the abreast position. This reasonable assumption is the main difference between Glennon and Hassan's model, since they use similar equations to calculate PSD.

After critical point, passing vehicle return to its own lane at constant speed, equal to design speed of the road.

Time headways between all vehicles are always assumed to be equal to 1 s. Speed differential between passing final speed and impeding vehicle speed depends on the design speed that is assumed as passing vehicle speed. Speed differential decreases with design speed.

Hassan's basic assumptions define a movement of the passing vehicle very close to the observed passing maneuver, with lower acceleration rates after the critical position, always located next to the abreast position.

However, speed relationships are significantly different from the observed in this field study. At high speeds, the speed of passing vehicle is close to design speed, but at low speeds, the passing vehicle travels at speeds higher than design speed.

In all cases, average speed difference between passing and passed vehicle in observed maneuvers was 23 km/h, very far from the proposed speed differential.

By considering as reference speed the speed of the impeding vehicle, a comparison of distance travelled on the opposing lane is possible, and is shown in FIGURE 5.

The main differences between observed data and Hassan's model are visible at high speeds of the impeding vehicle. Hassan considers a nonlinear relationship between distance and speed that could not be observed in field data. Consequently, distances at speeds over 70 km/h are too far from observed distances.

CONCLUSIONS AND FURTHER RESEARCH

A new methodology to study passing maneuvers based on video data recording has been presented. Main advances of this methodology are the improved quality of video images and the possibility of determine the complete trajectories of the three participating vehicles with enough accuracy.

These advances are caused by the use of a higher number of cameras, which allows uniform video quality along the entire passing zone, and the use of a specific software that calculates the evolution of the vehicles with a frequency of at least 5 points per second.

The new methodology uses an existent equipment developed by the Universidad Politécnica de Valencia, and was used in the field study presented in the paper. The methodology allowed the research team to obtain a database of maneuvers with efficiency and enough accuracy.

The analysis has shown that new variables could be introduced in this model. An example of these new variables is the passing zone length. This length had influence on distance travelled along the opposing lane, because of drivers that have more space to do the pass are used to extend their travelled distance on this left lane. The inclusion of this variable can adequate the marking criteria to long and short passing zones. The passing zone length can be only included in statistical models, due to the problems to describe it by analytical formulations of PSD.

An additional analysis of those observed maneuvers was possible in order to compare data with some existing PSD models.

PSD model of AASHTO, used as design criteria in US, is also based on field data. Maneuver explanation and proposed values can generally be accepted. AASHTO proposes distances always over percentiles 50th of observed distances.

However, speeds of the participating vehicles could be redefined. Speed differential of 16 km/h is lower than the observed in the passing maneuvers of this study (23 km/h). This was also observed in all other existing PSD models.

PSD model of Hassan et al. presents a complete description of the evolution of the passing vehicle. An initial acceleration phase was always registered and after that, acceleration rates are lower.

However, speed relationship of Hassan's PSD model is not close to observed speeds. Differences of 10 km/h with observed data were found in impeding vehicle speeds. Several assumptions of this PSD model could be checked with field data.

Applicability of obtained results is restricted to Spanish rural roads, due to the origin of the observed data. Regional variations are possible, and it suggests applying the proposed methodology in other sites.

Further applications of the developed methodology are possible. More observations in locations having nearly minimum recommended passing zone lengths would be beneficial, to understand better the effect of that length.

Extend the video recording to other passing zones will allow to consider more additional variables, that could have an important influence on PSD. For example, it would be possible to study the effect of night lighting conditions in passing zones, in comparison with day light time, or to analyze the influence of the grade of the highways on passing maneuver. Night visibility is also possible using the cameras of the Mobile Traffic Laboratory, with a small reduction in accuracy, thanks to the infrared filters of cameras.

Study of passing maneuvers involving a truck as passing vehicle is necessary too.

Variables related to the opposing vehicle should be more times observed in order to validate existing criteria or propose new models. Moreover, an extension in sample size of the field study can make the construction of a new PSD model possible.

Driving behavior related characteristics cannot be easily studied with this methodology, because it allows video recording from an external point of view.

The construction of a PSD model should eventually consider traffic operation and safety related aspects, which can help proposing the most adequate formulation.

REFERENCES

1. International Transportation Forum, Road Safety. Recommendations from Ministers, 2009.
2. Farah, H., A. Beckhor and A. Polus., "Risk evaluation by modeling of passing behavior on two-lane rural highways," *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 41, 2009, pp. 887-894.
3. Harwood, D.W., D.K. Gilmore, K.R. Richard, J.M. Dunn, and C. Sun, *Passing Sight Distance Criteria*, NCHRP Report 605, Transportation Research Board, 2008.
4. American Association of State Highway and Transportation Officials, *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, Fifth Edition, Washington, DC, 2004.
5. Glennon, J. "New and improved model of passing sight distance," *Transportation Research Record 1195*, Transportation Research Board, 1988, pp. 55-69.
6. Hassan, Y., A. El Halim and S. Easa, "Passing sight distance on two-lane highways: review and revision," *Transportation Research. Part A*, Vol. 30, No. 6, 1996, pp. 453-467.
7. Rillet, L. R., B. Hutchinson and M. Whitney, "Mechanics of the passing maneuver and the impact of large trucks," *Transportation Research, Part A*, Vol. 24A, No. 2, 1990, pp. 121-128.
8. Rocci, S., "Transportation Research Circular E-003: A system for no-passing zone signing and marking setup," Transportation Research Board, 1998.
9. Wang, Y. and M. Cartmell, "New Model for Passing Sight Distance on Two-Lane Highways," *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 124, 1998, pp. 536.
10. El Khoury, J. and Hobeika, A , "New approach for estimating the passing sight distance requirements," *Transportation Research Board 85th Annual Meeting, 2006*.
11. El-Bassiouni, S and T. Sayed, "Design Requirements for Passing Sight Distance: A Risk-based Approach," *Transportation Research Board 89th Annual Meeting, 2010*.
12. Federal Highway Administration, US, *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways*, 2003.
13. Ministry of Public Works, Spain,. *Instrucción de Carreteras 3.1 IC "Trazado"*, 2000.
14. Ministry of Public Works, Spain, *Instrucción de Carreteras 8.2 IC "Marcas viales"*, 1987.
15. Polus, A., M. Livneh and B. Frischer, "Evaluation of the passing process on two-lane rural highways," *Transportation Research Record 1701*, Transportation Research Board, 2000, pp. 53.
16. Carlson, P. J., J. D. Miles and P. K Johnson, "Daytime High Speed Passing Maneuvers observed on Rural Two-Lane, Two-Way Highway: Findings and Implications," *Transit*, Vol. 1961, No. 1, 2006, pp. 9.
17. Harwood, D. W., D. Gilmore and K. Richard, "Passing Sight Distance Criteria for Roadway Design and Marking," *Transportation Research Board 89th Annual Meeting, 2010*.
18. Romero, M. and A. García, "Deceleration Lane Length Evaluation Based on a New Conflict Indicator," *4th International Symposium on Highway Geometric Design, Valencia, Spain*, 2010.
19. Harwood, D.W., D. Torbic, K. Richard, W. Glauz and L. Elefteriadou, *Review of Truck Characteristics as Factors in Roadway Design*. NCHRP Report 505, Transportation Research Board, 2003.

LIST OF TABLES AND FIGURES

TABLE 1 Field study locations and characteristics

TABLE 2 Variables of passing maneuver

FIGURE 1 Sample frames of a passing maneuver observed at 6 cameras and location of the Moving Traffic Laboratory (MTL) near the studied passing zone

FIGURE 2 Speed variation in passing maneuvers. Plotted lines represent relative speed respect of the initial speed of the impeding vehicle.

FIGURE 3 Speeds of passing and impeding vehicle vs. design speed

FIGURE 4 Comparison of left lane distance in AASHTO model

FIGURE 5 Comparison of left lane distance in Hassan et al.

Passing Zone	1	2	3	4
Location	Casinos CV-35	Vilamarxant CV-50	Carlet CV-50	Carlet CV-50
Date	Feb, 16 th 2010	Mar, 11 th 2010	Apr, 4 th 2010	Apr, 4 th 2010
Duration (hours)	4	4	3	3
Time at start	9:00	8:30	9:00	9:00
Weather – Lighting	Cloudy	Sunny	Sunny	Sunny
Road Surface	Dry	Dry	Dry	Dry
<i>Geometric characteristics</i>				
*Length of the passing zone (m)	1,100 – 1,300	600 - 850	245-280	270-260
Grade	0%	0%	0%	0%
<i>Traffic conditions</i>				
Average hour traffic volume (veh/h)	268	282	285	285
% of heavy vehicles	23	17	15	15
*Operating speed (km/h)	119-111	95-93	92-100	92-100
*Free flow operating speed (km/h)	125-120	98-94	97-103	97-103
**Design speed (km/h)	120	80	90	90
**Speed limit (km/h)	100	100	100	100
<i>Observed maneuvers</i>				
Number of observed passing maneuvers	118	100	8	8
Passing trajectories obtained	14	35	4	5
Passing rate (Pass/veh) %	11.0	8.9	0.9	0.9
Passing frequency (Pass/hour)	29.5	25.0	2.7	2.7

*The two numbers indicate the values corresponding to the two directions of the road

**Design speed is defined (according to Spain design criteria (13)) as a reference speed for highway sections of at least 2 km. Posted speed limit can be higher in shorter sections.

TABLE 1 Field study locations and characteristics

	Code	Unit	15 th Perc	Mean	85 th Perc	Mean Car	Mean Truck
Sample 1 and 2: basic variables							
Number of passed vehicles	<i>NUMI</i>	-	-	-	-	-	-
Type of passed vehicle	<i>TYPEI</i>	-	-	-	-	-	-
Time travelled on left lane (only simple passes)	<i>t1</i>	s	5.4	7.6	10.2	6.36	8.95
Time between return to the own lane and crossing with opposing vehicle, if exists	<i>t2</i>	s	2.4	3.4	5.0	not significant dif.	
Sample 2: trajectory data reduction (Only simple passes)							
Length of passing vehicle	<i>Lp</i>	m	4.0	4.5	5.0	-	-
Length of passed vehicle	<i>Li</i>	m	4.5	7.8	11.5	4.5	11,3
Distance travelled on left lane by passing vehicle	<i>d1</i>	m	130	193	267	170	222
Distance travelled by passed vehicle	<i>d1i</i>	m	88	147	204	130	170
Average speed of passed vehicle	<i>Vi</i>	km/h	53	69	74	not significant dif.	
Average speed of passing vehicle	<i>Vp</i>	km/h	75	92	107	not significant dif.	
Average speed difference	<i>dV</i>	km/h	15	23	33	not significant dif.	
Gap between passing and passed vehicles at begin of maneuver	<i>h1</i>	m	5	13	16	not significant dif.	
Gap between passing and passed at end of maneuver	<i>h2</i>	m	9	12	21	not significant dif.	
Gap between passing and opposing vehicle at end of maneuver (clearance distance)	<i>dp-o</i>	m	98	163	243	not significant dif.	
Average acceleration of passed vehicle before the abreast position	<i>a</i>	m/s ²	0.5	1.0	1.6	not significant dif.	

TABLE 2 Variables of passing maneuver

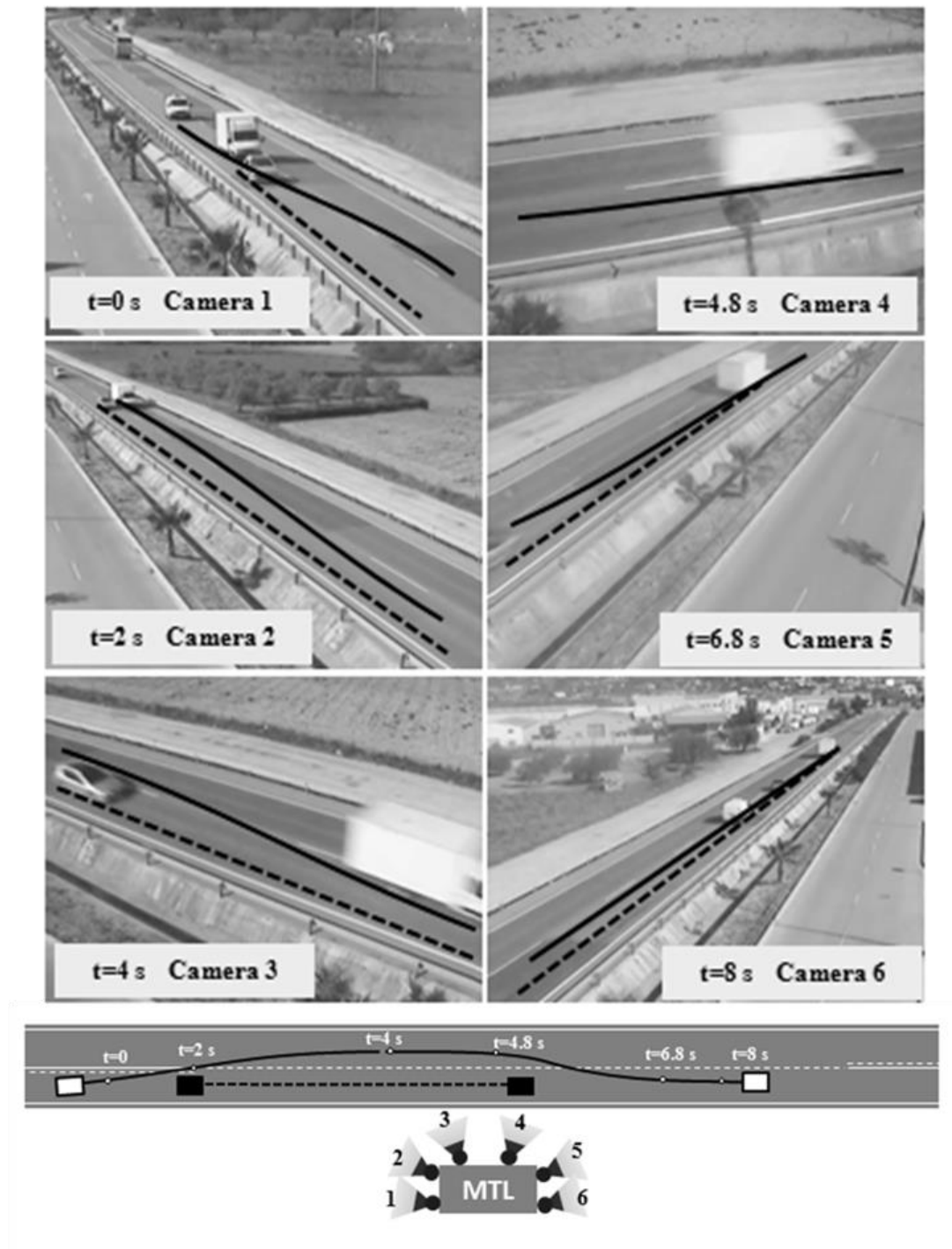


FIGURE 1 Sample frames of a passing maneuver observed at 6 cameras and location of the Moving Traffic Laboratory (MTL) near the studied passing zone

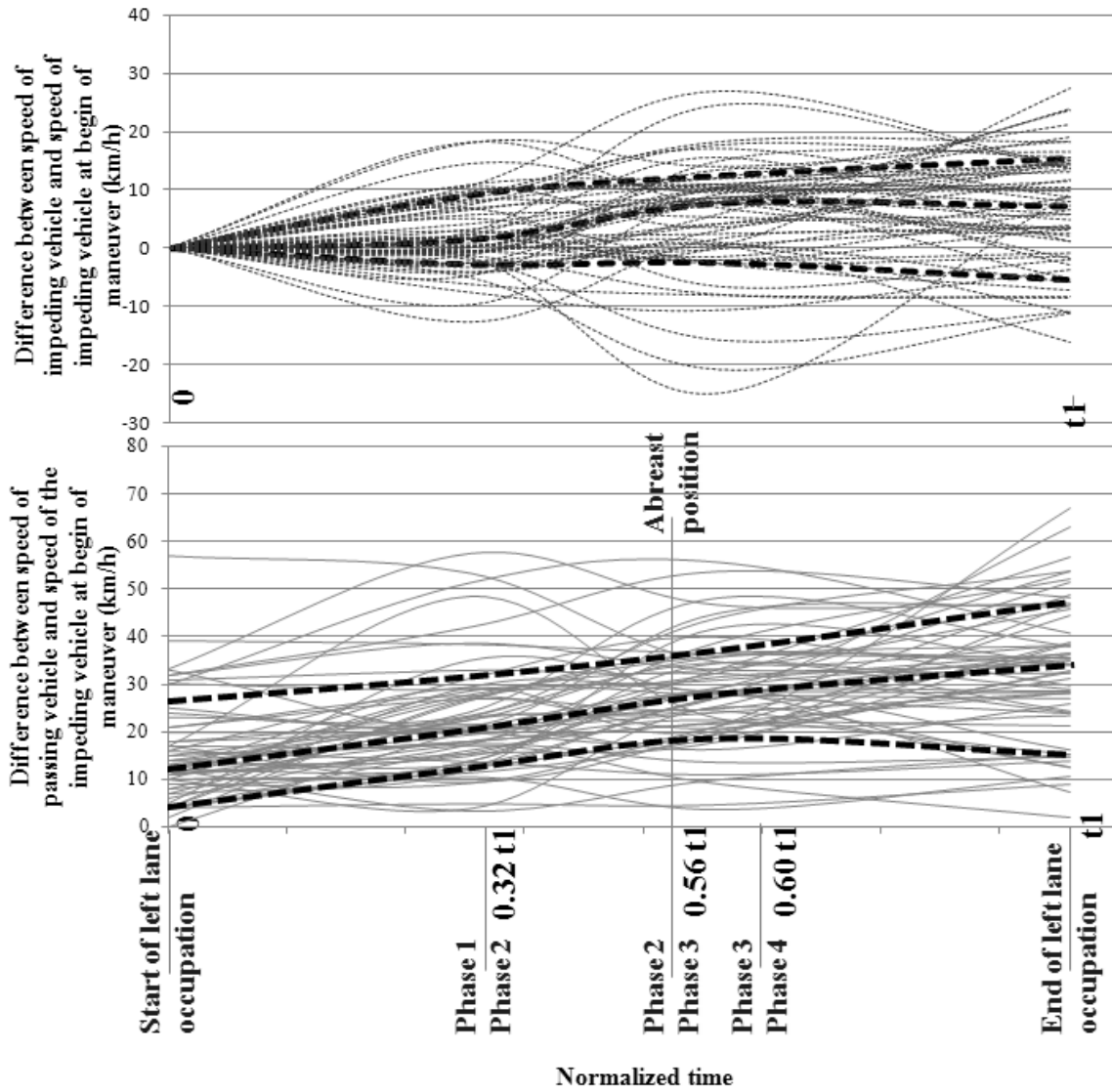


FIGURE 2 Speed variation in passing maneuvers. Plotted lines represent relative speed respect of the initial speed of the impeding vehicle. Broken lines are percentiles 15, 50 and 85th.

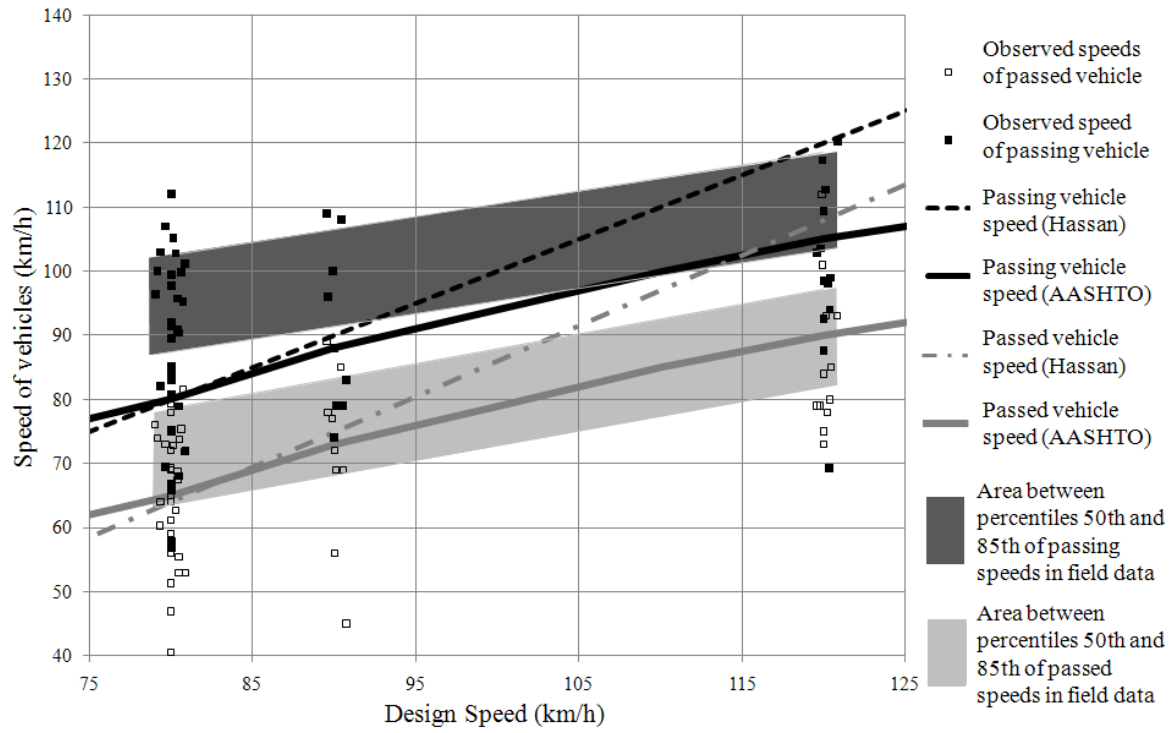


FIGURE 3 Speeds of passing and impeding vehicle vs. design speed

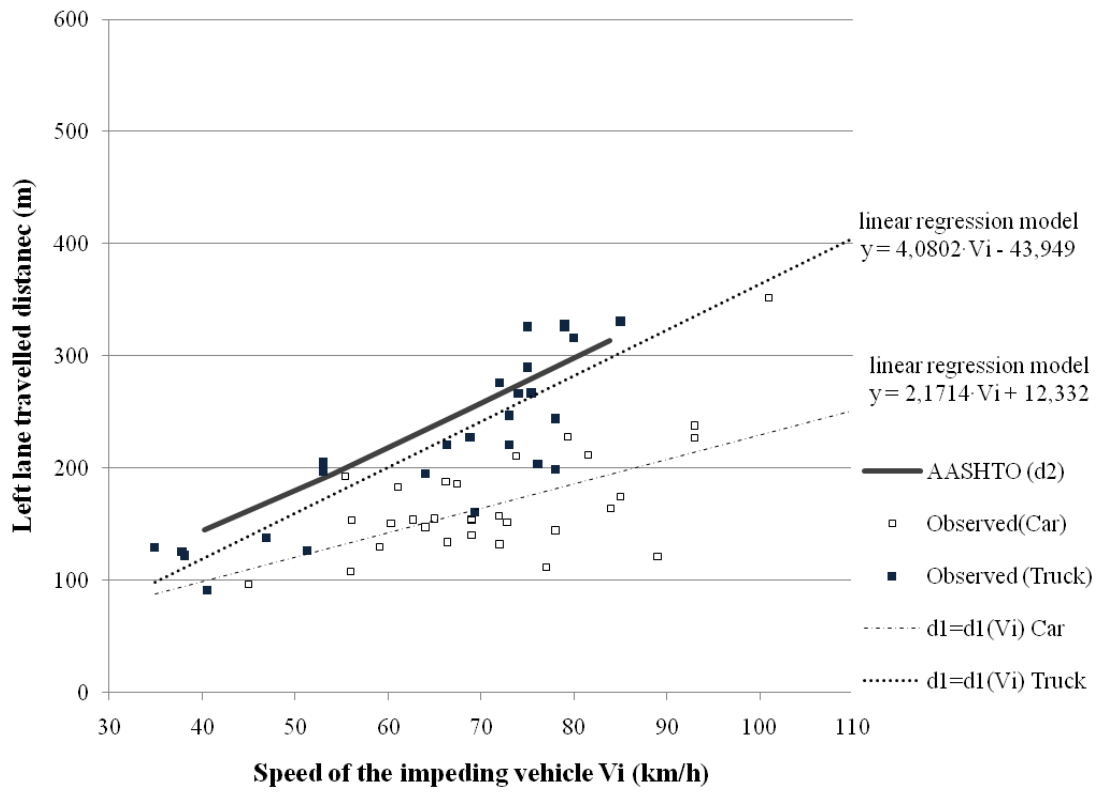


FIGURE 4 Comparison of left lane distance in AASHTO model

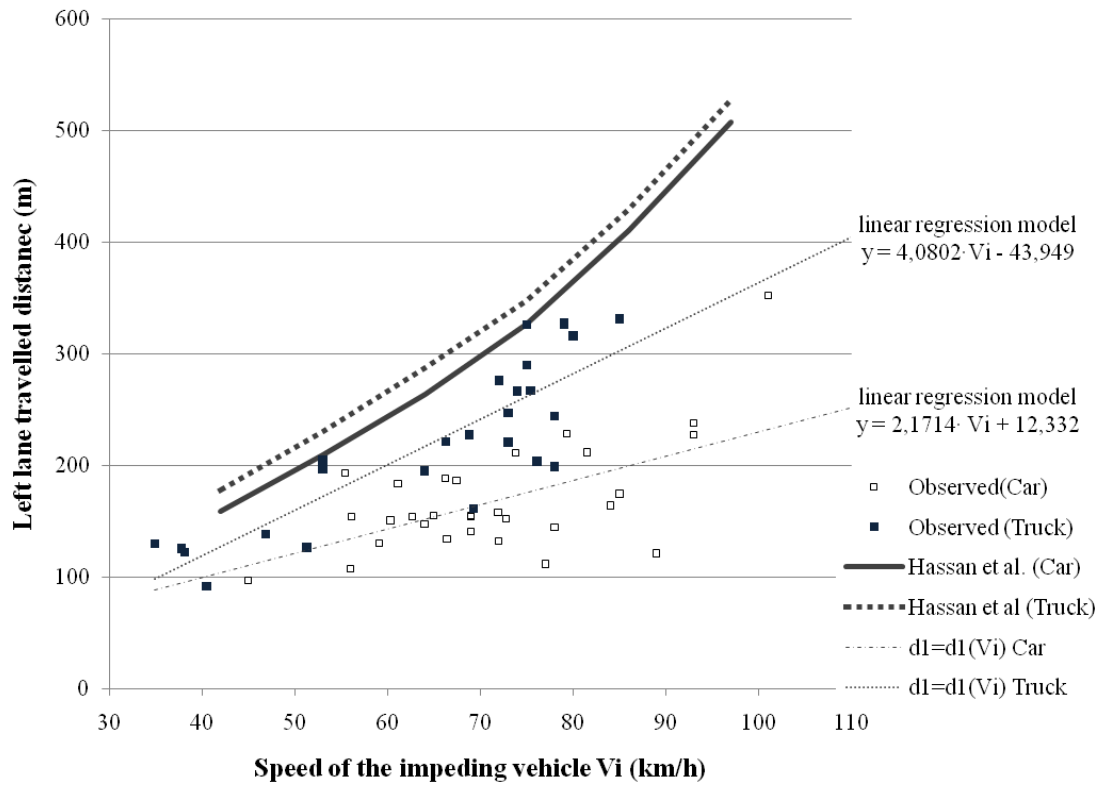


FIGURE 5 Comparison of left lane distance in Hassan et al.

2. Llorca, C., García, A., Perez, A.M., Moreno, A.T. "New experimental approach for passing gap acceptance", 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., Jan. 2012.

NEW EXPERIMENTAL APPROACH FOR PASSING GAP ACCEPTANCE

Corresponding Author:

Carlos Llorca

Ph.D. Candidate

Highway Engineering Research Group

Universitat Politècnica de València

Camino de Vera, s/n. 46022 – Valencia. Spain

Tel: (34) 96 3877374

Fax: (34) 96 3877379

E-mail: carlloga@cam.upv.es

Other Authors:

Alfredo García

Professor

Highway Engineering Research Group

Universitat Politècnica de València

Camino de Vera, s/n. 46022 – Valencia. Spain

Tel: (34) 96 3877374

Fax: (34) 96 3877379

E-mail: agarciag@tra.upv.es**Ana María Pérez**

Ph.D. Candidate

Highway Engineering Research Group

Universitat Politècnica de València

Camino de Vera, s/n. 46022 – Valencia. Spain

Tel: (34) 96 3877374

Fax: (34) 96 3877379

E-mail: anpezu@tra.upv.es**Ana Tsui Moreno**

Ph.D. Candidate

Highway Engineering Research Group

Universitat Politècnica de València

Camino de Vera, s/n. 46022 – Valencia. Spain

Tel: (34) 96 3877374

Fax: (34) 96 3877379

E-mail: anmoch@cam.upv.esSubmission date: November, 15th, 2011

Word count:	Abstract:	248
	Manuscript:	5146
	Figures: 7 x 250 =	1750
	Tables: 1 x 250 =	250
	TOTAL:	7394

Key words: Passing gap acceptance, Passing sight distance, Instrumented vehicle.

ABSTRACT

On two-way two-lane rural highways, drivers need to pass slower vehicles to drive at their desired speed, by travelling in the opposing lane during the maneuver. Drivers make a decision before performing the maneuver, in order to accept or reject each observed gap in the oncoming traffic flow.

A gap can be defined as the time or the distance between two consecutive vehicles in traffic flow. In relation to passing process, gaps can be evaluated from external points of view (static gaps measured on fixed positions) or by the driver of the passing vehicle (dynamic gaps until crossing an opposing vehicle). Both definitions are discussed and compared.

However, if gaps are measured only by taking into account an opposing vehicle, it is possible to evaluate a gap with an opposing vehicle which is further than the maximum available sight distance. Then, the measured gap is longer than the actual gap considered by drivers.

This new approach considers the effect of limited sight distance conditions, and the existence of road markings which indicates the end of passing zones. These factors have been added and a new function of probability of acceptance and rejection has been obtained, based on collected data from an instrumented vehicle in 103 maneuvers on three different road segments.

Results show that longer gaps have to be replaced by their equivalent virtual gaps, which are computed until crossing an opposing vehicle which could appear at the end of the visible area, before the real vehicle comes.

1 INTRODUCTION

2
3 The operational efficiency of many two-lane rural roads depends on the opportunity for faster drivers
4 to pass slower drivers. Where faster drivers encounter a slower one and are unable to pass, platoons
5 form and the level of service of the two-lane highway decreases. This is why passing zones are
6 considered in the design of two-lane rural roads to provide opportunities for faster drivers to pass
7 where gaps in opposing traffic permit. To do so, passing sight distance (PSD) has to be taken into
8 account.

9 PSD is the distance that drivers must be able to see along the road ahead to safely and
10 efficiently initiate and complete passing maneuvers of slower vehicles on two-lane highways using
11 the lane normally reserved for opposing traffic.

12 The 2004 Green Book (1) incorporates several assumptions about driver behavior during a
13 passing maneuver. Those assumptions and field data were used for developing the passing sight
14 distance criteria. The minimum PSD is defined as the sum of the following four distances:

- 15 • d_1 : distance traveled during perception and reaction time and during the initial
16 acceleration to the point of encroachment on the left lane. Duration of this initial
17 maneuver is estimated as within 3.6 to 4.5 s range.
- 18 • d_2 : distance traveled while the passing vehicle occupies the left lane. Duration of
19 passing vehicles occupying the left lane is estimated as within 9.3 to 11.3 s range.
- 20 • d_3 : distance between passing vehicle at the end of its maneuver and opposing vehicle
21 (clearance distance). Its minimum is estimated to vary from 30 to 90 m.
- 22 • d_4 : distance traversed by an opposing vehicle for two-thirds of the time the passing
23 vehicle occupies the left lane, or $2/3$ of d_2 .

24 Over the last three decades, researchers have questioned the premises of the Green Book
25 model and/or suggested revisions to this model. Most of them agree that PSD should be based on a
26 critical position (2, 3, 4). Several definitions for this location have been given. However, ability to
27 pass is not only influenced by highway geometry, particularly available sight distance, but also by
28 human factors such as driver-reaction time and gap acceptance characteristics.

29 Passing is commonly modeled as a binary choice in which drivers either accepts or rejects an
30 available gap in traffic on opposing lane. Passing gaps are defined in terms of distance or time.

31 Gap is usually defined as the distance (or time) between consecutive vehicles on the
32 oncoming traffic (static definition). It has been also defined as the time until crossing an opposing
33 vehicle when a passing vehicle is starting a passing maneuver (dynamic definition). Farah et al. (5, 6)
34 obtained from a simulator test than the mean dynamic accepted gap was 19.6 seconds and the mean
35 rejected gap was 15.5 seconds. Based on their developed model, they stated that critical passing gaps
36 and passing gap acceptance decisions are affected by variables that describe the situation a driver is
37 faced with (in addition to the size of the available gap): acceptance probabilities increase with speed
38 of passing vehicle and decrease with following distance from a vehicle in front.

39 Pollatschek and Polus (7) quantified driver's impatience during passing maneuvers. They
40 found that the critical gap decreases with an increase in two-way hourly volume.

41 Toledo and Farah (8) investigated and compared different definitions of passing gaps and
42 used these definitions to develop different passing gap-acceptance models. Three different models
43 were developed and calibrated based on data of passing maneuvers collected with a driving simulator.
44 The results show that there was a significant impact of the passing gap definition on the models'
45 capability to explain drivers' passing behavior.

46 Alternatives to the AASHTO design model for passing process (1) require actual data to
47 calibrate and determine design values. Several researchers collected data of passing behavior by
48 continuous videotaping from fixed observation points (9, 10, 11). Data has been also collected from
49 an instrumented vehicle (12, 13) in order to characterize evolution of passing vehicles along the
50 maneuver.

51 Passing gap acceptance is an important driving behavior that has important implications on
52 both traffic flow and safety in two-lane rural roads. However, detailed data, that can be used to
53 explain passing behavior, are difficult to collect in the real-world, partly because passing maneuvers

1 may take place at any point on the road. In part, this is why little research has been conducted to
2 develop models for passing gap acceptance behavior.

3 4 **OBJECTIVES**

5
6 One of the main parameters to perform passing maneuvers is gap acceptance. However, it is difficult
7 to model or estimate because of the lack of available data. Passing maneuver is scattered distributed
8 along the road; so, data collection is a difficult task and it is usually done by volunteers or on driving
9 simulators.

10 Moreover, there are different definitions for passing gap but all of them only consider
11 vehicles on the opposing lane.

12 The purpose of this paper is to present a new methodology to analyze passing maneuvers
13 based on gap acceptance. This methodology is based on the definition of different passing gaps,
14 including not only the interaction between vehicles but also available sight distance and location of
15 road markings and vertical signs. The hypothesis is that gap acceptance and rejection distributions, as
16 well as critical gaps, would be different if these actual characteristics of highways are considered.

17 The results presented in this paper have been obtained by applying this methodology on three
18 road segments, where passing maneuvers are allowed. Data have been collected using an instrumented
19 car as impeding vehicle. It was a regular passenger car; and devices were not visible from outside;
20 which minimizes influence on drivers' behavior.

21 22 **A NEW METHODOLOGY TO ANALYZE PASSING MANEUVERS**

23
24 A new methodology to analyze passing maneuvers based on gap acceptance has been developed.
25 Firstly, different passing gaps have been defined. Then, the most important passing gaps among
26 different scenarios have been stated. Therefore, the new methodology has been applied to the different
27 theoretical passing scenarios.

28 29 **Passing gap definitions**

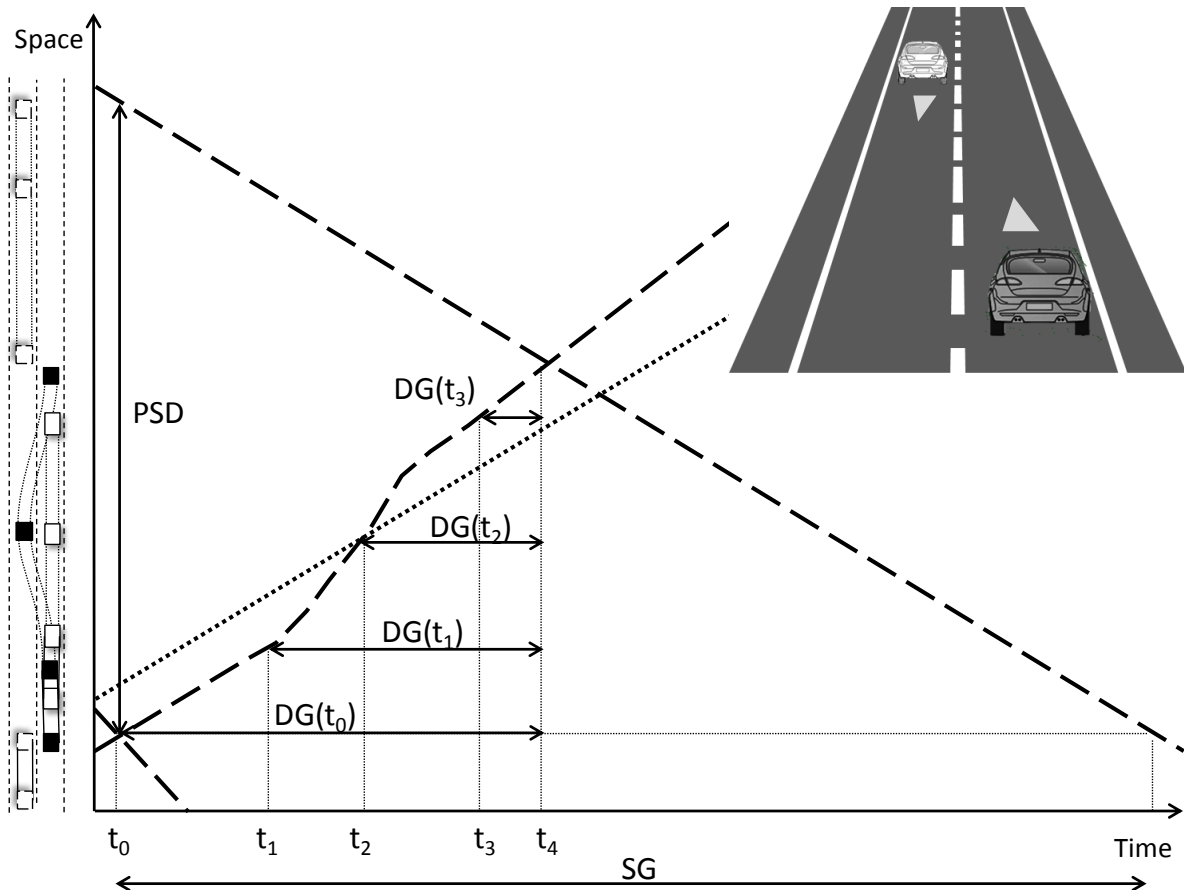
30 Time-space diagrams are used to describe the passing maneuver. In these diagrams, time and space
31 are represented on horizontal and vertical axes, respectively. Typically, three vehicles are involved on
32 a passing maneuver: passing vehicle; impeding vehicle; and opposing vehicle. The trajectories of the
33 three vehicles are represented on a time-space diagram with lines: passing vehicle with solid line;
34 impeding vehicle with dotted line; and opposing vehicle with dashed line.

35 As seen on Figure 1, five points of the passing maneuver are defined::

- 36 • t_0 : start of the gap. It could be defined by either the end of a no-passing zone or the
37 crossing between the passing and a previous opposing vehicle.
- 38 • t_1 : first encroachment point on the left lane of the passing vehicle.
- 39 • t_2 : abreast position of the passing and impeding vehicle.
- 40 • t_3 : end of left lane occupation.
- 41 • t_4 : crossing between the passing and opposing vehicle.

42 The definition of these five points establishes the different phases of the passing maneuver.
43 The first phase is the time between the start of a passing opportunity (t_0) and the beginning of the left
44 lane occupation (t_1). The second phase corresponds to the left lane occupation by the passing vehicle
45 while it is overtaking the impeding vehicle. Consequently, it starts at t_1 and ends when the rear left
46 wheel of the passing vehicle crosses the center line (t_3). Both first and second phases are determined
47 by the decision to pass; and the passing vehicle could accept or reject the gap at every moment. The
48 last phase of the maneuver is the clearance between the passing and opposing vehicles at the end of
49 the pass; it starts at t_3 and it ends at the abreast position of the passing and the opposing vehicle (t_4).
50 This phase reflects the safety of the maneuver: the longer the third phase is, the higher the time until
51 the passing and opposing vehicle crossing is.

52 This approach includes not only completed passing maneuvers but also rejected passing gaps.
53 One gap is rejected if the driver decides not to initiate or complete the passing maneuver. Gap
54 acceptance is checked at any moment of the maneuver. If the driver had already occupied the left lane
55 prior rejecting the gap, it is defined as aborted maneuver.



1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28

FIGURE 1 Passing maneuver with unlimited available sight distance

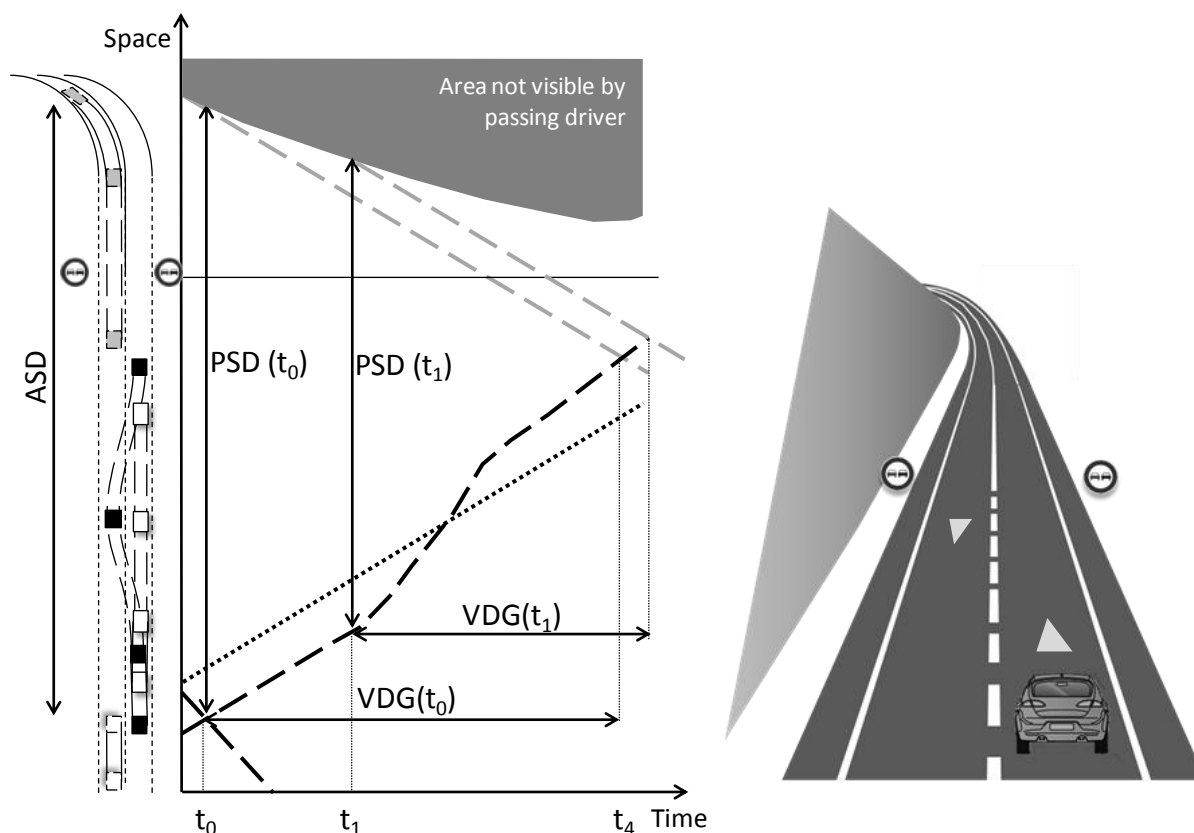
Passing models use passing gaps to analyze the maneuver; which can be calculated on both time and distance. Static time gap (SG) is defined as the time between two consecutive opposing vehicles passing through one section of the roadway. This time can be measured by an external observer. However, static time gap cannot consider the time to complete the maneuver or its risk.

Dynamic time gaps (DG) are proposed as the time until crossing between the passing vehicle and the opposing vehicle (8); and they can be calculated in every section during the passing maneuver. Therefore, four dynamic time gaps are highlighted (Figure 1):

- $DG(t_0)$: time gap between the beginning of the passing possibility and the crossing of the passing and the opposing vehicle. It can be calculated as $t_4 - t_0$.
- $DG(t_1)$: time gap between the first encroachment point and the crossing of the passing and opposing vehicle. It is defined as $t_4 - t_1$; and it is usually named “time to collision” (TTC).
- $DG(t_2)$: time gap between the abreast position of the passing and impeding vehicle and the crossing of the passing and the opposing vehicle. It can be calculated as $t_4 - t_2$.
- $DG(t_3)$: time gap between the end of the occupation of the left lane and the crossing of the passing and opposing vehicle. It can be calculated as $t_4 - t_3$. This gap defines the safety of the maneuver and it is equal to the third passing maneuver phase duration.

In the literature (5, 6, 8), dynamic gaps have been calculated between the passing vehicle and the opposing vehicle; which is accurate in sections with unlimited sight distance. However, actual two-lane rural highways have limited available sight distance. Under this condition, opposing vehicles may be blocked by lateral obstacles, such as trees, buildings or cuttings, or the alignment itself; so, one opposing vehicle could appear after sight distance limit. Consequently, drivers also consider time gaps between their vehicle and available sight distance limit in case one opposing vehicle comes out. Figure 2 shows the passing maneuver with limited available sight distance. This time gap is shorter than the usual gap between both vehicles on unlimited available sight distance zones. Thereafter, a new dynamic time gap, virtual dynamic gap (VDG), is proposed as the time between the passing

1 vehicle and one virtual opposing vehicle that could appear at the available sight distance limit. As
 2 available sight distance profile is not constant, this virtual opposing vehicle does not appear at the
 3 same point; and it should be checked at every position of the passing vehicle during the maneuver, as
 4 seen in Figure 2.



5
 6 **FIGURE 2 Passing maneuver with limited available sight distance**

7 Drivers are not aware of opposing vehicle speed while considering *VDG*. Opposing vehicle
 8 speed can be assumed to be equal to the operating speed on that section. Individual speeds should be
 9 collected in order to calculate the 85th percentile of vehicles under free-flow conditions. Continuous
 10 speed profiles can be obtained using GPS trackers or video recordings. Besides, spot speeds could be
 11 measured on different sections to estimate continuous speed profile at the segment. If no data
 12 collection is possible, operating speed models could be used to approximate speed profile.

13 Virtual dynamic time gap should be considered until an opposing vehicle comes out. Then,
 14 dynamic time gap to the opposing vehicle should be calculated.

15 According to design guidelines (1), enough passing sight distance (*PSD*) should be provided
 16 at frequent intervals on two-lane highways in order to allow drivers to pass slower vehicles. Marking
 17 standards (14, 15) determine passing zones and no-passing zones; which consider shorter *PSD* values
 18 than design guidelines. Passing maneuver can be safely performed along passing zones. Therefore,
 19 drivers usually limit the passing maneuver to passing zones; and no-passing zone sign demarcates the
 20 opportunity to pass. Consequently, no-passing zone sign location should be also considered on the
 21 analysis of passing maneuvers. Another dynamic time gap, sign dynamic gap (*SDG*), is defined as the
 22 time spent by the passing vehicle to reach to the no-passing zone sign (Figure 3).

23 Time gaps can be easily transformed into distance gaps using the time-space diagram.
 24 Distance gaps have also been used previously in the literature to analyze the passing gap acceptance
 25 (16, 17). The most important distance gaps are: distance between the passing vehicle at t_0 and the
 26 opposing vehicle; and distance between the passing vehicle at t_0 and the virtual opposing vehicle just
 27 located at the sight obstruction. Consequently, passing distance gap is the minimum of both distances.

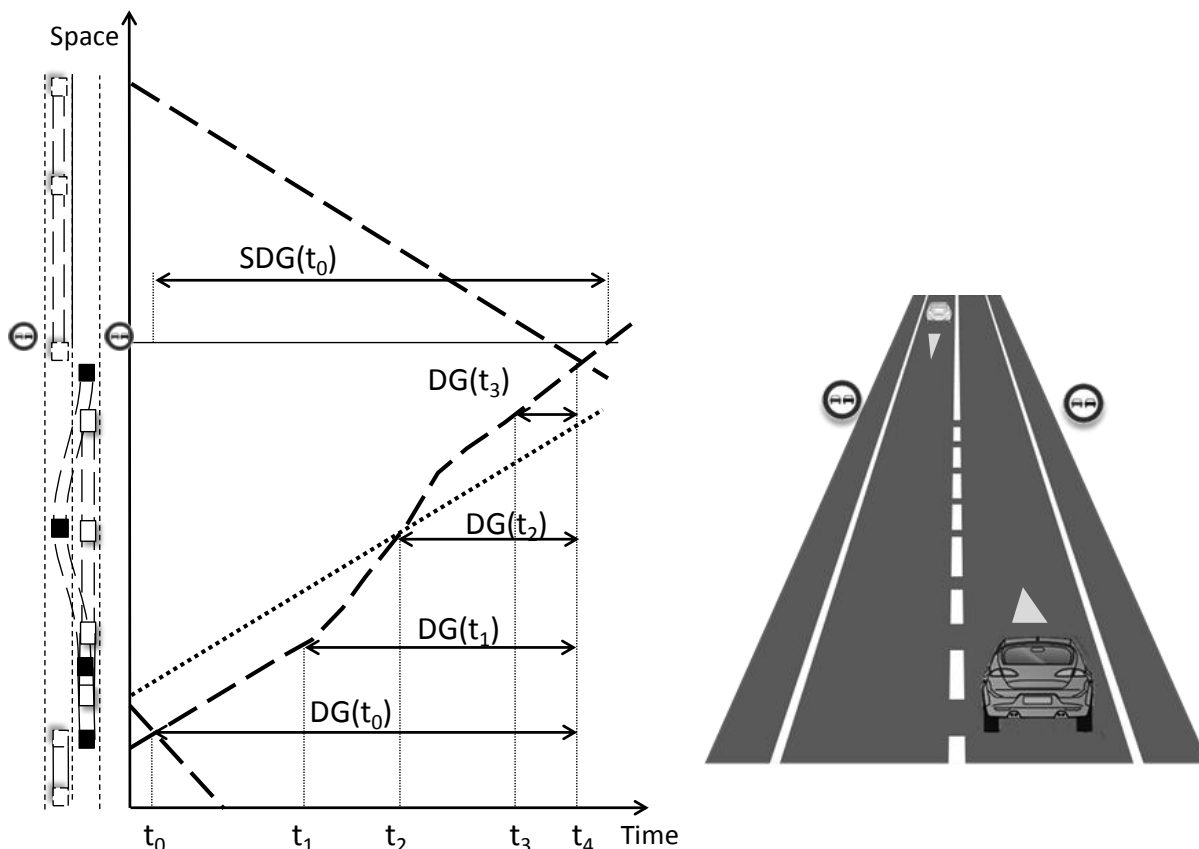


FIGURE 3 Passing maneuver with no-passing zone sign

Passing scenarios

The new approach can be applied to the different passing scenarios depending on: presence of opposing vehicle; available sight distance; and distance to no-passing zone. At each scenario, the minimum gap of the passing maneuver has been determined. Figure 4 shows the flow diagram.

The approach must be applied for every accepted and rejected gap. However, for rejected gaps only the values at the start of the gap can be considered, because the maneuver is not performed.

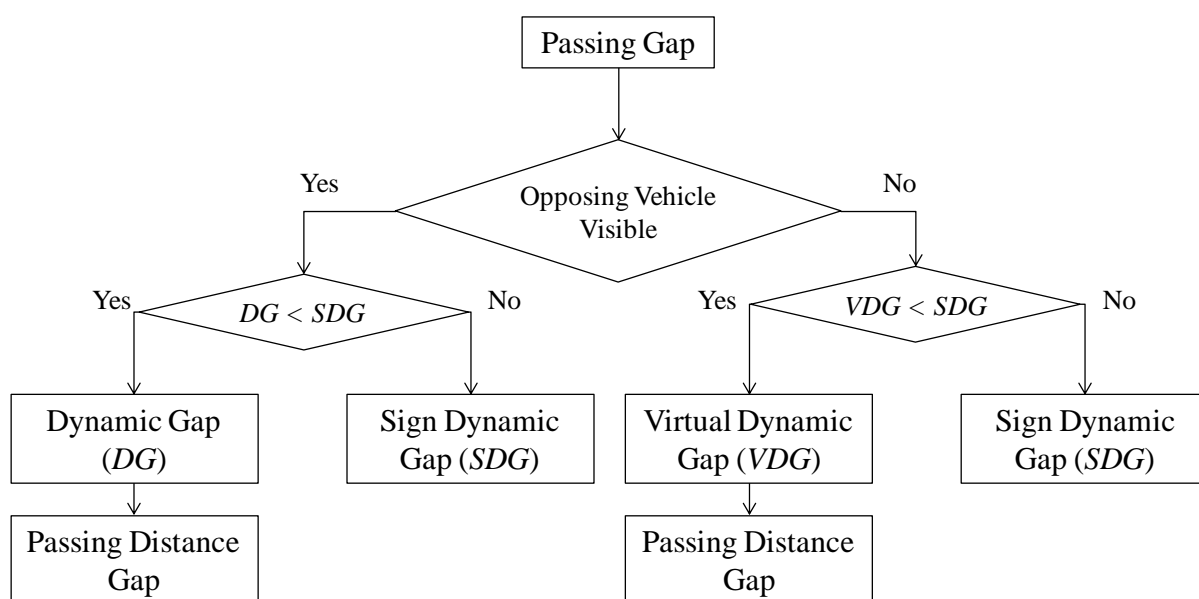


FIGURE 4 Passing scenarios

1 FIELD STUDY

3 Site selection

4 For the research, three road segments were selected according to the following criteria: include one
5 passing zone previously studied (11); uniform design speed; uniform cross section; constant posted
6 speed limit; no intersections; uniform traffic volume on the roadway segment; and length shorter than
7 10 km. Length of studied sections was limited, in order to concentrate the sample in fewer passing
8 zones.

9 A previous study (11) scanned the road network to detect zones with higher probability of
10 passing maneuvers with design speed from 80 to 120 km/h. For this research three road segments
11 which included 24 passing zones were selected. Four of them were recorded on the previous study
12 using a traffic mobile laboratory. . Table 1 shows the characteristics of those road segments, and the
13 number of observations in each case.

Highway	CV-35	CV-50 (i)	CV-50 (ii)
Length of section (km)	10	1.5	6
Design speed (km/h)	120	80	90
Traffic volume (veh/h)	250 - 350		
Grade	< 3%		
Length of passing zones (m)	450 - 1800	600 - 800	250 - 1100
Estimated speed of impeding vehicle (km/h)	80 - 90	50 - 60	60 - 70
Number of maneuvers	30	37	36
Travelled distance (km)	160	85	155
Duration of observation (h)	4	4	4

15 **TABLE 1 Road segments selected for the study and number of observed maneuvers**

17 Data collection

18 To collect data of passing maneuvers, an instrumented car was used. The car was equipped with four
19 digital cameras and one GPS tracker connected to a VBOX data logger. The GPS tracker recorded
20 latitude, longitude, heading, time and date 10 times per second. The digital cameras were installed
21 inside the vehicle and were not perceived by other drivers. In order to record complete maneuvers,
22 one camera was installed on the rear of the vehicle; two cameras on the left side; and one camera on
23 the front. The provided software allowed correlating video and GPS data.

24 Once the vehicle was equipped, a calibration of the references was performed. Three
25 rectangles were delimited with traffic cones at known distances. Then, relative distances could be
26 obtained from the video based on perspective restitution (18). Absolute distances were deduced using
27 the GPS data.

28 The instrumented vehicle performed as an impeding car. Speed of the instrumented vehicle
29 was controlled using cruise control and it varied between 50 and 90 km/h.. For each highway section,
30 several speed levels were fixed, according to the observed speeds of impeding vehicles during the
31 previous study (Table 1). Therefore, the previous conditions were copied; so, no modifications on
32 regular traffic flow were introduced. Speed of the impeding car was constant along the entire highway
33 section; and so let faster vehicles pass. Drivers and passing vehicles' data were collected by the co-
34 driver. Age, gender, number of passengers, car model, and car plate were noted down; as well as the
35 time of the passing maneuver.

1 Tests were performed during morning period between 9:00 a.m. and 2:00 p.m., on a working
2 day and with good weather conditions.

3 4 **DATA REDUCTION**

5
6 Field data was processed in order to evaluate and estimate the different definitions of passing gap.
7 Data obtained from the instrumented vehicle contained video images of both passing and opposing
8 vehicles and positioning of the impeding (instrumented) vehicle. Each maneuver and the following
9 process before it were identified with video images.

10 The time spent following began when a passing vehicle arrived behind the impeding vehicle
11 or the last vehicle of the platoon, and the time gap between them was less than 2.5 s. This value was
12 deduced for this paper after observing video data. Then, each passing gap was identified, measured
13 and classified among the previously defined cases. When a platoon of vehicles was observed on the
14 oncoming lane, only the gap against the lead vehicle was considered.

15 Different variables were evaluated directly from video images and GPS-position data, as defined
16 previously:

- 17 ▪ Acceptance or rejection of the gap.
- 18 ▪ Time at the start of the gap or passing opportunity, t_0 .
- 19 ▪ Time at the crossing with next opposing vehicle, if it is visible, t_4 .
- 20 ▪ Time at the start of maneuver, t_1 (only for accepted gaps).
- 21 ▪ Time at the end of maneuver, t_3 (only for accepted gaps).
- 22 ▪ Position of the instrumented vehicle at each moment.

23 Dynamic gaps are easily measured by time difference between t_4 and t_0 . Position of passing
24 vehicle along the whole passing gap was estimated to calculate dynamic gaps when passing and
25 opposing vehicle crossing took place outside the visible area. Relative position of the passing vehicle
26 behind or in front of the instrumented car was obtained from video images by using perspective
27 restitution software (18). Considering position GPS data of the impeding car, the position of the
28 passing vehicle during the pass was deduced.

29 After that, the passing vehicle was placed in the highway section, and distances to the start of
30 no-passing zones were calculated. Time to arrive to the start of no-passing zone was also calculated
31 using that distance and the observed speed of the passing vehicle.

32 Trajectories of passing and opposing vehicles were extrapolated from the known data when t_4
33 was not visible. Then, static and dynamic gaps were deduced. Speed of passing vehicle could be
34 obtained from collected video data only during the maneuver. From the end of the maneuver that
35 speed was estimated by comparing it with the 85th percentile of free flow operating speed (assumed as
36 desired speed). It was considered that if speed of passing vehicle during the maneuver was different to
37 desired speed, this vehicle will accelerate or decelerate until it reaches that speed. Speed of opposing
38 vehicle was estimated also by the 85th percentile of free flow operating speed. Estimation of speed of
39 opposing vehicle represented also the same estimation process made by the driver which was about to
40 pass, without information of the actual speed of that vehicle.

41 Continuous speed profiles were available on one of the road segments. They were collected
42 by installing GPS-trackers on different vehicles for a previous research (19). On the other road
43 segments, an estimation of speed profiles was carried out based on prediction models (19) and
44 validated with observed spot speed data from the previous study (11)

45 In order to define virtual passing gaps, available sight distance along each point of every
46 passing zones was estimated. A combination of high resolution aerial photographs, video images
47 from driver's point of view, and GPS elevation data along the trips made by the instrumented car were
48 used. Sight distance estimation was done on tangent sections where passing was allowed, according to
49 marking and signing.

50 Once the available sight distance profile on each point was known, virtual passing gaps (both
51 passing sight distance and static gaps) were obtained by calculation of trajectories of passing and
52 virtual opposing vehicles. Every dynamic virtual gap ended when passing vehicle crossed with the
53 virtual opposing vehicle.

ANALYSIS

Passing gap acceptance behavior of a sample of 103 maneuvers was analyzed according to the proposed methodology. A total number of 581 gap observations were considered, among accepted and rejected passing opportunities. Rejected gaps were only considered if the vehicle eventually performed the passing maneuver, which ensures the desire to pass of the sample of drivers. No aborted maneuvers were observed.

For each passing opportunity, the following variables were obtained:

- Time static gap between consecutive opposing vehicles, SG .
- Time dynamic gap considering the next opposing vehicle, $DG(t_0)$.
- Virtual dynamic gap considering an opposing vehicle which appears from the limit of available sight distance $VDG(t_0)$.
- Time to end of the marked passing zone $SDG(t_0)$.
- Passing distance gap considering the next opposing vehicle or the virtual opposing vehicle $PSD(t_0)$.

Time dynamic gaps and distance gaps were also computed at the start and at the end of completed passing maneuvers: $VDG(t_1)$ and $VDG(t_2)$ when the gap was accepted.

For each gap, a comparison between the three possible dynamic gaps was made at t_0 : 1), dynamic gap until the next opposing vehicle (DG); 2), virtual dynamic gap (VDG); and 3), time to the end of the passing zone (SDG). Figure 5 shows the different distribution of gaps. According to their cumulative probability distribution, the higher gaps were with a real opposing vehicle, rather than virtual gaps.

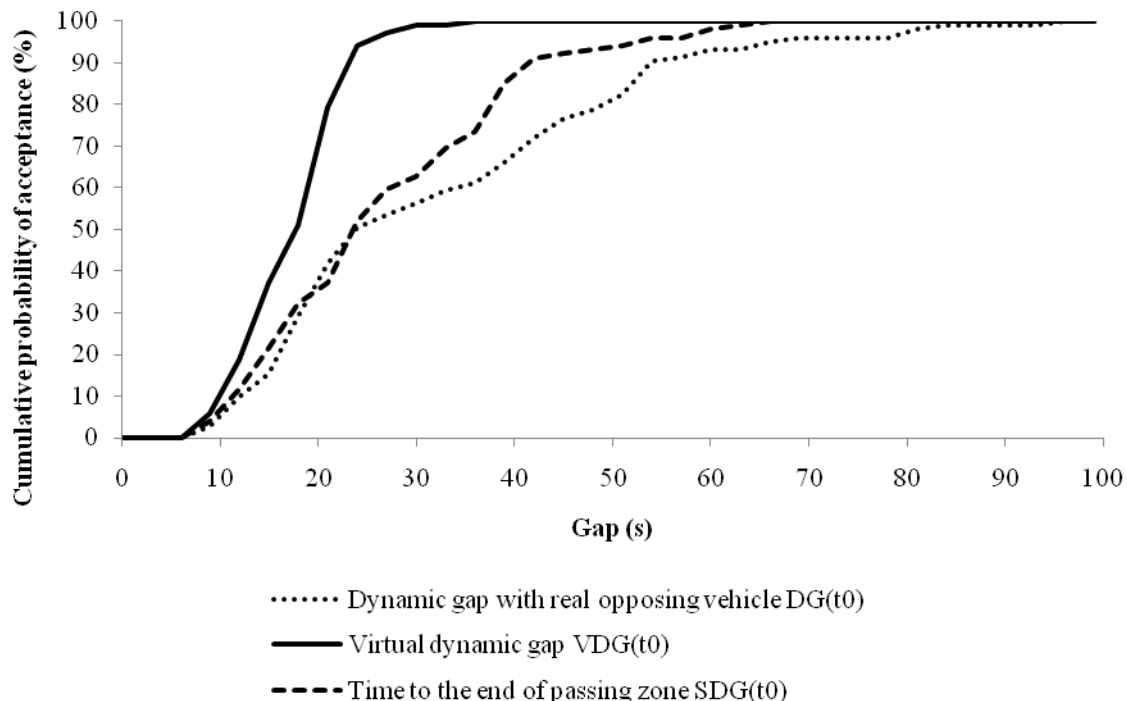


FIGURE 5 Comparison between different types of accepted gap.

In each case, the available dynamic passing gap was the minimum of the three possible gaps. In consequence, different distributions of accepted and rejected gaps were obtained if only the existence of opposing vehicle was considered, or if no-passing zones marking and sight distance limitations were included in the analysis.

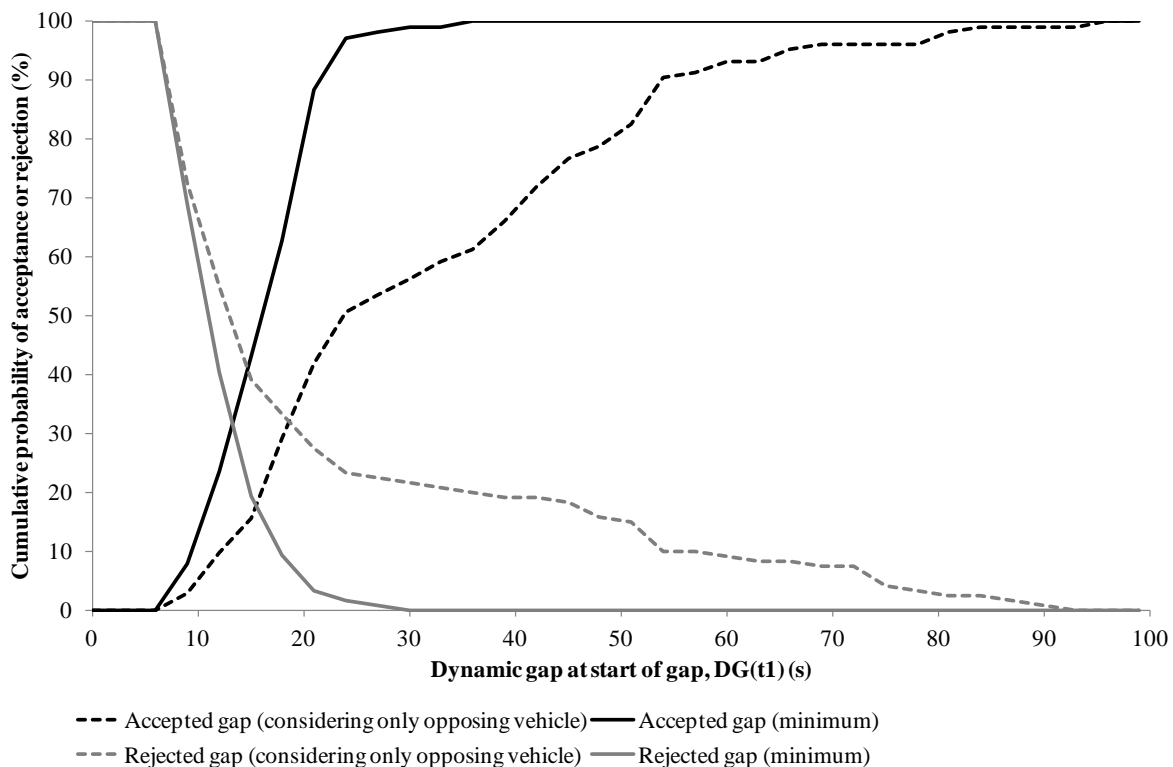
Figure 6 shows the cumulative probability functions of acceptance or rejection of dynamic gaps (measured at the start of the gap, t_0). Acceptance (or rejection) cumulative probability at point X was defined as the probability to accept (or reject) a gap under X.

1 Dashed lines represent dynamic gap distribution considering only the next opposing vehicle
 2 on left lane, even if it was outside the visible area. Solid lines show the modified distribution, when
 3 virtual dynamic gaps and times until the end of the passing zone were considered. It means that solid
 4 lines represent the new proposed distribution of dynamic gaps.

5 According to Figure 6, the consideration of marking of no-passing zones and virtual opposing
 6 vehicles introduced a significant change in accepted and rejected passing gap distributions. If a gap
 7 was longer than the available sight distance, it will be replaced by the shorter of the equivalent virtual
 8 dynamic gap or the time until the end of the passing zone.

9 Gaps which were accepted by 50% of drivers are 8 s lower if sight distance restrictions and
 10 marking of no-passing zones were considered. Accepted or rejected gaps longer than 30 seconds were
 11 not significant in those cases, because sight distance was limited and longer gaps cannot be observed
 12 by drivers when they were on the highway. Equivalent analysis using distance gaps changed the
 13 passing sight distance accepted for 50% of drivers from 730 m to 575 m.

14 Accepted Passing Sight Distance can be related to existing marking criteria (14). According to
 15 these criteria based on the posted speed limit, passing zones starts if the sight distance was over 395 m
 16 on the studied roads. It was found that only 22% of drivers have accepted a distance gap under that
 17 value.
 18



19
 20 **FIGURE 6 Passing gap acceptance and rejection cumulative distribution of frequency.**
 21

22 In addition to the represented passing acceptance and rejection functions, an evolution of
 23 dynamic gaps along completed passing maneuvers (also named time to collision) was analyzed. After
 24 the start of each accepted gap (t_0), times to collision at the start (t_1) and at the end (t_3) of the pass are
 25 represented in Figure 7.

26 Figure 7 shows the average behavior of the driver of a passing vehicle. White area is the time
 27 required to complete the maneuver. Light gray area shows the safety margin assumed by the driver,
 28 considering both real and virtual opposing vehicles, and the possibility of arriving to the end of the
 29 passing zone. This safety margin is the clearance time which will be measured after the distance
 30 travelled on the left lane and until the crossing with the opposing vehicle ($t_4 - t_3$) or the arriving at the
 31 end of the passing zone.

32 If sight distance limitation and road marking were not considered, the safety margin would be
 33 increased by the dark gray area, which includes the accepted gaps measured when only an opposing

1 vehicle was considered. Therefore, an extra safety margin, which cannot be ensured, is assumed
 2 because an opposing vehicle could appear from the limit of available sight distance at any time.
 3

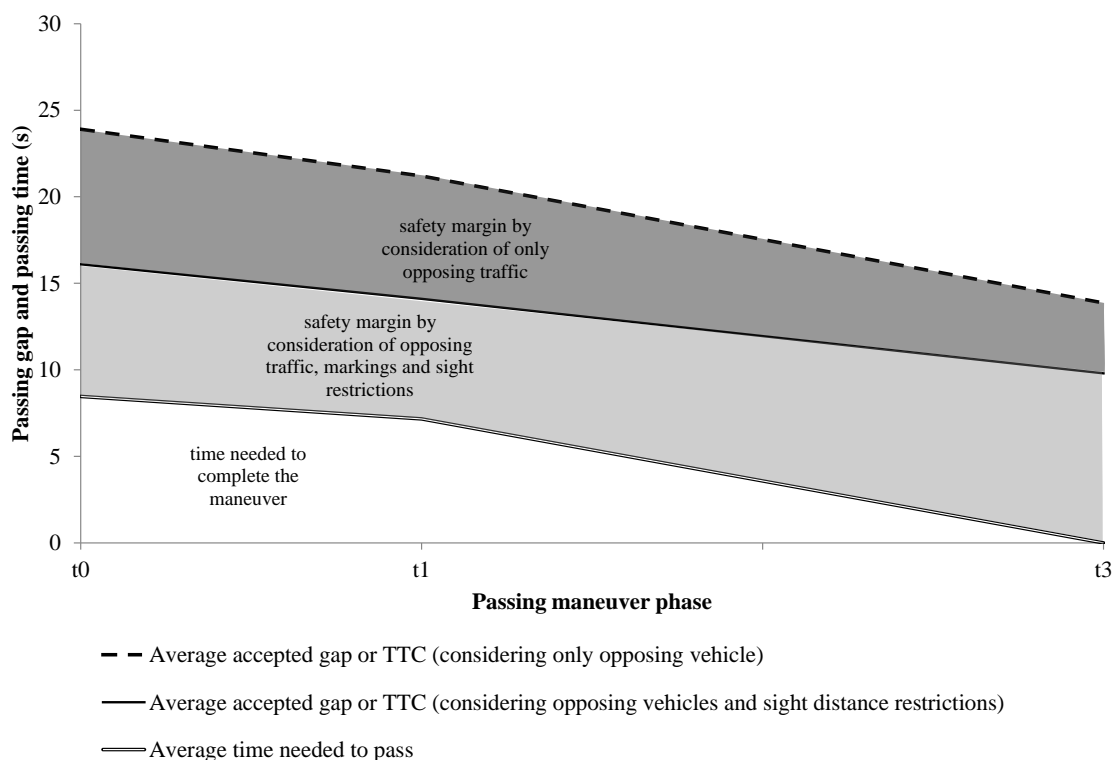


FIGURE 7 Evolution of dynamic gap along a single passing maneuver.

CONCLUSIONS AND FURTHER RESEARCH

Passing gap acceptance has been analyzed from a new approach. The presented methodology includes new factors to the study of passing process, in order to explain its actual conditions along two-way two-lane rural roads. The methodology was applied to observed field data of three different road segments.

A passing maneuver is affected only by opposing traffic if the passing zone is very long and there is no sight obstruction. But, in most cases, rural highways do not accomplish those conditions and other factors are affecting the passing process.

Design and marking criteria consider the effect of limited sight distance, in order to establish the location of no-passing zones. However, these criteria are not always based on an experimental observation of the process.

Some past studies about passing gap acceptance have only considered unlimited sight distance conditions and have presented an acceptance or rejection probability in order to calibrate a model of passing decisions or to estimate the critical gap. Moreover, those studies were usually based on driving simulators. The proposed approach is applied to collected data from existing rural highways.

The results have shown how probability distribution changes if the real conditions of highways are considered. Longer accepted gaps can be measured but they cannot be observed by the drivers which want to pass. Consequently, these longer gaps are replaced by its corresponding virtual gaps, if a vehicle appears from the limit of available sight distance at any time. In addition to a possible appearance of an opposing vehicle, the sign which indicates the end of a passing zone has an influence on the passing decision. Drivers could not accept a gap if a no-passing sign is visible and it is not enough distance to complete the maneuver. With these considerations, a passing gap which is accepted by 50% of drivers decreases from 24 to 16 s. Higher differences were found between gaps over the 50% of probability of acceptance.

1 The new proposed gap acceptance distribution affects the calculation of critical gaps, which
2 are used commonly to study the traffic operational characteristics of highways. By taking into account
3 the actual conditions of the road, the critical gap is reduced significantly.

4 On the other hand, if sight conditions are not included in the analysis, unrealistic safety
5 margins would be considered in maneuvers completed without the presence of a visible opposing
6 vehicle. Time to Collision (or dynamic gap) can be computed also on those maneuvers, which may be
7 potentially unsafe.

8 Moreover, against PSD models typically used as design and marking criteria, this approach
9 considers a real or estimated (from actual data) speed of opposing vehicles, which is usually different
10 from design speed or posted speed limits.

11 The purpose of the paper was the establishment of a methodology. In consequence, results are
12 not ready to be directly applied to review or formulate new design or marking criteria. Sample size
13 will be in further work significantly increased. This would allow calculating and analyzing the
14 influence of different factors, such as age and gender of the driver of passing vehicle, or time spent
15 following before the passing maneuver is performed.

16 **ACKNOWLEDGEMENTS**

17 Authors would like to thank Spanish Ministry of Science and Innovation that subsidizes the research
18 project with reference code TRA2010-21736.

19 **REFERENCES**

- 20 1. American Association of State Highway and Transportation Officials, *A Policy on Geometric*
21 *Design of Highways and Streets*, Fifth Edition, Washington, DC, 2004.
- 22 2. Van Valkenburg, G. W., and H. L. Michael. Criteria for No- Passing Zones. *Highway*
23 *Research Record*, 377, HRB, National Research Council, Washington, DC, 1971, pp. 1–19.
- 24 3. Glennon, J. C. New and Improved Model of Passing Sight Distance on Two-Lane Highways.
25 *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Record*, 1195,
26 Transportation Research Board, 1988, pp. 59–69.
- 27 4. Hassan, Y., A. El Halim and S. Easa, Passing sight distance on two-lane highways: review
28 and revision, *Transportation Research. Part A*, No. 30, No. 6, 1996, pp. 453-467.
- 29 5. Farah, H. and T. Toledo. Passing Behaviour on two-lane highways. *Transportation Research*
30 *Part F* 13, 2010, pp. 355-364
- 31 6. Farah, H., A. Beckhor and A. Polus., Risk evaluation by modeling of passing behavior on
32 two-lane rural highways, *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 41, 2009, pp. 887-894.
- 33 7. Pollatschek, M. A., and A. Polus, A. Modeling Impatience of Drivers in Passing Maneuvers.
34 Presented at 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Maryland,
35 2005.
- 36 8. Toledo, T. and H. Farah. Alternative Definition of Passing Critical Gaps. Presented at 90th
37 Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C. , 2011.
- 38 9. Polus, A., M. Livneh and B. Frischer, Evaluation of the passing process on two-lane rural
39 highways, *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Record*, No.
40 1701, Transportation Research Board, 2000, pp. 53.
- 41 10. Harwood, D. W., D. Gilmore and K. Richard, Passing Sight Distance Criteria for Roadway
42 Design and Marking, Presented at 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board,
43 2010.
- 44 11. Llorca, C and A. García. Evaluation of Passing Process on Two-lane Rural Roads in Spain
45 using a New Methodology Based on Video Data. *Transportation Research Record: Journal*
46 *of the Transportation Research Board*, 2011.
- 47 12. Carlson, P. J., J. D. Miles and P. K Johnson, Daytime High Speed Passing Maneuvers
48 observed on Rural Two-Lane, Two-Way Highway: Findings and Implications, *Transportation*
49 *Research Record: Journal of Transportation Research Board*, No. 1961, Transportation
50 Research Board, 2006, pp. 9.
- 51 13. Hegeman, G, A. Tapani, and S. Hoogendoorn. Overtaking assistant assessment using traffic
52 simulation. *Transportation Research. Part C*, No. 17, 2009, pp. 617-630.
- 53 14. Ministry of Public Works, Spain, Instrucción de Carreteras 8.2 IC "Marcas viales", 1987.
- 54
- 55

- 1 15. Federal Highway Administration. Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and
2 Highways, 2003.
- 3 16. Bar-Gera, H., and D. Shinar. The tendency of drivers to pass other vehicles. *Transportation*
4 *research. Part E, Logistics and transportation*, No. 6, 2005, p. 429.
- 5 17. Jenkins, J.M and Rillet, L.R. Application of Distributed Traffic Simulation for Passing
6 Behavior Study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research*
7 *Board*, No. 1899, Transportation Research Board, 2004, pp. 11–18.
- 8 18. Romero, M. and A. García, Deceleration Lane Length Evaluation Based on a New Conflict
9 Indicator. Presented at 4th International Symposium on Highway Geometric Design, Valencia,
10 Spain, 2010.
- 11 19. Pérez, A., A. García, F. Camacho, and P. D'Attoma. Use of GPS data to model operating
12 speed and deceleration on two-lane rural roads. *Transportation Research Record: Journal of*
13 *the Transportation Research Board*, No. 2171, Transportation Research Board, 2010.

3. Llorca, C., García, A., Moreno, A.T., Pérez-Zuriaga, A.M., 2013. Influence of age, gender and delay on overtaking dynamics. IET Intelligent Transport Systems 7, 174–181. doi:10.1049/iet-its.2012.0147.

THE INFLUENCE OF AGE, GENDER AND DELAY ON OVERTAKING DYNAMICS

Carlos Llorca, Ph.D. Candidate, carlloga@cam.upv.es

Alfredo García, Professor, agarciag@tra.upv.es

Ana Tsui Moreno, Ph.D. Candidate, anmoch@cam.upv.es

Ana María Pérez-Zuriaga, Ph.D., anpezu@tra.upv.es

Highway Engineering Research Group, Universitat Politècnica de València

Camino de Vera s/n, 46022 Valencia – Spain

ABSTRACT

Overtaking is one of the most dangerous manoeuvres on two-lane rural highways. The most influential factors are related to drivers, so ITS and assistance systems are not yet common. This research is based on experimental data of overtaking manoeuvres collected using an instrumented passenger car, equipped with four cameras, laser rangefinders and a GPS tracker. This vehicle was driven along four different road segments in the surroundings of Valencia (Spain) at a speed slightly slower than the operating speed of each segment. Overtaking time and speeds were measured. Unlike previous work, the influence of human factor was also considered. Age and gender of overtaking driver, as well as time spent following were used to characterize this influence. More than 200 manoeuvres were recorded and the influence of driver characteristics and delay on gap acceptance, manoeuvre duration and speed differences have been analysed. Results show differences in behaviour between age and gender groups, since young male overtaking drivers have shown a more aggressive behaviour. Overtaking times were around 1 s lower than other drivers, while average speed difference was 4 km/h higher. Collected data and their analysis have provided a basis to review design criteria and to develop future assistance systems.

1. INTRODUCTION AND BACKGROUND

Overtaking manoeuvres improve the level of service of two-lane rural highways. To pass a slower vehicle, it is necessary to occupy the lane reserved to opposing traffic. Therefore, overtaking is one of the most dangerous manoeuvres on two-lane rural highways. Severity of accidents related to overtaking manoeuvre is significantly higher than other accident types [1].

Human factor is highly important in this manoeuvre, since it involves several complex decision processes. Drivers decide to overtake depending on which difference between their desired speed and the speed of leading vehicles would accept. Before starting the manoeuvre, a driver must check whether there is enough distance until the next opposing vehicle to safely complete the pass. Therefore, human factor influence is very strong [2]. Decisions to overtake are based on driver's style, driver's behaviour or preferences. It determines driver's impatience, perception of opposing vehicle speeds, or characteristics of overtaking and overtaken vehicle.

Existing geometric design and marking criteria define overtaking sight distance (OSD) as the distance needed to overtake a slower vehicle when an opposing vehicle is approaching. OSD estimations were based in different theoretical models [3, 4] which define the movement of the three vehicles involved in the manoeuvre: the overtaking vehicle (faster); the overtaken vehicle (slower); and the opposing vehicle. Usually, their trajectories were calculated using deterministic formulations.

However, many field studies showed a high dispersion in their results [5,6,7]. Those authors recorded overtaking manoeuvres. Trajectories and speeds of vehicles involved in overtaking manoeuvres were measured, but variables related to human factor were not usually considered, despite their potential influence on the overtaking process. Driving simulator based studies have confirmed its influence. Specifically, Farah [2]

found that some overtaking variables, like overtaking time on left lane, varied between different age and gender groups. However, driving simulator was not validated with field data. It should be necessary, because risk perception could be different and screen resolution could modify the visibility of far vehicles.

Impatience of drivers in overtaking manoeuvres was also considered [8], using macroscopic data of traffic flow and a microsimulation model. It was concluded that longer delays made drivers to accept shorter overtaking gaps, although individual behaviour couldn't be analysed.

The complexity of this manoeuvre could explain why overtaking assistance systems are less developed than in other manoeuvres, such as lane changing or speed adaptation. Löwenau et al. [9] suggested a system to warn drivers where overtaking is not recommended, according to map data and previous driving behaviour. The system would provide information to drivers on a head up display, indicating sections where overtaking is recommended or should be avoided. However, only geometry of highways was considered and traffic conditions were omitted.

Hegeman et al. [10] designed different systems, but they were only tested using a microsimulation model. In this case, drivers would be provided with information about size of overtaking gaps in opposing traffic flow. Then, drivers would accept or reject that overtaking gap with help of this information. No technical development is presented, although threshold values and influence of percentage of users in a road are discussed from both safety and operational points of view.

An alternative design was considered by El Khoury [11]. In this case, a warning system located at a road segment where overtaking is forbidden was simulated, in order to avoid violations of road marking. Safety benefits were considered, although driver's overtaking behaviour is not considered itself.

Although overtaking manoeuvre has been deeply studied, there is a variety of methodologies and results. As a result, existing design and marking criteria are not uniform among countries, and in most cases, they are based only in analytical formulation of the manoeuvre [12, 13]. Besides, there is a lack of observational data to study the influence of human factors on this manoeuvre.

2. OBJECTIVES AND HYPOTHESES

The main objectives of this research are, firstly, to develop a new methodology to study overtaking manoeuvres based on an instrumented vehicle, and secondly, to collect a sample of observed manoeuvres to characterize the effect of different human related factors.

The analysis was supported by several hypotheses. On one hand, driver's age and gender is thought to be a factor of overtaking decisions. Young drivers could overtake faster, accepting smaller overtaking gaps, and driving at higher speeds. It would be caused by their lower risk perception and shorter reaction times.

On the other hand, impatience could be the cause of a risky behaviour. Longer delays would made drivers perform overtaking manoeuvres accepting smaller gaps with lower safety margins.

3. METHODOLOGY

The proposed methodology is based on a new versatile instrumented vehicle, developed by the Highway Engineering Research Group of the Universitat Politècnica de València (Spain). The new instrumented vehicle was driven along two-lane rural highway segments at constant speeds, lower than the operating speed, in order to be overtaken by other drivers [14].

Previously, only few studies used an instrumented vehicle to study overtaking manoeuvres, considering only dynamic variables, such as trajectories and speeds [6]. With the new data collection system, the number of observed variables was increased. Human factor related variables were considered: age and gender of drivers of overtaking vehicles and their gap acceptance behaviour along the entire following process, and not only in single overtaking zones.

3.1. INSTRUMENTED VEHICLE DESIGN

Data collected using the new vehicle is a combination of video data, distances to other vehicles and positioning data (Figure 1). Video data is provided by four small digital cameras, which are installed inside the car. They cover the rear, left and front areas. Therefore, the whole trajectory of every overtaking vehicle is observed (Figure 2).

Relative distances between overtaking vehicle and the instrumented vehicle before and after performing an overtaking manoeuvre are collected by two laser rangefinders installed on rear and front bumpers. Position of the instrumented vehicle is registered by a 10 Hz GPS tracker.

As size of equipment is very small, it was not visible by other drivers. In fact, no unexpected or evasive actions were observed during the experiments.

Additional information, such as characteristics of overtaking vehicles, number of passengers and gender of overtaking drivers was registered by the co-driver of the instrumented vehicle. Age of overtaking driver was also estimated (in 5 years intervals) and written down during each manoeuvre by the co-driver. These additional variables are an improvement of existing previous methodologies, in order to get more detailed data of the phenomenon.

3.2. SITE SELECTION

The instrumented vehicle was driven along four highway segments. They were located in the surroundings of Valencia (Spain) and had the same posted speed limit (100 km/h) and cross section, as well as similar traffic volume. Each segment had different design speed, ranging from 80 to 120 km/h. 41 overtaking zones, marked with centre dash line, were located in those segments. A summary of characteristics of road segments is presented in Table 1.

The instrumented vehicle circulated at constant speed, slower than the segment operating speed, based on previous data [15]. In that study, overtaking manoeuvres were observed from a fixed point of view outside the road. Speeds of each overtaken vehicle were measured, among other variables. Then, the speed of the instrumented vehicle was fixed at different levels for each location based on the speed of overtaken vehicles (Table 1). Some locations show a high variability, so two different speed levels were chosen.

Highway	(1) CV-35	(2) CV-50i	(3) CV-50ii	(4) N-225
Length of section (km)	10.0	1.5	6.0	15.0
Design speed (km/h)	120	80	90	100
Traffic volume range (vph)		250 – 350		
Number of overtaking zones (m)	10	2	12	17
Cross section	3,5-m-wide lanes and 1,5-m-wide paved shoulders			
Speed of overtaken vehicle (km/h)	80 and 90	50 and 60	60 and 70	80
Number of manoeuvres	42	56	54	62
Number of analysed manoeuvres	25	27	23	29
Duration of observation (h)	4	4	4	6

Table 1. Site selection

3.3. DATA REDUCTION

Using this methodology, a total of 214 manoeuvres were observed, with an average frequency of 11 manoeuvres per hour. However, 66 of them were not considered since

the overtaking vehicle was a truck, there was more than one overtaking and/or overtaken vehicle, or data about overtaking driver missed. As a result, every analysed manoeuvre involved only one passenger car or van overtaking the instrumented passenger car. No aborted manoeuvres were observed during data collection.

The study is limited to those drivers which finally decided to pass, since only the dynamic of completed manoeuvres is analysed. However, there were a number of drivers which decide to follow the instrumented vehicle without overtake. There could be many different motivations that make drivers decide not to overtake, such as a conservative behaviour or the proximity of their final destination. Therefore, naturalistic observations like the present study are not sufficient to evaluate the overtaking desire.

During field study, time of each overtaking manoeuvre and characteristics of overtaking driver and overtaking vehicle were collected by the co-driver. After that, data reduction began with the identification of the starting point and the ending point of each manoeuvre, as well as every accepted or rejected gap during the entire following process.

Overtaking gaps were calculated as the difference between starting time of an overtaking opportunity (either starting an overtaking zone or crossing with an opposing vehicle) and crossing time between overtaking and opposing vehicles (Figure 3a). This was valid only for overtaking manoeuvres limited by the presence of opposing vehicles. Otherwise (Figure 3b), overtaking gaps were calculated taking into account the available sight distance at the starting point of the manoeuvre (point A), according to a previous work [14]. From point B, an opposing vehicle could appear at any time. So, overtaking gaps considered that a virtual opposing vehicle appeared from point B and its speed was equal to the design speed.

For each manoeuvre, distance between the instrumented vehicle and the overtaking vehicle was obtained from laser rangefinder data and position of instrumented vehicle

was provided from GPS tracker. After that, speed of overtaking vehicle was calculated. Delay was estimated as the difference between the time spent following and the time travelling at design speed along the same distance.

The most representative variables are shown in Figure 4. In order to carry out a statistical analysis, a limited number of variables have been selected.

Selected dependent variables were:

- Accepted gap (Gap, $t_3 - t_0$). It evaluates driver's decision considering his or her estimation of required time to overtake with safety. Once a gap is accepted, it can be also considered as a factor, due to its influence in the following dependent variables.
- Overtaking time ($t_2 - t_1$). It measures the left lane occupation time.
- Average speeds difference (dV). It measures the speed of overtaking vehicle.
- Following distance at starting point of the overtaking (h_1). It could be an estimation of impatience.

Following independent factors and their correspondent levels have been considered:

- Age of overtaking driver: two groups have been considered, based on previous research [2]: young drivers (under 30 years old) and old drivers (over 30 years old)
- Gender of overtaking driver: male or female.
- Starting mode: categorical variable describing how the manoeuvre is started.

There are two groups:

- Flying: overtaking vehicle doesn't reduce its speed before overtaking.
- Accelerative: overtaking vehicle reduce its speed before overtaking, and must accelerate during the manoeuvre.

- Delay (s): continuous variable associated to each accelerative manoeuvre.
(Delay equal to zero for flying passes).

Other conditions during data collection were: daytime, good weather and traffic volume around 250 vph. The effect of those other variables was not analysed.

4. ANALYSIS

A statistical analysis was carried out to study the influence of different variables on overtaking manoeuvres, in order to analyse the effect of human factor. After that, the results were compared to previous research.

4.1. AGE AND GENDER EFFECT

To analyse the influence of age and gender, a multifactor ANOVA was carried out for each dependent variable. The factors included in this analysis were: age, gender, the interaction of age and gender and starting mode (flying or accelerative). Normality of each dependent variable was checked before carrying out the analysis, using normal probability plots and Chi-square tests. Results of the analysis are presented in Table 2.

Factor	Variable			
	Gap (s) F-ratio	t2-t1 (s) F-ratio	dV (km/h) F-ratio	h1 (m) F-ratio
Age	0.55	0.14	0.81	0.85
Gender	0.26	1.17	1.90	1.60
Age x Gender	0.76	4.23*	4.27*	0.16
Starting (0= accelerative, 1=flying)	6.82**	4.11*	24.66**	8.85**

*significant at the 0.05 level, **significant at the 0.01 level

Table 2. ANOVA of age, gender and starting mode

Gap, overtaking time, speed difference as well as following distance depend on the starting mode. This effect was significant in all independent variables. Differences on values of each variable are shown in Table 3. Flying manoeuvres represent a different behaviour: accepted gap was 4 s smaller, overtaking time was 1.1 s lower, speed difference was 9 km/h higher and following distance was 5 m longer.

Level of factor starting mode	Count	Variable							
		Gap (s)		t2-t1 (s)		dV (km/h)		h1 (m)	
		Adjusted Mean	SE	Adjusted Mean	SE	Adjusted Mean	SE	Adjusted Mean	SE
flying	15	10.4	1.45	6.4	0.51	30.0	1.74	14.3	1.55
accelerative	133	14.3	0.63	7.5	0.22	21.1	0.76	9.5	0.66

SE: standard error

Table 3. Table of means by flying/accelerative manoeuvre

On the other hand, differences on independent variables caused by age and gender are shown in Table 4. Either the effect of age or gender was not significant, but interaction of them was significant at the 0.05 level in overtaking time t2-t1 and speed difference dV. This interaction influence is also shown in Figure 5.

Level of factor age x gender	Count	Variable							
		Gap (s)		t2-t1 (s)		dV (km/h)		h1 (m)	
		Adjusted Mean	SE	Adjusted Mean	SE	Adjusted Mean	SE	Adjusted Mean	SE
Male:									
Young	23	12.6	1.31	<u>6.2</u>	<u>0.46</u>	<u>28.7</u>	<u>1.58</u>	13.5	1.39
Old	94	12.7	0.84	<u>7.2</u>	<u>0.30</u>	<u>24.4</u>	<u>1.02</u>	11.8	0.91
Female:									
Young	16	13.0	1.52	7.5	0.50	23.7	1.69	11.4	1.52
Old	15	11.1	1.56	6.8	0.55	25.4	1.96	10.8	1.67

SE: standard error; statistically significant effects underlined

Table 4. Table of means by age/gender

According to the ANOVA results for age and gender effects, only the interaction was statistically significant. Interaction plots show that differences between young and old drivers are significant only for male drivers. Young male drivers overtake 1 s faster than older ones, with a 4 km/h higher speed difference. Female drivers did not show these difference.

4.2. DELAY EFFECT

On the other hand, effect of delay suffered by overtaking driver on overtaking time has been analysed using a multiple linear regression model. Only accelerative manoeuvres were considered, since flying passes don't have any delay.

Table 5 show the results of the regression model for the dependent variable overtaking time (t_2-t_1). Only statistically significant variables at the 0.05 level were included in the model. R-squared of the model was 50.5%.

Parameter	Estimate	Standard Error	t-Statistic	p-Value
CONSTANT (s)	10,53	0,60	17,44	0,0000
dV (km/h)	-0,21	0,02	-9,42	0,0000
Age (young = 0, old = 1)	-1,13	0,45	-2,52	0,0129
Delay (s)	-0,04	0,02	-2,04	0,0432
Age*Delay (s)	0,07	0,02	2,74	0,0071
h1 (m)	0,23	0,03	8,73	0,0000

p-values under 0.05 correspond to statistically significant factors

Table 4. Multiple linear regression model for overtaking time (t_2-t_1)

According to Table 5, overtaking time was affected by speed difference and following distance at the starting time of the manoeuvre. This is explained by dynamics of the overtaking vehicle trajectory. In addition to this, influence of age and delay, as well as its interaction, was significant. Equation 1 is the equation of the model for young drivers (Age equal to 0) and equation 2 for old drivers (Age equal to 1). It shows that delay coefficient is negative for young drivers (the longer the delay the shorter the overtaking time, with an increasing rate of 1 second each 25 seconds delay). Old drivers presented the opposite behaviour: the longer the delay the longer the overtaking time. Gender influence was not significant for the overtaking time regression model.

$$\text{Overtaking time (young drivers)} = 10.531 - 0.209 dV - 0.039 \text{ Delay} + 0.228 h1 \quad (1)$$

$$\text{Overtaking time (old drivers)} = 9.403 - 0.209 dV + 0.028 \text{ Delay} + 0.228 h1 \quad (2)$$

The effect of delay was not significant for the other previously considered dependent variables, such as accepted gap, speed difference or following distance.

5. DISCUSSION

Results of present study have been compared with previous research.

Instrumented vehicle data has been also obtained by Carlson et al [6]. This research was carried out on a two-lane rural highway where overtaking was allowed along 75 per cent of road length. Researchers drove an instrumented passenger car at 88, 96 and 104 km/h in order to be passed by other drivers. 105 overtaking manoeuvres were analysed. Overtaking time and overtaking vehicle speed were calculated for each manoeuvre. Results are compared to present study.

Figure 6 shows overtaking times as a function of overtaken vehicle speed. In both studies, 15th, 50th and 85th percentiles are plotted. For overtaken vehicle speeds between 80 and 90 km/h (registered in both studies) overtaking times of present study were more than 1.5 s under times measured by Carlson et al. Average speed differential measured by Carlson et al. was 19 km/h and in present study, 21 km/h.

However, neither overtaking gaps nor overtaking driver characteristics were measured by Carlson et al. [6].

Farah [2] considered human factor variables in a driving simulator experiment. Its results have been compared to present study, although methodology and highway geometry were different. Farah analysed the influence of age and gender of 100 Israeli drivers (69 male and 31 female, 54 young and 46 old) on overtaking decisions.

Age	Gender	Overtaking time (s)			
		Present study		Farah [2]	
		Observed mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
Young	Male	6.2	3.57	6.9	0.53
	Female	7.5	3.58	7.1	1.56
Old	Male	7.2	3.48	7.3	0.68
	Female	6.8	3.75	8.9	3.04

Table 5. Comparison with previous research (Farah, [2])

Differences shown in Table 5 are equivalent to present study, since young male drivers overtook in less time than old and female. Differences between groups in driving simulator data are higher, while dispersion of overtaking times is lower.

In addition to this, shorter following distances were measured for younger age groups, in accordance with the present study. No influence of delay and impatience was studied.

Finally, the results have been compared to a previous study [10], which proposed different thresholds for overtaking assistant systems. This work discussed values for an assistant system threshold between 8 s and 14 s. This threshold would be the minimum acceptable gap to perform an overtaking manoeuvre with safety.

A threshold of 8 s corresponded to the 20th percentile of accepted gaps, while a threshold of 14 s corresponded to the 60th percentile (Figure 7). It means that 20% or 60% of overtaking manoeuvres were under the threshold of the proposed assistance system, and consequently not recommended by it.

6. CONCLUSIONS

Overtaking is one of the most complex manoeuvres on two-lane rural highway. It involves several decision processes and it is affected by highway, driver, vehicle, traffic and environment. This causes a high variability of situations and requires observational data, since neither analytical formulations nor driving simulation could explain accurately the phenomenon.

This work has developed an experimental methodology, which can be used to analyse in detail the overtaking manoeuvre based on an instrumented vehicle. This is a versatile methodology, since it can be adapted to different vehicles and can be used anywhere. The number of variables and accuracy is higher than previous techniques, thanks to the use of four video cameras, laser rangefinders, and observations made by the co-driver.

An average of approximately 11 manoeuvres per hour can be recorded when the vehicle is driven along two-way rural roads of traffic volumes around 250 vph. For this work a field study was carried out to record 214 manoeuvres.

Data of these manoeuvres has been analysed to characterize the influence of human factor related variables. The effect of age and gender was considered, dividing the sample into different groups. Young and old male drivers showed a different behaviour, characterized by their overtaking time (young drivers 1 second shorter) and their speed difference (young drivers 4 km/h faster).

Flying overtaking manoeuvres, with delay equal to zero were characterized by 1.1 s shorter overtaking times and 9 km/h higher speed differences. Following distance was 5 m longer too.

The effect of delay was considered in order to test if impatience of drivers could affect their behaviour. This effect has been observed in young drivers, who tend to overtake faster if the delay was higher. On the other hand, older drivers passed slower when they had suffered longer delays.

The results were compared with previous research. Overtaking data collected with other instrumented vehicle showed differences in measurements of left lane occupation time. In present study, overtaking times were shorter. Consequently, a high variability of overtaking variables should be expected if highway, drivers or environment varies. A driving simulator study found similar effects of age and gender of overtaking driver on overtaking times. Young male driver's group showed also the most aggressive behaviour. Lastly, a recent proposal of overtaking assistant system was compared with recorded data. Observed behaviour must be an additional criterion to design and calibrate those systems. Higher values of the gap thresholds would provide a very conservative assistance to drivers, which probably affected traffic operation. Lower values could be dangerous for those drivers which only accept larger gaps. Further

work will be necessary to extend the sample size, including the study of overtaking manoeuvres with an instrumented heavy vehicle and under different traffic volumes.

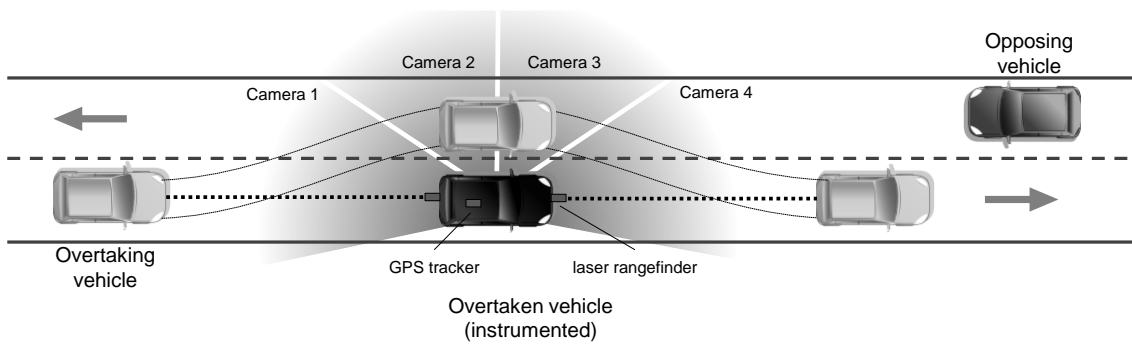
7. ACKNOWLEDGMENTS

Authors would like to thank Spanish Ministry of Economy and Competitiveness that subsidizes the research project with reference code TRA2010-21736. Authors thank also Spanish General Traffic Directorate, Spanish Ministry of Public Works and Valencia Regional Governance for their collaboration during field study.

8. REFERENCES

1. Molinero Martinez A., Carter E., Naing C., Simon M.C. and Hermitte T.: 'Part 1. Overview and general statistics, Accident causation and pre-accidental driving situations', (TRACE - Traffic Accident Causation in Europe internal report Report, 2008).
2. Farah, H.: 'Age and gender differences in overtaking manoeuvres on two-lane rural highways' *Transportation Research Record*, 2011, 2248, pp. 30-37
3. Hassan, Y. and Easa, S.: 'Passing sight distance on two-lane highways: Review and revision'. *Transportation research. Part A, Policy and practice*, 1996, 30, (6), pp. 453-467.
4. Wang, Y. and Cartmell, M.: 'New Model for Passing Sight Distance on Two-Lane Highways', *Journal of Transportation Engineering*, 1998, 124, p. 536
5. Polus, A., M. Livneh, and Frischer, B.: 'Evaluation of the passing process on two-lane rural highways', *Transportation Research Record*, 2000, 1701, (1), p. 53.
6. Carlson, P. J., Miles J. D., and Johnson, P.K.: 'Daytime High Speed Passing Manoeuvres observed on Rural Two-Lane, Two-Way Highway: Findings and Implications'. *Transportation Research Record*, 2006, 1961, p. 9.
7. Harwood, D. W., D. Gilmore and K. Richard, 'Passing Sight Distance Criteria for Roadway Design and Marking', Presented at 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., US, 2010.
8. Pollatschek, M. A., and Polus, A. 'Modeling Impatience of Drivers in Passing Manoeuvres', 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Maryland, US, 2005.
9. Loewenau, J., Gresser, K., and Wisselman, D: 'Dynamic Pass Prediction – A New Driver Assistance System for Superior and Safe Overtaking' in Waldorf, J.

- and Jessner, W. (Eds) 'Advanced Microsystems for Automotive Applications' (Springer, 2006) p. 67.
10. Hegeman, G., Tapani, A., and Hoogendoorn, S.: 'Overtaking assistant assessment using traffic simulation', *Transportation Research. Part C*, 2009, 17, pp. 617-630.
 11. El Zarif, J., Hobeika, A., and Rakha, H.: 'Evaluating a Detection and Warning System to Determine No-Passing Zone Violations', *Journal of Transportation Engineering*, 2003, 129, pp. 590-599.
 12. American Association of State Highway and Transportation Officials: '*A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, 6th Edition', Washington D.C., US, 2011.
 13. Spanish Ministry of Public Works: 'Instrucción de Carreteras 8.2 IC, Marcas viales', 1987.
 14. Llorca, C., García, A., Pérez, A.M. and Moreno, A.T.: 'New Experimental Approach for Passing Gap Acceptance', *Transportation Research Board 91st Annual Meeting*, Washington D.C., US, January 2012.
 15. Llorca C. and Garcia, A.: 'Evaluation of passing process on Two-Lane Rural Highways in Spain Using a New Methodology Based on Video Data', *Transportation Research Record*, 2011, 2262, pp. 42-51.



GPS tracker



camera



laser rangefinder

Figure 1. Field study design



Camera 1: rear view, overtaking start



Camera 2: rear left view

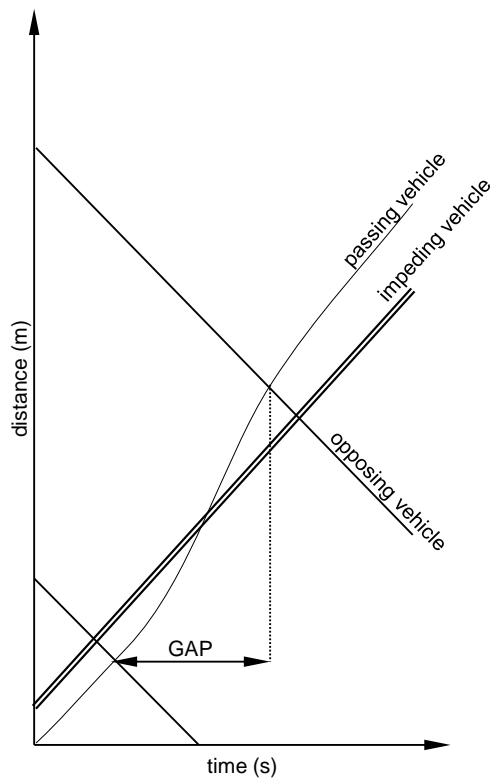


Camera 3: front left view

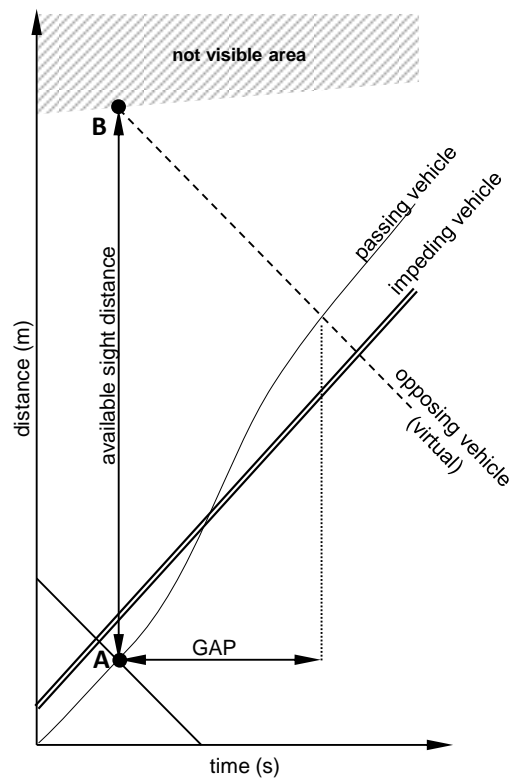


Camera 4: front view, overtaking end

Figure 2. Instrumented vehicle recorded images



(a) Opposing vehicle limited overtaking



(b) Sight distance limited overtaking

Figure 3. Calculation of overtaking gaps

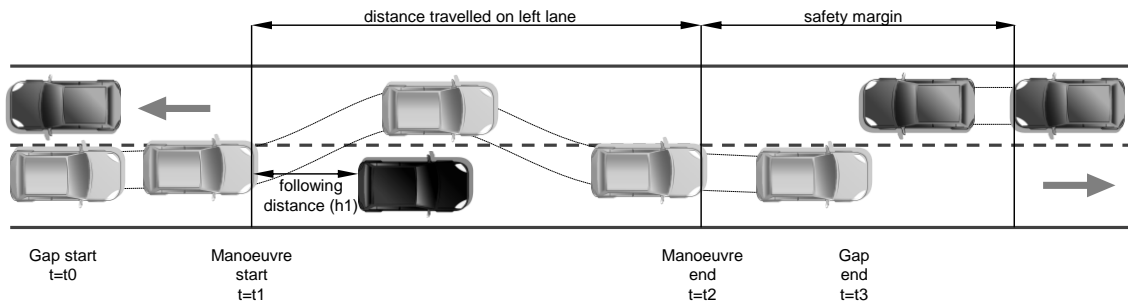


Figure 4. Overtaking manoeuvre variables

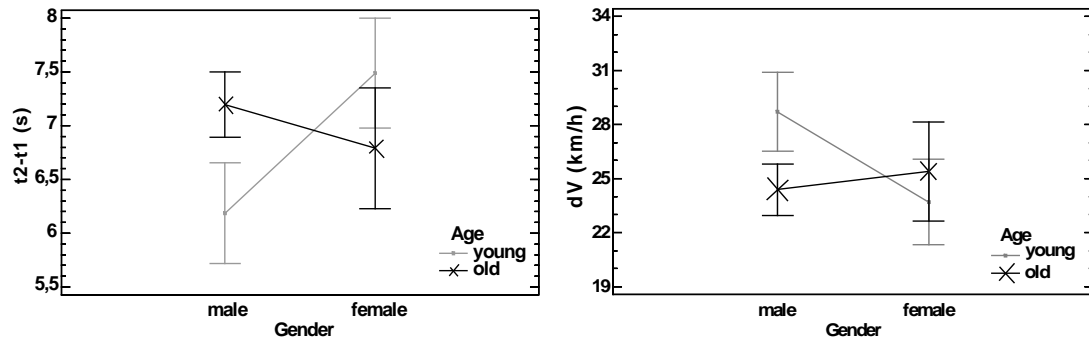


Figure 5. Interaction plot for overtaking time (t2-t1) and speed difference (dV)

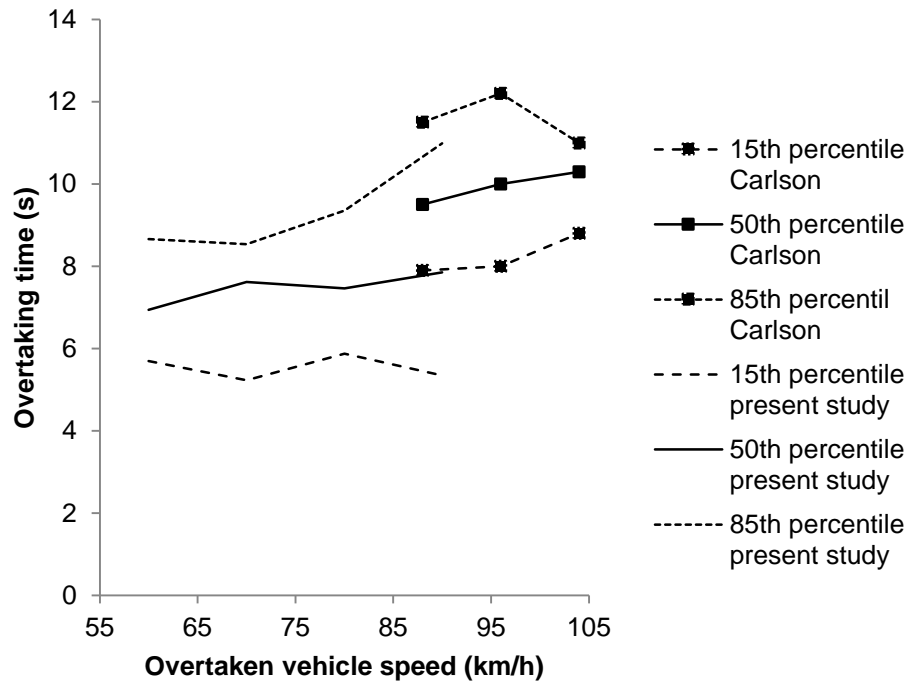


Figure 6. Comparison with previous research (Carlson et al. [6])

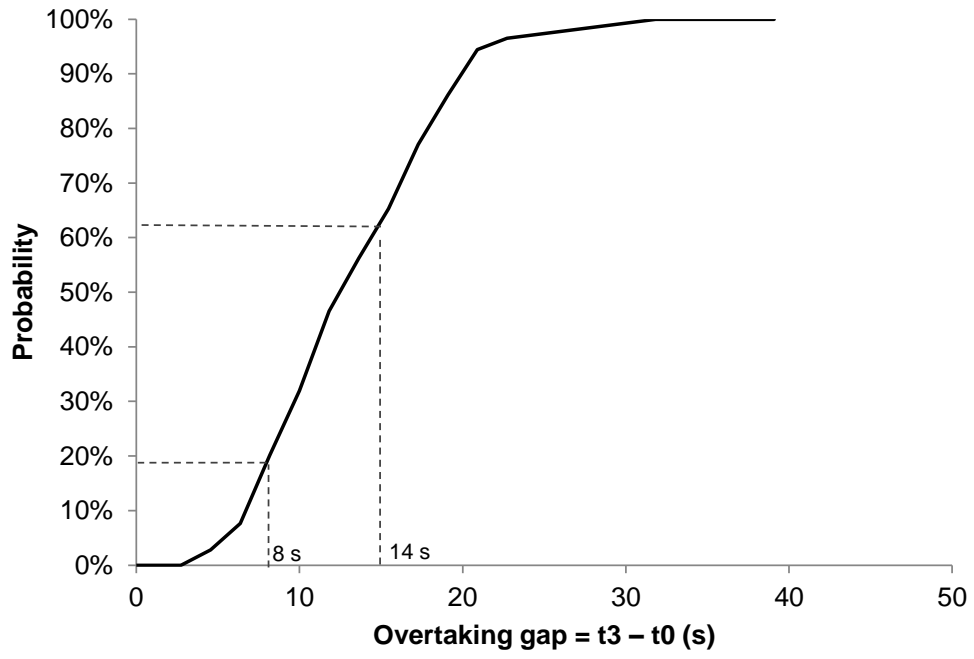


Figure 7. Comparison with previous research (Hegeman et al. [10])

4. Llorca, C., Moreno, A.T., García, A., Pérez-Zuriaga, A.M., 2013. Daytime and Nighttime Passing Maneuvers on a Two-Lane Rural Road in Spain. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2358, 3–11. doi:10.3141/2358-01.

1 **OBSERVATIONS OF DAYTIME AND NIGHTTIME PASSING MANEUVERS ON A TWO-**
2 **LANE RURAL ROAD IN SPAIN**

3
4 Corresponding Author:

5 **Carlos Llorca**

6 Ph.D. Candidate

7 Highway Engineering Research Group

8 Universitat Politècnica de València

9 Camino de Vera, s/n. 46022 – Valencia. Spain

10 Tel: (34) 96 3877374

11 Fax: (34) 96 3877379

12 E-mail: carlloga@cam.upv.es

13
14 Other Authors:

15 **Ana Tsui Moreno**

16 Ph.D. Candidate

17 Highway Engineering Research Group, Universitat Politècnica de València

18 Camino de Vera, s/n. 46022 – Valencia. Spain

19 Tel: (34) 96 3877374

20 Fax: (34) 96 3877379

21 E-mail: anmoch@cam.upv.es

22
23 **Alfredo García**

24 Professor

25 Highway Engineering Research Group, Universitat Politècnica de València

26 Camino de Vera, s/n. 46022 – Valencia. Spain

27 Tel: (34) 96 3877374

28 Fax: (34) 96 3877379

29 E-mail: agarciag@tra.upv.es

30
31 **Ana María Pérez-Zuriaga**

32 Ph.D.

33 Highway Engineering Research Group, Universitat Politècnica de València

34 Camino de Vera, s/n. 46022 – Valencia. Spain

35 Tel: (34) 96 3877374

36 Fax: (34) 96 3877379

37 E-mail: anpezu@tra.upv.es

38
39
40 Submission date: July 31st, 2012

41
42 Word Count: Abstract: 261
43 Manuscript: 5321
44 Figures: 5 x 250 = 1250
45 Tables: 3 x 250 = 750
46 **TOTAL: 7582**

47
48 **Keywords:** passing maneuver, two-lane rural road, nighttime driving

1 ABSTRACT

2

3 Passing is one of the most complex maneuvers on two-lane rural roads, thus it has important effects
4 on road safety and traffic operation. It is affected by driving behavior, road geometry, traffic volume,
5 traffic composition as well as other external factors. This research was developed to compare passing
6 process under daytime and nighttime conditions.

7 An experimental methodology was designed to collect video data of passing maneuvers at a
8 two-lane rural road segment located in the surroundings of Valencia (Spain). Two methods were used:
9 firstly, external observations with six video cameras of four passing zones; secondly, an instrumented
10 vehicle equipped with video cameras and laser rangefinders, which was driven slightly below the
11 operating speed along a longer road segment of the same road in order to be passed by other vehicles.

12 A total of 291 maneuvers were observed; up to 20% of them during night. A macroscopic
13 analysis shows that approximately 17% of passes are under nighttime conditions, although passing
14 frequency and passing demand decrease during night. Besides, individual behavior of drivers which
15 pass is different at nighttime compared with daytime. Maneuvers limited by the presence of an
16 opposing vehicle are performed faster at night, even if accepted gaps are longer. In this case, a more
17 difficult perception of distances to opposing vehicles and of their speeds explains the differences. On
18 the other hand, maneuvers limited by sight distance (without a visible opposing vehicle) are slower
19 during night. This matches a traditional hypothesis, which assumed that passing at night is safer since
20 headlights from opposing vehicles anticipate their position before being seen.

1 INTRODUCTION

2
3 Passing maneuver on two-lane rural highways allows different vehicles to drive at their desired
4 speeds. Levels of service of those highways are increased due to the existence of passing zones, where
5 sufficient passing sight distance is provided.

6 This maneuver is one of the most complex and dangerous on two-lane highways. It involves
7 several decision processes, strongly affected by human factor, road geometry and vehicle
8 performance. To pass a slower vehicle it is necessary to occupy the opposing lane, which causes a
9 potential conflict. Severity of accidents related to passing maneuver is higher (1), involving very often
10 seriously injured or fatalities.

11 Due to its importance, passing maneuver has been widely studied, especially to estimate
12 passing sight distance (PSD), which is used as a criteria for road geometric design and marking.
13 Several theoretical models have been formulated (2, 3). They explained the maneuver by defining
14 equations of movement of the three involved vehicles: the impeding one; the passing one; and the
15 opposing one. However, these deterministic approaches needed to be compared and calibrated with
16 field data, since most variables have shown a high variability, and models were unable to explain
17 accurately the phenomenon.

18 Recently, various field studies have been presented. Polus et al. (4) and Llorca and Garcia (5)
19 video recorded maneuvers from external points of view, measuring different parameters of passing
20 maneuver. Besides, Carlson et al. (6) and Llorca et al. (7) used instrumented vehicles to collect data,
21 increasing the level of detail. On the other hand, Farah et al. (8) and Jenkins and Rilett (9) used
22 driving simulators to evaluate the influence of human factor on passing decisions. However,
23 simulators have not been validated with real data yet, and it could show a riskier behavior and
24 differences in long distances perception.

25 Those studies analyzed the influence of highway characteristics (5, 6, 7, 8) or driver's
26 behavior (8, 10) on passing maneuver. Some of them also considered the effect of external factors,
27 like weather conditions (11).

28 However, the effect of lighting conditions on passing maneuver has been rarely considered.
29 Night driving involves a different perception of roadway and traffic, as well as a different behavior, as
30 some authors have observed (12, 13). Those results suggest that passing during night could be quite
31 different from daytime.

32 In fact, in 1969, Farber (14) designed an experiment in order to evaluate the difference
33 between nocturnal and diurnal passing maneuvers. The experiment consisted in driving an impeding
34 vehicle in front of a previously observed vehicle. The speed of the researcher's vehicle was set
35 between 10 and 20 mph (16 and 32 km/h) less than the desired speed of the observed passenger car, in
36 order to ensure a close following position along a no-passing zone. The aim was to analyze how
37 drivers reacted to passing opportunities in a single passing zone downstream. Observers positioned off
38 the road recorded times of start and end of passing opportunities and passing maneuvers by using
39 event recorders.

40 More than 400 maneuvers were observed with this methodology, and they were compared
41 with daytime passing maneuvers at the same passing zone. Observations were divided into opposing-
42 car-limited passing situations and sight-distance-limited passing situations, depending on the presence
43 of opposing vehicles during left lane occupation.

44 A comparison between day and night was made only for opposing-car-limited situations.
45 During night, drivers show a more conservative behavior, accepting longer passing opportunities.
46 Besides, a higher dispersion was found in night data. According to the author, complexity to estimate
47 distances and speeds at night could explain these differences.

1 Apart from a logical difficulty of collecting data during night, a previous hypothesis could
2 explain the lack of recent data of nighttime passing maneuvers. During night, headlights of opposing
3 vehicles anticipate their position, so drivers would detect them before seeing them. According to this,
4 nighttime passing would be safer than daytime passing.

5 Farber (14) proposed this hypothesis for sight-distance-limited situations, which is also
6 mentioned in AASHTO Green Book (15). However, there is no other experimental test which verifies
7 this hypothesis.

8 The present research has carried out a field study on passing maneuvers both in daytime and
9 nighttime conditions. Highly accurate and detailed data has been provided in order to characterize
10 passing process under different lighting conditions.

11 12 **OBJECTIVES AND HYPOTHESES**

13
14 The main objective of this research is the characterization of passing maneuvers during night
15 conditions, in comparison with daytime. It can be divided into different specific objectives:

- 16 - Development of a methodology to collect accurate data of passing maneuvers under nocturnal
17 lighting conditions, based on video data.
- 18 - Collection of data during daytime and nighttime from the same locations.
- 19 - Analysis of differences between day and night conditions: comparing passing frequency
20 (macroscopic level) as well as individual passing behavior (microscopic level).

21
22 Traditionally, passing at night has been thought to be safer (15), because headlights of
23 opposing vehicles anticipate their position. Perception of distances and speeds of objects at night is
24 more difficult, though. This suggests a different hypothesis: if opposing vehicles are visible by the
25 passing vehicle driver, passing decision could be different. Passing drivers would require longer
26 passing gaps, and would pass in less time, in order to reduce risk.

27 In addition to this, when a passing maneuver is performed either with high traffic volumes or
28 in long passing zones, an opposing vehicle is in most cases visible by passing drivers. The higher
29 difficulty to pass accepting a gap limited by an opposing vehicle could decrease the passing
30 frequency. Then, the traditional hypothesis would be only valid for sight-distance-limited passing
31 opportunities.

32 33 **METHODOLOGY**

34
35 To collect data of passing maneuvers, two methodologies were developed. An additional data
36 reduction work has been carried out in order to select the most significant variables.

37 38 **Field study**

39
40 Data collection has been based on video recording of passing maneuvers under naturalistic conditions,
41 since influence of observers was minimized. Two methodologies have been used to record passing
42 maneuvers. Observations were carried out at the same locations during day and night. Both methods
43 are a further development of previous research work of authors (5, 7).

44 The first methodology (static) consisted in recording videos from external fixed positions of
45 four passing zones along 2 km of a two-lane rural highway. The mobile traffic laboratory of the
46 Universitat Politècnica de València (Spain) was parked next to the highway. This equipment is
47 composed of six digital video cameras installed on the top of an elevator platform. Zoom and focus of
48 cameras was adjusted on site via wireless network, to collect video images of the four passing zones

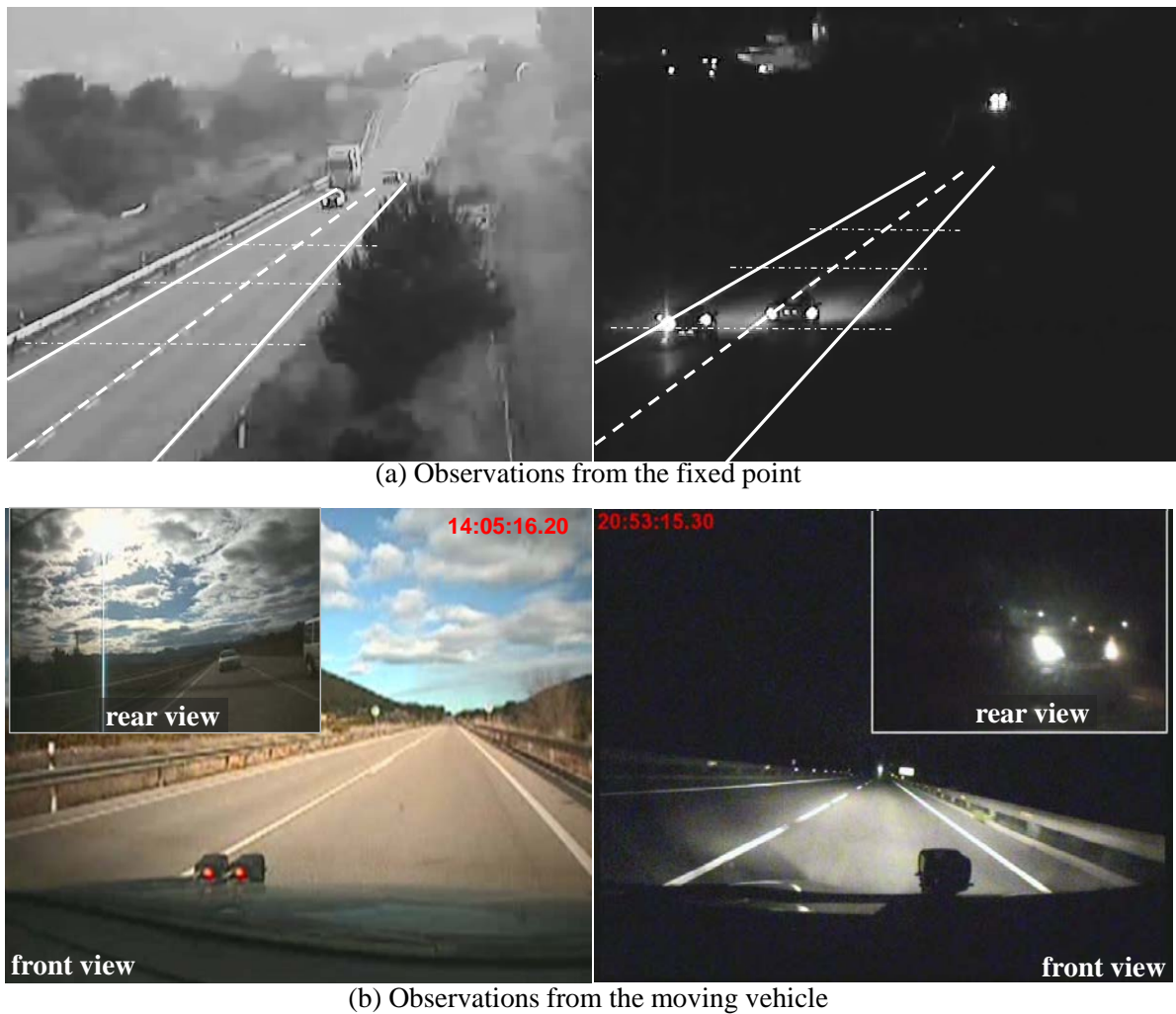
1 (two in each direction of the road) with uniform quality. Infrared filters of cameras allowed night time
2 recording.

3 Position of cameras was fixed and daytime and nighttime recordings were carried out on the
4 same day. Then, reference lines matching road marking were drawn in video frames during day, in
5 order to facilitate data reduction during night (Figure 1).

6 The second methodology (dynamic) was based on an instrumented vehicle, which was driven
7 along a road segment, which included passing zones observed with the first method. The objective
8 was for other vehicles to pass the instrumented vehicle, collecting data of these maneuvers and the
9 entire following process.

10 The instrumented vehicle was equipped with four 720x576 pixels resolution cameras,
11 covering rear, left side and front of the vehicle, and connected to a Racelogic VBOX recording unit,
12 as well as with a high definition mini-camera covering rear part. Two LTI True Sense S200 laser
13 rangefinders were installed to measure headways between vehicles behind and in front of it. Accuracy
14 of distance measurements is 4 cm. Measuring systems are very small and are installed inside the car
15 (cameras and recording units) or in front and rear bumpers (rangefinders). No unexpected maneuvers
16 of drivers who follow the instrumented vehicle were observed, like following without pass or with
17 longer headways when there were passing zones and gaps very long enough.

18 Position and speed of the instrumented vehicle was provided by a 10 Hz GPS tracker
19 connected to the VBOX unit too. Speed was fixed at 80 km/h. This estimation was made thanks to the
20 observation of the static methodology, which had been previously carried out. This speed was the 15th
21 percentile of speed of impeding vehicles at this location (measured with the static methodology),
22 neither too fast nor too slow.



(a) Observations from the fixed point

(b) Observations from the moving vehicle

1
2 **FIGURE 1 Video images of day and night passing maneuvers: (a) static methodology, (b)**
3 **dynamic methodology**

4 During night, high beam was not used by the instrumented vehicle. Some studies (16) showed
5 that percentage of high beam users is not general but quite moderate. Then, the effect of leader vehicle
6 high beam use in perception of passing opportunities by the following driver has not been considered.

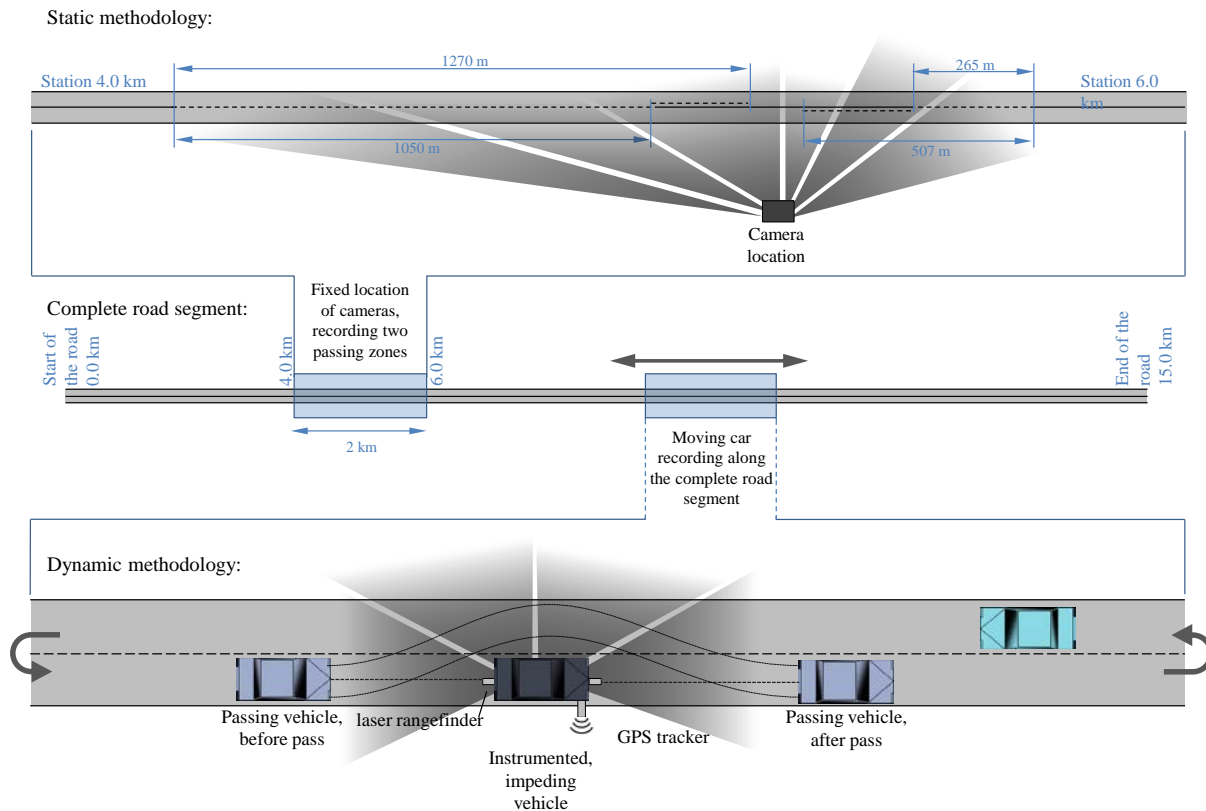
7 Headlights of following vehicle (before passing) and of the instrumented vehicle (after
8 passing) allowed nocturnal video recording, and it was possible to observe accurately the starting and
9 ending point of the maneuver (Figure 1).

10 Data collection was centered in a 15 km highway segment, located in highway N-225 in
11 Valencia (Spain). Design speed, as well as posted speed limit is 100 km/h. Cross section along the
12 entire segment has two lanes 3.5 m wide and paved shoulders of 1.5 m. The instrumented vehicle
13 drove along this segment at constant speed of 80 km/h both during day and night. Passing zones
14 recorded using the static methodology were located between stations 4.0 km and 6.0 km of this
15 segment. Those four passing zones (two in each direction) have lengths between 265 m and 1,270 m.
16 They are located in a tangent, and the no-passing zone between them is a crest vertical curve (Figure
17 2).

18 During the field study, two-way traffic volume was between 150 and 320 vph. During day it
19 was between 230 and 320 vph and during night between 150 and 250 vph. Average percentage of
20 heavy vehicles was 21%.

1 During the night period, road surrounding was completely dark, since no advertisement
 2 lighting or streetlamp are located in the studied road. Pavement was dry along all the data collection
 3 periods.

4
 5



6

7 **FIGURE 2 Field study design**

8

9 **Data reduction**

10

11 This field study has provided data of a total of 291 passing maneuvers: 216 were observed
 12 using the static methodology during 28 hours of observation (7 hours per direction and passing zone).
 13 75 vehicles passed the instrumented vehicle in 7 hours of recording. 81% of the total number of
 14 passing maneuvers was observed during day.

15

16 Static observations have been used to characterize passing frequency, measured in passes per
 17 hour. Hourly traffic volumes, as well as percent of followers were also registered during the whole
 18 time of the data collection. For this count, one vehicle was following a leader vehicle if headway
 19 between them was less than 3 s, according to the Highway Capacity Manual criterion (17).

20

21 From the total number of observations, only single maneuvers (one impeding vehicle)
 22 performed by passenger cars were considered for a day-night comparison. 349 passing gaps were
 23 studied (152 of them were accepted) and 128 passing maneuvers have been analyzed in detail. 60%
 24 of them were during day.

25

26 82 of those 128 maneuvers were recorded from static observations (45 during day and 37
 during night). The following variables have been used to describe this sample (Figure 3):

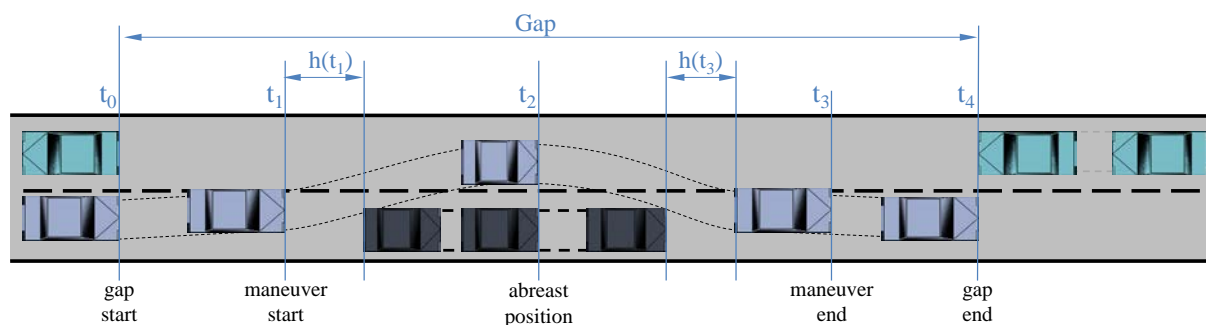
27

- Lighting conditions: day/night
- Type of impeding vehicle: car/truck

- 1 - Visibility of opposing vehicle at start of maneuver: opposing-car-limited/sight-distance-limited
- 2
- 3 - Accepted or rejected passing gap (s) calculated as the difference between the end of gap t_4
- 4 and its start t_0
- 5 - Passing time – opposing lane occupation time t_3-t_1 (s) calculated as the difference between
- 6 the ending point of maneuver t_3 and the starting point t_1
- 7 - Time to collision, TTC = t_4-t_3 (s) time between end of passing maneuver t_3 and crossing with
- 8 next opposing vehicle t_4
- 9

10 From data provided by the instrumented vehicle, 46 maneuvers have been analyzed (38
11 during day and 8 during night). In all cases, the impeding vehicle was a passenger car. Following
12 additional variables have been considered:

- 13 - Average speeds of impeding and passing vehicles during passing time V_i and V_p (km/h)
- 14 - Difference between average speeds of passing and impeding vehicles dV (km/h)
- 15 - Instant speeds of passing vehicle at starting and ending points of maneuver $V_p(t_1)$ and $V_p(t_3)$
- 16 (km/h)
- 17 - Headways between impeding and passing vehicles at starting and ending point of maneuver
- 18 $h(t_1)$ and $h(t_3)$ (m)
- 19
- 20



21
22 **FIGURE 3 Variables of passing maneuver**

23
24 Passing gaps, which can either be accepted or rejected, are calculated as difference between
25 the ending time of a gap t_4 (crossing with an opposing vehicle) and the starting time of it t_0 (crossing
26 with a previous opposing vehicle or entering in a passing zone). This can be applied to passing gaps
27 limited by opposing vehicles, but in some cases, there is no opposing vehicle visible. Then, the real
28 accepted or rejected gap matches the available sight distance from the location of the passing vehicle.
29 To estimate the value of that gap (in time units), a virtual opposing vehicle is considered (7). It would
30 drive at the posted speed limit and would appear at the moment the gap starts (t_0) from the point
31 located at the end of the available sight distance.

32 Since passing gaps are calculated in time units, as $t_4 - t_0$, they could be divided in an initial
33 perception and decision time ($t_1 - t_0$), the passing time ($t_3 - t_1$) and the safety margin ($t_4 - t_3$).

34 In addition to this, several variables describing the passing zone where a passing maneuver is
35 performed have been considered. Passing zone length has been defined as the length where passing is
36 allowed, between two no-passing zones. Available sight distance along each passing zone has been
37 calculated combining video images, aerial photography and smoothed GPS longitudinal profiles. This
38 has provided sight distances profiles for each direction of the road segment, which have been used to
39 estimate passing gaps.

1 ANALYSIS

2
3 After data collection, an analysis has been carried out from a macroscopic point of view of the
4 phenomenon to a behavioral approach of individual passing decisions.

5 6 **Importance of passing during night**

7
8 The effect of lighting conditions on this maneuver has been considered because of its potential
9 influence on highway safety. Relative frequency of night passing maneuvers, compared with the total
10 number of them, has been rarely estimated.

11 Detailed traffic data of year 2010 was available at location of the field study. It included daily
12 and hourly traffic volumes for every day during the whole year. Sunset and sunrise were defined as
13 start and end of night period. Taking into account the variations of those times during the year, the
14 total volume of traffic was divided into daytime traffic and nighttime traffic. According to this
15 calculation, 22% of vehicles drove during night along the segment.

16 On the other hand, an estimation of number of passing maneuvers was made. It has been
17 centered on hourly passing frequency of the longer passing zone (in both directions) which was
18 recorded using the static methodology. An ANOVA test was used to compare the passing frequency
19 between day and night. Passing frequency adjusted adequately a normal distribution, according to a
20 normal probability plot. The effect of lighting conditions was significant ($F\text{-Ratio}=18.98$, $p<0.05$),
21 and average value were 0.0712 passes/hour/vehicle during day and 0.0516 passes/hour/vehicle during
22 night. It means that the number of passing maneuvers per hour and vehicle is higher during day.
23 Those values have been used to estimate that 17% of passing maneuvers at this location are under
24 nighttime conditions.

25 26 **Passing frequency**

27
28 A deeper analysis of the influence of light conditions on passing frequency has been done. It is only
29 centered in data provided by the static methodology, since it was obtained without any intervention in
30 traffic which could affect normal passing frequencies. Apart from lighting conditions, passing zone
31 length has been included in the analyses, due to its logical influence on the number of passing
32 maneuvers performed.

33 Main variables, which have been chosen to characterize passing frequency in each direction of
34 travel, were: number of passing maneuvers per hour and vehicle; and number of passing maneuvers
35 (passing rate) per hour and vehicle following. A multifactor ANOVA was carried out to study those
36 factors. Both number of passes and passing rate were normally distributed, according to a normal
37 probability plot.

38 As shown in Table 1, the number of passing maneuvers in one hour in relation to traffic
39 volume is lower during night than during day. However, number of passes per vehicle which was
40 following a slower vehicle is not affected by lights conditions. These differences suggest that passing
41 demand was lower at night (mean of 30% of vehicles were following during day and 23% night), but
42 that drivers which really demand to pass did it. Besides, passing frequency is affected by passing zone
43 length, increasing the number of passing maneuvers with it.

44
45
46
47
48

1 **TABLE 1 Effect of light conditions and passing zone length**

Variable	Factor	Level	Count	Mean	Significance
Number of passes $\left(\frac{passes}{vehicle \cdot hour}\right)$	Light conditions	daytime	168	0.071	Yes (F-ratio = 18.13)
		nighttime	56	0.052	
	Passing zone length (m)	265	56	0.035	Yes (F-ratio = 55.48)
		507		0.042	
		1,050		0.076	
1,270		0.093			
GRAND MEAN		224	0.061		
Passing rate $\left(\frac{passes}{follower \cdot hour}\right)$	Light conditions	daytime	168	0.24	No (F-ratio = 0.03)
		nighttime	56	0.25	
	Passing zone length (m)	265	56	0.14	Yes (F-ratio = 45.4)
		507		0.19	
		1,050		0.27	
1,270		0.38			
GRAND MEAN		224	0.25		

2

3 **Passing gap acceptance**

4

5 The number of passing maneuvers is the result of driver’s passing decisions, among other factors.
 6 This process of decision making consists in accepting or rejecting the different passing gaps perceived
 7 during the time a driver desires to pass. A passing gap is an opportunity to pass a vehicle which is
 8 driving at a lower speed. As previously explained in data reduction section, two types of passing gaps
 9 can be found: sight-distance-limited gaps and opposing-vehicle-limited gaps. Estimation of time gaps
 10 for both cases makes possible their comparison, though.

11 According to most gap acceptance theories, each driver has a critical passing gap. Then, this
 12 driver will accept every gap longer than the critical, and will reject every gap shorter than it.
 13 Traditionally, several methods are used to estimate the value or distribution of critical gaps. Brilon et
 14 al. (18) compared different methods and established which ones can be applied to each conditions and
 15 objectives, including the maximum likelihood method described by Troutbeck (18).

16 In this method, only the accepted gap (a_i) and the maximum rejected gap (r_i) are considered. If
 17 there is no rejected gap, r_i is equal to zero. The maximum likelihood method calculates the
 18 probability of the critical gap t_c between a_i and r_i , assuming consistency between all drivers. Log-
 19 normal probability functions of critical gaps t_c are usually considered. The method consists in
 20 maximizing the likelihood function L^* (Equation 1), characterizing critical gap distribution and
 21 calculating its mean and its standard deviation. One of the advantages of this methodology is that it
 22 does not depend on traffic volumes.

23
$$L^* = \sum_{i=1}^n (F_a(a_i) - F_r(r_i)) \tag{1}$$

24 where:

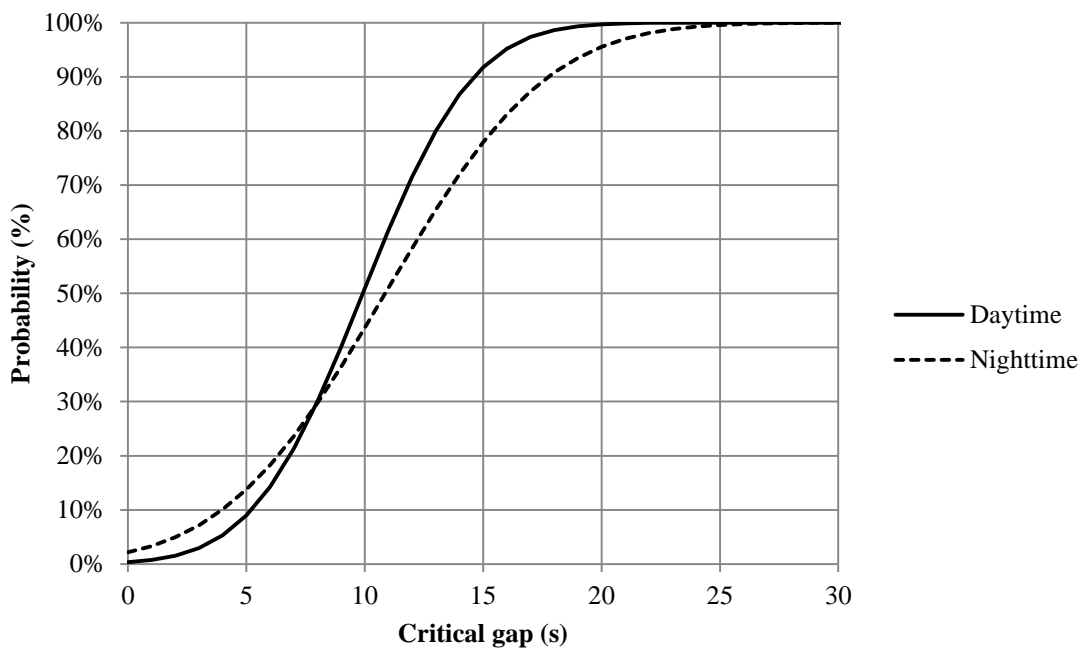
- 25 - a_i : accepted gap of driver i
- 26 - r_i : maximum rejected gap of driver i
- 27 - n: number of maneuvers
- 28 - F: Lognormal probability function
- 29 - L^* : likelihood function

30

1 This method has been applied to data observed with the two methodologies. 349 passing gaps
 2 were initially considered, 152 of them being accepted. Parameters of log-normal critical gap
 3 distributions have been obtained according to Brilon et al. (18) by using an MS Excel function to
 4 maximize the Equation 1.

5 This estimation was separately carried out for day and night data. Slight differences have been
 6 found between both conditions, as seen in Figure 4. Mean critical passing gap is 1 s lower during day
 7 (9.9 s during day and 10.9 s night), while dispersion is higher during night (standard deviation of 3.7 s
 8 and 5.4 s, respectively). A higher dispersion under night conditions was also found by Farber (14) in
 9 several parameters.

10 Similitudes between day and night passing gap acceptance suggest that lighting conditions
 11 would not affect traffic operation. Passing process will be analyzed more accurately in following
 12 sections, though.



15 **FIGURE 4 Estimated critical gap distribution under day and night conditions**

18 Passing times

19
 20 In order to compare passing process during day and night, different stages of passing maneuver were
 21 registered. Main variables of this analysis, as it was previously said in data reduction section, are:

- 22 - Passing gap duration: GAP (s)
- 23 - Left lane occupation time: $t_3 - t_1$ (s)
- 24 - Remaining time to cross next opposing vehicle after a passing maneuver (time to collision):
 25 TTC (s)

26 A multifactor ANOVA analysis has been carried out, in order to analyze significance of effect
 27 on lighting conditions on these variables. In addition to this, influence of passing zone length and type
 28 of impeding vehicles has been considered. Data of 82 maneuvers obtained from static methodology
 29 has been used for this analysis. Average speed of impeding vehicles along the entire observed passing
 30 zones was compared. There were no significant differences between them during day and during
 31 night, with average values of 89 km/h and 93 km/h, respectively (F-Ratio=1.77, $p < 0.05$).

1 Opposing-vehicle-limited and sight-distance-limited passing gaps have been considered in
 2 different groups, since there were strong, significant differences between them. This can be explained
 3 by the difference of driver's perception of gaps, either during day or during night.

4 Results of statistical analysis show differences between passing maneuvers limited by
 5 opposing vehicles or by sight distance restrictions. The effect of night conditions is different in each
 6 case.

7
 8 **TABLE 2 Effect of lighting conditions on passing gap, passing time and TTC**

Type of passing gap	Lighting conditions	GAP	Passing time: t_3-t_1	Remaining TTC	Count
		Mean (s)	Mean (s)	Mean (s)	
Total	both	17.70	8.31		82
Opposing-vehicle-limited	day	<u>16.52</u>	<u>8.63</u>	<u>6.72</u>	18
	night	<u>20.15</u>	<u>7.21</u>	<u>10.12</u>	12
Forced opposing-vehicle-limited (Gap < 18 s)	day	<u>13.33</u>	7.61	4.77	8
	night	<u>16.39</u>	6.21	9.04	3
Sight distance-limited	day	25.14	8.76	-	27
	night	36.91	9.21	-	25
Forced sight-distance-limited (available gap < 18 s)	day	13.41	8.03	-	15
	night	14.12	9.02	-	13

statistically significant differences underlined ($p_{F\text{-statistic}} < 0.05$ if factor is significant)

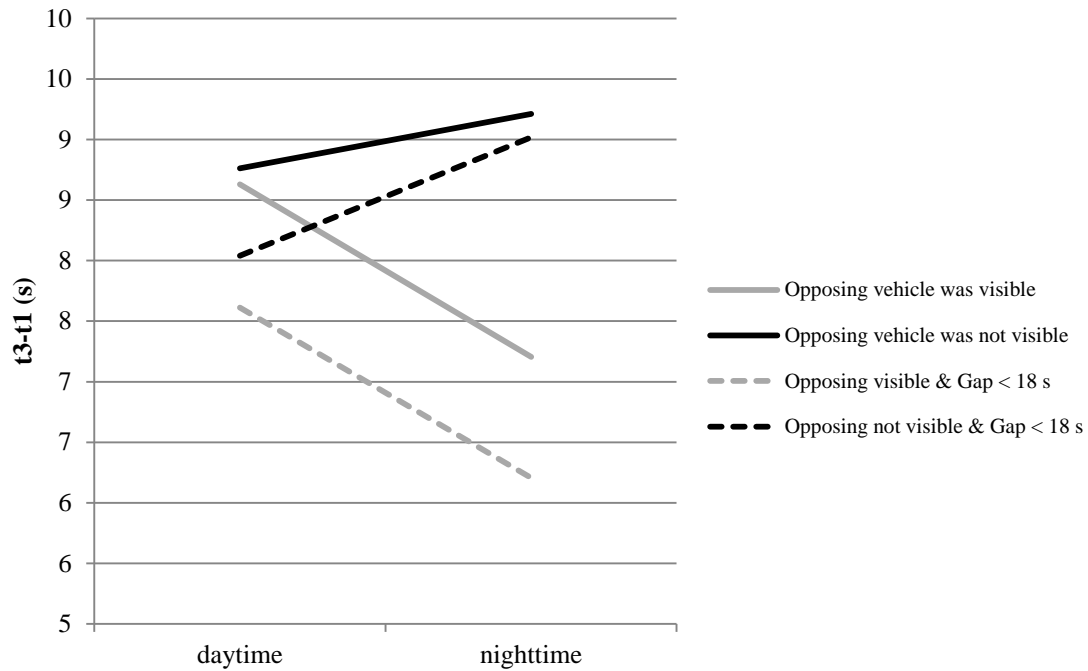
9
 10 During night, when an opposing vehicle was visible, drivers passed quicker than during day (t_3-t_1 was
 11 1.4 s lower), even considering that mean accepted gaps and times to collision were longer during
 12 night. This means that drivers passed faster during night, although the gap available to do it was
 13 longer. The third of maneuvers which had a shorter accepted gap, designated as forced maneuvers,
 14 were analyzed separately. The threshold value was a gap of 18 s. As can be seen in Table 2, forced
 15 maneuvers show similar differences between day and night conditions, although passing times are
 16 smaller than in the whole sample.

17 Farber (14) observed the influence of gap size in passing time. However, no significant
 18 differences in passing times between daytime and nighttime situations were found.

19 On the other hand, when passing maneuvers were only limited by sight distance, passing
 20 maneuvers were faster during day (t_3-t_1 was 1.5 s lower). Therefore, the effect of nighttime conditions
 21 to opposing-car-limited situations is opposite to sight-distance-limited situations (Figure 5).

22 Apart from effect of lighting, other effects have been found in the analysis. Passing times
 23 between 1.5 s and 2.2 s higher have been measured when the impeding vehicle was a truck. This
 24 effect was statistically significant in most cases. Moreover, passing times are usually higher in longer
 25 passing zones.

26



1
2 **FIGURE 5 Differences in passing time between day and night maneuvers and presence or**
3 **absence of an opposing vehicle**

4 **Passing speeds and headways**

6
7 Passing maneuvers observed from the instrumented vehicle represent a smaller part of the sample of
8 passing maneuvers (46 passes). However, level of detail of data acquisition is significantly higher, and
9 additional variables have been analyzed. The following variables have been considered:

- 10 - Passing time t_3-t_1 (s)
11 - Headways between impeding and passing at start and end of passing maneuver $h(t_1)$ and $h(t_3)$
12 (m)
13 - Speeds of passing vehicle at start and end of passing maneuver $V_p(t_1)$ and $V_p(t_3)$ (km/h)
14 - Difference between average passing and impeding vehicle speeds during passing time dV
15 (km/h)

16
17 In this case, in every passing maneuver the impeding vehicle was a passenger car. Lighting
18 conditions, passing zone length and presence of opposing vehicles have been the considered effects.
19 Since along the road segment 17 passing zones were located, they have been divided in three groups,
20 according to their length.

21 Table 3 shows the effect of those variables in sight-distance-limited conditions, which
22 represent the most frequent case in the sample.

23 Results obtained from instrumented vehicle data show similar tendencies for passing times if
24 values are compared with previous analysis. In sight-distance-limited situations drivers passed in
25 more time during night than during day. Differences between day and night were similar in the two
26 data collection methods (around 1.5 s). Values from static methodology (Table 2) were higher, since
27 they include passing maneuvers involving trucks, which required a longer passing time in most cases.

28 In addition to this, headways between impeding and passing vehicles, both before and after
29 performing the pass, were higher during night, especially when returning to the right lane after
30 passing (7 m longer during night).

1 In contrast, speed of passing vehicle was higher during night. Although mean initial speeds
2 were very similar at the starting point of the maneuver, final speeds were 3 km/h higher during night.
3 Consequently, average speed differences were also higher.

4 On the other hand, passing zone length had an effect on passing time, since gap sizes were
5 highly related to available sight distance and, in consequence, to passing zone length. Long gap sizes
6 may explain longer passing times. However, in relation to the other variables (headway and speed) no
7 differences between zones were found.

8
9 **TABLE 3 Effect of lighting conditions and passing zone length in instrumented vehicle**
10 **recorded data**
11

Lighting Conditions					
Variable		Level mean			Count
		day	night		
Passing time (s)	t_3-t_1	7.4	9.1		37
Initial headway (m)	$h(t_1)$	7.5	9.5		26
Final headway (m)	$h(t_3)$	19.7	26.7		26
Initial passing speed (km/h)	$V_p(t_1)$	85.6	85.1		26
Final passing speed (km/h)	$V_p(t_3)$	100.5	103.5		26
Average speed difference (km/h)	dV	18.3	21.5		37
Passing zone length					
Variable		Level mean			Count
		short	medium	long	
Passing time (s)	t_3-t_1	8.0	8.1	8.8	37
Initial headway (m)	$h(t_1)$	8.5	8.8	8.1	26
Final headway (m)	$h(t_3)$	22.7	23.1	23.8	26
Initial passing speed (km/h)	$V_p(t_1)$	87.6	84.0	84.5	26
Final passing speed (km/h)	$V_p(t_3)$	101.7	102.8	101.5	26
Average speed difference (km/h)	dV	20.0	19.9	21.0	37

12
13 **DISCUSSION**
14

15 Traditionally, a hypothesis assumed that passing during night would be safer, since headlights
16 anticipate oncoming vehicles even before being seen. This hypothesis (14, 15) would only be
17 adequate for passing maneuvers without a visible opposing vehicle. On the other hand, previous
18 research observed that it was more difficult to estimate distances to opposing vehicles during night.
19 Therefore, the analysis of collected data was divided in opposing-vehicle-limited conditions and sight-
20 distance-limited situations.

21 In the first case, opposing-vehicle-limited situations, statistically significant differences
22 between passing times were found. During night, left lane occupation time was 1.4 s shorter, although
23 the accepted gaps were longer. In spite of opposing vehicles being further, during night, drivers
24 passed faster avoiding a potential conflict. The higher difficulty to estimate the distance and the speed
25 of opposing vehicles may explain these differences.

26 On the other hand, when a vehicle passes without seeing an opposing vehicle, differences
27 between night and day conditions are just the opposite. Passing times are 1.5 s longer during night, as
28 well as headways between passing and impeding vehicles, either before or after passing. On one hand,
29 traffic volumes at this location were slightly lower during night, and as a result, available gaps are

1 longer, and probably passing maneuvers are less forced and drivers pass slower. However, since
2 differences have been found also in those hypothetically forced maneuvers (sight-distance-limited
3 gaps under 18 s) a second explanation would be related to the traditional hypothesis: headlights
4 anticipate position of the opposing vehicle, so drivers are really accepting a longer gap than the
5 measured one.

6 7 **CONCLUSIONS**

8
9 This research has carried out a field study on passing maneuvers under daytime and nighttime
10 conditions. Two methodologies based on video recording were developed to collect naturalistic
11 observations of up to 291 maneuvers. Detailed data of passing process has been obtained, and a
12 comparison between both lighting conditions has been carried out.

13 Passing during night is not as frequent as during day, although it represents around 17% of
14 total number of maneuvers at this location during the year. This proportion could be slightly different
15 in other locations, but it justifies the importance of the phenomenon.

16 On the observed highway segment, passing frequency decreases slightly during night, because
17 passing demand is also more reduced. However, average critical gaps are similar between both
18 conditions, suggesting a similar operational effect of the maneuver.

19 Passing behavior is different if an individual characterization of maneuvers is done, though.
20 Individual driver's behavior during night shows higher dispersion, if it is compared with daytime
21 passing maneuvers. It depends strongly on the perception of opposing vehicles. On one hand, if an
22 opposing vehicle is perceived, passing time decreases during night; on the other hand, if there is no
23 opposing vehicle visible, passing time increases. Therefore, results could have an effect in traffic
24 operation of two-lane rural highways. The consequence of higher traffic volumes during night is that a
25 significant part of passing maneuvers is performed under opposing-vehicle-limited conditions. Since
26 behavior is more conservative, number of passes could be reduced and quality of traffic flow would
27 be affected.

28 The analysis of passing process during both day and night conditions could help to improve
29 both operational analysis and microsimulation models, taking into account how almost that 20% of
30 passing maneuvers are performed. Further work could be carried out to analyze the influence of
31 impeding and opposing vehicle high beam usage on passing behavior during night.

32 33 **ACKNOWLEDGEMENTS**

34
35 Authors would like to thank Spanish Ministry of Economy and Competitiveness that subsidizes the
36 research project with reference code TRA2010-21736, and Spanish Ministry of Public Works and
37 Spanish General Traffic Directorate, for its collaboration during the field study.

38 39 **REFERENCES**

- 40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
1. Clarke, D., P. Ward and J. Jones. Overtaking road-accidents: Differences in manoeuvre as a function of driver age, *Accident Analysis and Prevention*, No. 30 , 1998, pp. 455-467.
 2. Hassan, Y., A. El Halim and S. Easa, Passing sight distance on two-lane highways: review and revision, *Transportation Research. Part A*, No. 30, 1996, pp. 453-467.
 3. Wang, Y. and M. Cartmell, New Model for Passing Sight Distance on Two-Lane Highways, *Journal of Transportation Engineering*, No. 124, 1998, pp. 536.
 4. Polus, A., M. Livneh and B. Frischer, Evaluation of the passing process on two-lane rural highways, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1701, 2000, pp. 53.

- 1 5. Llorca, C and A. García. Evaluation of Passing Process on Two-lane Rural Roads in Spain
2 using a New Methodology Based on Video Data, *Transportation Research Record: Journal*
3 *of the Transportation Research Board*, No. 2262, 2011, pp. 42-51.
- 4 6. Carlson, P. J., J. D. Miles and P. K Johnson, Daytime High Speed Passing Maneuvers
5 observed on Rural Two-Lane, Two-Way Highway: Findings and Implications, *Transportation*
6 *Research Record: Journal of Transportation Research Board*, No. 1961, 2006, pp. 9.
- 7 7. Llorca, C., A. García, A.M. Pérez, and A.T. Moreno, New Experimental Approach for
8 Passing Gap Acceptance, presented at Transportation Research Board 91st Annual Meeting,
9 2012, Washington D.C.
- 10 8. Farah, H., Age and Gender Differences in overtaking maneuvers on two-lane rural highways,
11 *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2248,
12 2011, pp 30-37.
- 13 9. Jenkins, J., y L. Rilett, Application of distributed traffic simulation for passing behavior
14 study. *Transportation research record: Journal of the Transportation Research Board*, No.
15 1899, 2004, p. 11.
- 16 10. Llorca, C., A. García, A.T. Moreno, and A.M. Pérez, Human factor effects on passing
17 decisions, presented at European Conference on Human Centered Design for Intelligent
18 Transportation Systems, 2012, Valencia (Spain).
- 19 11. Takemoto, A., K. Munehiro, N. Takahashi, and S. Kasai, Construction of a passing maneuver
20 model on a two-lane highway with consideration of road surface and visibility conditions,
21 presented at Transportation Research Board 90th Annual Meeting, 2011, Washington D.C.
- 22 12. Gould, M., D.R. Poulter, S. Helman and J.P. Wann, Errors in judging the approach rate of
23 motorcycles in nighttime conditions and the effect of an improved lighting configuration,
24 *Accident Analysis and Prevention*, No. 45, 2012, pp. 432-437.
- 25 13. Castro, C., C. Martínez, F. Tornay, P. Fernández and F. Martos, Vehicle estimations in
26 nighttime driving: a real-setting study. *Transportation Research Part F*, No. 8, 2005, pp. 31-
27 45.
- 28 14. Farber, E., Passing Behavior on Public Highways Under Daytime and Nighttime Conditions,
29 Highway Research Record, No. 292, 1969, pp. 11-23.
- 30 15. American Association of State Highway and Transportation Officials, A Policy on Geometric
31 Design of Highways and Streets, Washington, DC, 2011.
- 32 16. Iragavarapu, V and K. Fitzpatrick, High Beam Usage on Low Volume Rural Roads in Texas,
33 presented at Transportation Research Board 91st Annual Meeting, 2012, Washington D.C.
- 34 17. Transportation Research Board. Highway Capacity Manual, 2010.
- 35 18. Brilon, W., R. König and R. Troutbeck. Useful Estimation Procedures for Critical Gaps,
36 *Transportation Research Part A*, No. 33, 1999, pp. 161-186.

5. Llorca, C., Moreno, A.T., Lenorzer, A., Casas, J., Garcia, A., 2014. Development of a new microscopic passing maneuver model for two-lane rural roads. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. In press. doi:10.1016/j.trc.2014.06.001.

Development of a new microscopic passing maneuver model for two-lane rural roads

Carlos Llorca

PhD Candidate

Highway Engineering Research Group

Universitat Politècnica de València

Camino de Vera s/n 46022 – Valencia (Spain)

carlloga@cam.upv.es

Ana Tsui Moreno

PhD Candidate

Highway Engineering Research Group

Universitat Politècnica de València

Camino de Vera s/n 46022 – Valencia (Spain)

anmoch@cam.upv.es

Annique Lenorzer

PhD

Research and Development Department

Transport Simulation Systems

Passeig de Gràcia 12, 08007 – Barcelona (Spain)

annique@aimsun.com

Jordi Casas

PhD, Director

Research and Development Department

Transport Simulation Systems

Passeig de Gràcia 12, 08007 – Barcelona (Spain)

casas@aimsun.com

Alfredo Garcia

Professor

Highway Engineering Research Group

Universitat Politècnica de València

Camino de Vera s/n 46022 – Valencia (Spain)

agarciag@tra.upv.es

Abstract

Microsimulation is a useful tool to analyze traffic operation. On two-lane highways, the complexity of passing and the interaction with oncoming traffic requires specific models. This study focused on the development of a passing desire, decision and execution model. Results of the observation of 1,752 maneuvers on 10 rural roads in Spain were used for this development. The model incorporated the effect of new factors such as available sight distance, delay and remaining travel time until the end of the highway segment. Outputs of the model were compared to observed data: firstly, individual passing maneuvers; secondly, traffic flow, percent followers and number of passing maneuvers in four single passing zones with two different traffic levels. The model was validated in four alternative passing zones.

Highlights

- Specific characteristics of two-lane roads require special microsimulation models.
- The interaction with oncoming vehicles makes passing a complex task.
- This study developed a new passing model for Aimsun software, including 3 steps: desire, decision and execution.
- More than 1,750 video-recorded passing maneuvers to calibrate the new model.
- The new model incorporated the effect of sight distance, delay and multiple passing maneuvers.

Keywords

Microsimulation, Two-lane highway, Passing maneuver, Passing gap acceptance

1. Introduction and Background

Microsimulation of traffic requires the description of the movement of each individual vehicle in the traffic stream. Therefore, microscopic models include several components to represent the maneuvers performed by individuals, such as acceleration, deceleration, car following or lane changing (Barceló, 2010).

Common applications of microscopic modelling of traffic are, among others, the study of signalized and unsignalized intersections (Stevanovic et al., 2013), roundabouts (Ištoka Otković et al., 2013), emission estimations (Jie et al., 2013), passing and climbing lanes (Valencia and Garcia, 2010), or evaluation of intelligent transportation systems (ITS) and cooperative systems (Hegeman et al, 2008).

The application of microsimulation to analyze two-way two-lane rural roads is also possible. However, the interaction with opposing traffic flow implies the development of specific passing models. On two-lane rural roads, passing maneuver allows faster drivers to pass slower vehicles and drive at their own desired speeds. This maneuver has an important effect on the level of service and contributes increasing the capacity of these roads (Transportation Research Board, 2010).

Passing is only possible on certain sections where available sight distance exceeds a minimum passing sight distance (*PSD*) requirement determined by standards. Therefore, there is an effect of geometric design on the frequency and characteristics of passing maneuver. However, this maneuver depends mainly on the human factor, since it involves several complex decisions. Traditionally, the following stages explain passing driver's behavior:

- Passing desire: driver's desire to pass or to keep on following the slower vehicle.
- Passing decision (gap acceptance): for drivers who desired to pass, their decision to accept or reject a passing opportunity (named gap) in the opposing traffic.
- Passing execution: for drivers who accepted a gap, the passing performance and the decision to complete or abort the maneuver, before reaching the critical point (point of no return).

The complexity and higher dispersion of passing process is visible in many observational studies (Polus et al, 2000, Carlson et al, 2005, Harwood et al, 2010, Llorca et al. 2013a, Llorca et al, 2013b). Consequently, many researchers considered the use of alternative approaches to analyze two-lane roads, such as driving simulators (Jenkins and Rillet, 2004, Farah and Toledo, 2010, Farah, 2011) or microscopic modelling. The following section focuses on the existing microscopic passing models.

1.1. Existing models

There have been previous research focused on the development of passing models. However, their level of detail, their validation or their field of application are not homogeneous.

The Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM) includes a passing model as part of the Traffic Analysis Module (TAM, previously named TWOPAS). This model has been used to analyze average travel speeds (*ATS*) and percent time spent following (*PTSF*) (Bessa and Setti, 2011), or the addition of climbing lanes to facilitate passing (Valencia and Garcia, 2010). Harwood et al. (2010) used this model to demonstrate that short passing zones (under 240 m) did not contribute to improve the level of service of rural roads. Authors did not validate TAM with this study, assuming TAM initial calibration based on 1970's data (Harwood et al. 1999).

Several authors detected limitations in TAM. According to Li and Washburn (2011), this model does not provide the ability to include signalized intersection within the modeled highway. Kim and Elefteriadou (2010) stated that the program stalls when traffic volume exceeds 1,700 vph.

Li and Washburn (2011) developed a passing model for CORSIM software. The CORSIM model includes the following steps: passing desire, depending on tolerable and desired speed, as well as impatience; and passing decision and execution: based on estimated *PSD* according to the Manual on Uniform Traffic Control Devices (FHWA, 2003) and Harwood et al. (2010), also included in AASHTO Green Book (2011). CORSIM can take into account no-passing zone marking and opposing traffic, although the effect of available sight distance is not considered. Although this model increased the level of detail of TAM, there is still neither any validation nor calibration with field data.

Kim and Elefteriadou (2010) developed a microsimulation model to determine two-lane highways capacity. This model assumes a consistent and homogenous driver behavior. To consider passing, driver's desired speed should be 8 km/h higher than the leading vehicle. TWOSIM uses the Green Book (2004) *PSD* values. This model was verified comparing results of *ATS* and *PTSF* with TAM model. The authors also compared passing times with field data from other authors. Authors obtained a capacity up to 2100 vph for two-lane roads applying this model to generated road segments. Previously, Dey et al. (2008) described another passing microsimulation model. Those authors used also the model to evaluate capacity of two-lane rural roads. The results of capacity ranged between 2400 and 3000 passenger car units (*PCU*). However, the only validation process of this model was the comparison of arrival distributions and spot speeds with real data.

Hegeman et al (2008) used the microsimulation model RutSim to test the effect of driver's assistant systems. This model was an evolution of the VTI model, developed by Tapani (2005). VTI was validated at a microscopic level, although the frequency and characteristics of passing maneuvers were not tested. Other models that have been used mainly in research studies were LASI (Brilon and Brannolte, 1977), TRARR (Hoban et al, 1991), and Ghods (2013).

Other passing studies (such as El Khoury and Hobeika, 2010, Farah and Toledo, 2010) modeled single passing maneuvers or binary choice processes, respectively, but they are not strictly microsimulation models. Lastly, Jenkins and Rillet (2004) combined a microscopic model (not able to represent passing maneuvers) with a driving simulator, while the microsimulator generated the rest of traffic. A sample of drivers performed passing maneuvers in a controlled driving simulator experiment. However, those studies cannot be applied to evaluate the traffic performance on different real rural road scenarios.

As seen in the literature review, there are different approaches to microscopic passing maneuver models. They include different parameters and assumptions, which are rarely justified by the observation of the phenomenon. Besides, most of them are still not validated with detailed observations of passing maneuvers, and may provide unrealistic results under conditions other than the tested. The complexity of modeling two-lane rural roads, compared to other facilities, such as freeways, and their lower traffic volume may explain why those models are generally only applied in research studies.

The conclusion of the literature review is the necessity of calibrating and validating a passing maneuver model, as part of a microsimulation software. With this contribution, microsimulation tools might be also applied in operational analyses involving two-way two-lane rural road segments.

2. Objectives

The aim of this paper is the development and calibration of a passing maneuver model in Aimsun microsimulation software (Transport Simulation Systems, 2013). This main goal is divided into the following objectives:

- Development and implementation of a passing maneuver model and a modified car-following model in the Aimsun software.
- Microscopic scale calibration: analysis and comparison of individual passing decision and individual passing execution, based on data of maneuvers observed from an instrumented vehicle.
- Macroscopic scale calibration: analysis and comparison of basic performance measures: input traffic flow, percent followers and number of passes in four passing zones (PZ) of an observed highway, based on data obtained with static video cameras.
- Validation of the model in four passing zones other than the used in the previous calibration.

3. Observation of passing maneuvers

Both development, calibration and validation of the model depended on observational data. A field study obtained data from 1,752 maneuvers using two methodologies on 10 two-lane road segments. Both methods are a further development from previous research work of authors (Llorca and Garcia, 2011, Llorca et al. 2013a). They consisted on video recording of passing maneuvers without the intervention of observers.

The first methodology (named static) (Llorca and Garcia, 2011) consisted in recording videos from external fixed positions on 24 passing zones in eight road segments. The mobile traffic laboratory of the Universitat Politècnica de València (Spain) was parked next to the highway. This equipment is composed of six digital video cameras installed on the top of an elevator platform. A wireless network facilitates adjusting zoom and focus of video cameras, in order to collect video images of the entire passing zone with uniform quality. In two of the locations, the mobile traffic laboratory was substituted by conventional video cameras.

The second methodology (named dynamic) (Llorca et al, 2013b) used two instrumented vehicles. The objective was for other vehicles to pass the instrumented vehicle, collecting data of these maneuvers and the entire following process. The vehicle was driven along six road segments. In five of the segments, the static method was also applied, in order to compare passing maneuvers, to ensure that the dynamic method did not affect driver's behavior. The result of the comparison showed no differences between both methods on passing times.

The instrumented vehicle was equipped with four VBOX cameras, covering rear, left side and front of the vehicle. Two laser rangefinders measured distance gaps between the instrumented car and other vehicles behind and in front of it. Measuring systems are very small and are installed inside the car (cameras and recording units) or in front and rear bumpers (rangefinders). No following driver performed unexpected maneuvers, like following without pass or with longer headways.

A 10 Hz GPS tracker connected to a VBOX unit provided the position and speed of the instrumented vehicle. The speed of the instrumented vehicle was selected according to the observations of the static methodology, which had been previously carried out. In those observations, speed of a sample of impeding vehicles was measured using video recordings.

Therefore, the instrumented vehicle speed was set as the 15th percentile of speed of impeding vehicles at this location (measured with the static methodology), neither too fast nor too slow.

Table 1 and Figure 1 summarize data collection.

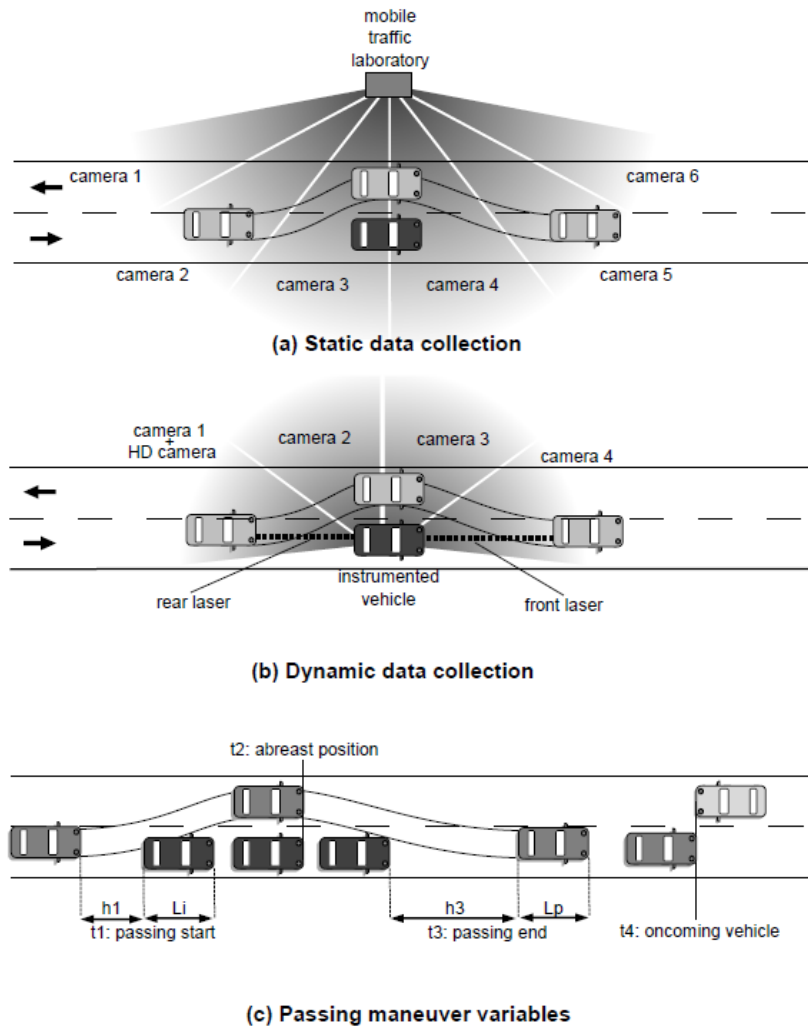


Figure 1. Field study layout and description of the passing maneuver

Static methodology				
Road segment	Design speed (km/h)	Speed limit (km/h)	Number of PZ analyzed (total number of PZ in the segment)	PZ length range (m)
1 - CV-35	120	100	6 (10)	780 to 1,855
2 - CV-50	80	100	4 (17)	600 to 990
3 - CV-50ii	90	100	4 (12)	265 to 285
4 - CV-37	70	100	2 (2)	550 to 560
5 - CV-25	80	100	2 (10)	1,000
6 - CV-35iii	70	100	2 (10)	540 to 520
7 - N-225	100	100	4 (13)	265 to 1,270
8 - CV-405	70	80	2 (22)	895
Dynamic methodology				
Road	Design speed (km/h)		Number of PZ	PZ length range (m)
1 - N-225	100	100	13 (13)	265 to 1,284
2 - CV-35	120	100	10 (10)	435 to 1,855
3 - CV-50	80	100	12 (12)	268 to 1,215
4 - CV-50ii	90	100	17 (17)	228 to 1,127
5 - CV-415	70	90	18 (18)	100 to 1,250
6 - CV-405	70	80	22 (22)	103 to 904

Table 1. Data collection sites

This field study has provided data of 1,752 passing maneuvers: 1,292 using the static methodology during 36 hours of observations; and 460 using the dynamic methodology. The dynamic methodology used as instrumented vehicle one light vehicle (414 passes in 18 hours) and one truck (46 passes in 8 hours).

Static observations characterized passing frequency, measured in passes per hour (Moreno et al., 2013). Hourly traffic volumes, as well as percent of followers entering the observed passing zones were also registered. For this count, one vehicle was following a leader vehicle if headway between them was less than 3 s, according to the Highway Capacity Manual criterion (Transportation Research Board, 2010). Average travel speeds were also measured. On the other hand, the dynamic methodology allowed the detailed characterization of passing decisions and passing dynamic (Figure 1), including accepted and rejected gaps. The static methodology was necessary to evaluate the operation of two-lane segments, because of the absence of any intervention of researchers, while the dynamic method provided a higher level of detail to characterize individuals' passing decision and execution.

Table 2 summarizes the variables observed in data collection. The count of each variable may be lower than the total amount of maneuvers, due to measurement inaccuracy or missing values. Besides, the more detailed characterization was available only for simple passes (one impeding vehicle).

Variable	Static methodology – traffic flow scale					
	Code (Units)	N	Minimum	Mean	SD	Maximum
Number of passes	NP (passes/hour)	210	0	16	12	51
Hourly traffic volume (one direction)	V (vph)	210	84	210	108	472
Percent followers*	%FV	210	4%	35%	14%	73%
Percent heavy vehicles**	%HV	210	0%	16%	12%	44%
Dynamic methodology – individual scale (light vehicle)						
Passing vehicle length	L_p (m)	414	3.5	4.5	1.0	5.5
Number of impeding vehicles	Number i	414	1	1.2	0.4	3
Passing time	$PT = t_3 - t_1$ (s)	314	4.2	7.1	1.9	16.5
Impeding vehicle average speed	V_i (km/h)	314	50	66	9.0	100
Passing vehicle average speed	V_p (km/h)	314	53	86	12.8	147
Average speed difference	dV (km/h)	314	3.5	20.3	8.6	74.3
Passing vehicle relative speed at end	V_{p3} (km/h)	215	13	25	7.7	38
Opposing flow gap	GAP (s)***	1,621	0.3	8.5	8.4	40.0
Time until crossing with opposing vehicle	$t_4 - t_3$ (s)	174	0.84	10.5	9.2	40.0
Dynamic methodology – individual scale (heavy vehicle)						
Passing vehicle length	L_p (m)	46	3.5	4.5	1.0	5.5
Number of impeding vehicles	Number i	46	1	1	0	1
Passing time	$PT = t_3 - t_1$ (s)	46	5.7	9.1	1.9	11.4
Impeding vehicle average speed	V_i (km/h)	46	60.5	67.9	4.7	74.8
Passing vehicle average speed	V_p (km/h)	46	76.4	88.5	6.3	102.9
Average speed difference	dV (km/h)	46	10.9	21.4	7.6	31.7
Passing vehicle relative speed at end	V_{p3} (km/h)	****				
Opposing flow gap	GAP (s)***	159	0.2	11.2	10.4	50.8
Time until crossing with opposing vehicle	$t_4 - t_3$ (s)	39	0.8	9.8	8.4	35.9
*percent follower is the percentage of vehicles following (headway under 3 s) over the total number of vehicles entering the passing zone during 1 hour. **percent heavy vehicles is the percentage of vehicles over 3,500 kg during 1 h. ***either accepted or rejected ****not measured						

Table 2. Summary of observed variables

In addition to passing maneuver characterization, speed measurements were carried out at several locations in free-flow conditions. This had the objective of measuring desired speeds. A laser device Laser Technology Inc. T100/200 was used for the data collection. This provided the desired speed distribution (for either light vehicles or heavy vehicles), considering only those vehicles driving with a following headway higher than 10 s. Speeds were measured at the middle point of tangents long enough.

4. Model Development

The main objective of this study was the development of a model to simulate passing maneuvers on two-lane, two-way rural roads. This model, implemented in Aimsun 8.0.3, covers the desire, decision and execution process of passing maneuvers. This relied on 14 parameters, defined specifically for the two-lane highways model.

4.1. Parameters

The 14 model parameters are associated with the experiment, the vehicle type or the section Aimsun editors. An Aimsun experiment is a group of simulations under certain fixed conditions: an input traffic volume and composition, a network structure and characteristics, and the definition of simulation models. The parameters that affect the entire experiment are:

- Delay time threshold for passing decision (*delayTh*) (s)
- Minimum speed difference threshold (*mindV*) (km/h)
- Maximum speed difference threshold (*maxdV*) (km/h)
- Maximum rank in the platoon to desire passing (*maxRank*) (vehicles)
- Number of simultaneous passes allowed (*maxSimul*) (passes)
- Delay between simultaneous passes (*delaySimul*) (s)
- Sensitivity factor for reduced car-following (*RCF*)
- Passing vehicle speed enhancement (*PVSE*)
- Speed difference threshold for enhanced passing vehicle speed (*PVSETh*) (km/h)
- Remaining time to the end of the highway segment threshold (*remainingtimeTh*) (s)

Traffic demand in Aimsun may be divided into several vehicle types. The parameter that affects a particular vehicle type are:

- Safety margin for passing maneuver (*safetymargin*), defined by its minimum, maximum, mean and standard deviation values (values in s)

Each highway geometric element corresponds to an Aimsun section. A section is a highway segment with uniform characteristics. The parameters that affect a single section are:

- Mirror section identification (*MirrorID*)
- Available sight distance at the end of the passing zone (*ASD*) (m)
- Sight distance factor (*SDfactor*)

The description and use of each parameter will be explained in the following sections.

4.2. Network generation

The edition of a two-lane, a two-way section is achieved by creating a two-lane section, generating the section in opposite direction and editing the model attributes. Therefore, each geometric element (in each direction) of the two-lane highway is defined by a single Aimsun section. Each section interacts with a mirror section, which represents the opposing lane.

Both opposing sections are linked by the *MirrorID* parameter. When a valid *MirrorID* number is entered, the mirror section is shifted and resized below the edited section. The available sight distance at a passing zone is defined by the parameter *ASD*. This value corresponds to the available sight distance at the end of the passing zone. Available sight distance decreases linearly from the starting point of the passing zone (where is equal to $ASD + \text{Passing zone length}$) to the ending point of it (where is equal to ASD).

4.3. Description of the passing model

The possibility to pass is considered for the vehicles that are in queue. Each vehicle that cannot reach its desired speed due to downstream traffic conditions is considered to be in queue. The queue leaders are identified as the vehicles triggering the queues.

4.3.1. Desire

For each vehicle in queue, the passing desire is evaluated based on four characteristics:

- Time spent following (*delay*) (s)
- Difference between the desired speed and the actual speed of the immediate leader (*dV*) (km/h)
- Rank in the queue (*rank*)
- Remaining travel time to the end of the highway segment (*remainingtime*) (s)

Figure 2 shows the passing desire as a function of time spent following (*delay*) and speed difference (*dV*). If the speed difference *dV* is higher than *maxdV*, the vehicle desires to pass immediately after entering the queue (flying pass). On the other hand, if the speed difference *dV* is lower than *maxdV*, the passing vehicle desires to pass after spending a certain time following the leading vehicle. The minimum delay time to consider passing increases if the speed difference decreases, until a minimum speed difference (*mindV*), when it reaches *delayTh*. No passing is desired if speed difference is lower than *mindV*.

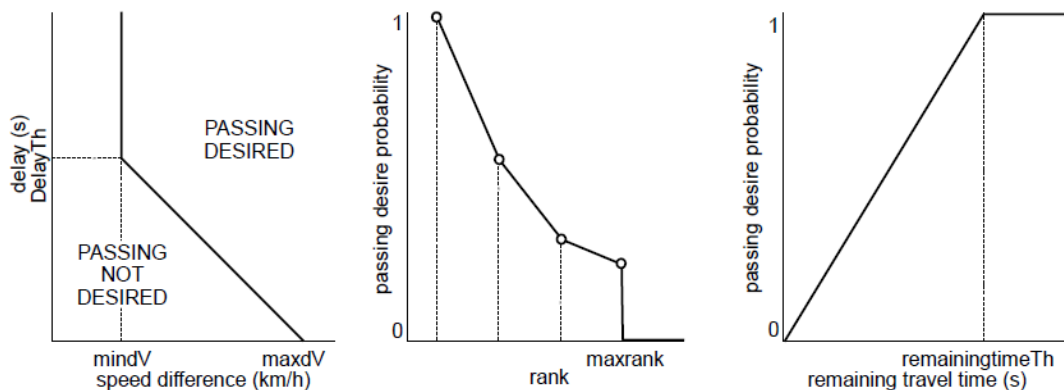


Figure 2. Passing desire

Passing desire may be reduced by the rank in the queue and the remaining time until the end of the highway segment. The desire probability decreases with the rank in the queue, as shown in Figure 2. On the other hand, the desire probability decreases also when the vehicle is reaching the end of the highway segment, as explained in the Figure 2. The definition of *remainingtimeTh* was necessary to represent an important reduction of passing demand in the last passing zones of a highway segment. This was observed thanks to the dynamic methodology, and was especially significant when the next segment was a divided road.

If the passing maneuver is desirable, the vehicle applies a car-following with a reduced safety gap using the car-following distance reduction factor parameter (*RCF*). Modified car following applies Gipps model (Gipps, 1981) according to the equation 1.

Equation 1

$$V_f(t + dt) = b_f dt + \sqrt{(b_f dt)^2 - b_f \left[2(x_l(t) - x_f(t) - l_l - s_f) - V_f(t) - \frac{V_l^2(t)}{RCF \cdot b_l} \right]}$$

Where:

- x_f , V_f , and b_f : position, speed and normal deceleration of the follower.
- x_l , V_l and b_l : position, speed and normal deceleration of the leader.
- S_f : headway at rest.
- L_l : length of the leader vehicle.
- RCF : sensitivity factor. The Gipps model assumes RCF equal to 1 in normal conditions, while the modified car-following is applied with $RCF < 1$.

4.3.2. Decision

The decision to initiate the passing maneuver includes the verification that no solid line forbids passing. In case other vehicles are currently passing the leading vehicle, it takes into account whether simultaneous passing is allowed, following the number of simultaneous passes allowed (*maxSimul*), and whether the delay between simultaneous overtaking (*delaySimul*) is respected.

If allowed, the passing decision is evaluated. In case the speed difference between the desired speed and the actual speed of the immediate leader is under the speed difference threshold for enhanced passing vehicle speed (*PVESth*), the vehicle will use an enhanced desired speed equal to the product of its desired speed and the passing vehicle speed enhancement factor (*PVSE*). This factor accounts for the possibility of travelling at a speed higher than driver's free-flow desired speed. This effect was detected from the observations and it is permitted, at least, by the Spanish traffic regulation.

To evaluate the passing decision, the following variables are calculated:

- Passing maneuver time (*PT*): duration of the maneuver (s), calculated assuming that the vehicle maintains a constant acceleration until it reaches its desired speed (or its enhanced passing speed) after which it maintains a constant speed.
- Time to collision (s) with the closest oncoming vehicle (*TC*): assuming that the oncoming vehicle keeps a constant speed. In case there is no oncoming vehicle, or if it is located further away than the available sight distance at the decision point, the model uses a fictitious vehicle located at the visibility edge. This will generate an oncoming-vehicle limited equivalent passing gap, where speed of opposing vehicle is random but centered in the opposing section speed limit.
- Time to sign (*TS*): time to no-passing marking or signing. It is the time (s) until the end of the passing zone.

The consideration of differences in simulated passing behavior between oncoming vehicle and sight distance-limited maneuvers was a consequence of the observational study. Drivers accepted shorter gaps when the oncoming vehicle was not visible (Llorca et al., 2012). For this reason, the *SDfactor* multiplies sight distance-limited gaps, resulting virtual longer sight distance-limited gaps; so, increasing the probability of acceptance, compared to oncoming vehicle-limited gaps. Therefore, only one gap acceptance model was developed and used.

The vehicle will initiate the passing maneuver if it can be completed before the end of the passing zone and if the duration of the maneuver (PT) is less than the time to collision taking a safety margin defined by the *safetymargin* parameter (different for each vehicle).

4.3.3. Execution

Once the passing execution has been decided, the vehicle accelerates at its maximum acceleration until its desired speed (or its enhanced passing speed) is reached. The feasibility of the maneuver is re-evaluated at each simulation step during the passing maneuver. An additional variable is calculated in this step:

- Time required to abort (AT): is the time (s) the passing vehicle requires to decelerate and return to its own lane without passing the impeding vehicle. The critical point is the point where PT is equal to AT .

Depending on the remaining passing time (PT), the time to collision (TC) and the time required to abort the maneuver (AT) the vehicle will follow one of the five possible maneuver completions:

- The maneuver is not completed yet and there is no risk of collision ($PT + \textit{safetymargin} < TC$): The vehicle keeps passing using a constant acceleration corresponding to its maximum acceleration of the vehicle (defined in the general Aimsun model) until it reaches its desired speed (or its enhanced passing speed). It then keeps passing at constant speed.
- The maneuver is not completed yet, there is a risk of collision and the vehicle has not yet reached the critical point ($PT + \textit{safetymargin} > TC$ and $PT > AT$): the vehicle aborts the passing maneuver. It pulls back into its original lane decelerating behind the vehicle it was trying to pass (deceleration rate is equal to emergency deceleration in the general Aimsun model).
- The maneuver is not completed yet and there is a risk of collision but not immediate and the vehicle has already reached the critical point ($PT + \textit{safetymargin} > TC$, $TC > 2 * \text{Reaction time}$ and $PT < AT$): the vehicle accelerates to complete the maneuver before collision (acceleration rate is equal to maximum acceleration of the vehicle).
- The maneuver is not completed yet, there is an immediate risk of collision and the vehicle has already reached the critical point ($PT + \textit{safetymargin} > TC$, $TC < 2 * \text{Reaction time}$ and $PT < AT$): the vehicle accelerates to pull back into its original lane in front of the overtaken vehicle, forcing it to decelerate.
- The maneuver is completed ($PT=0$): The vehicle pulls back in its original lane in front of the vehicle it was passing.

Figure 3 shows the model flowchart for passing desire, decision and execution.

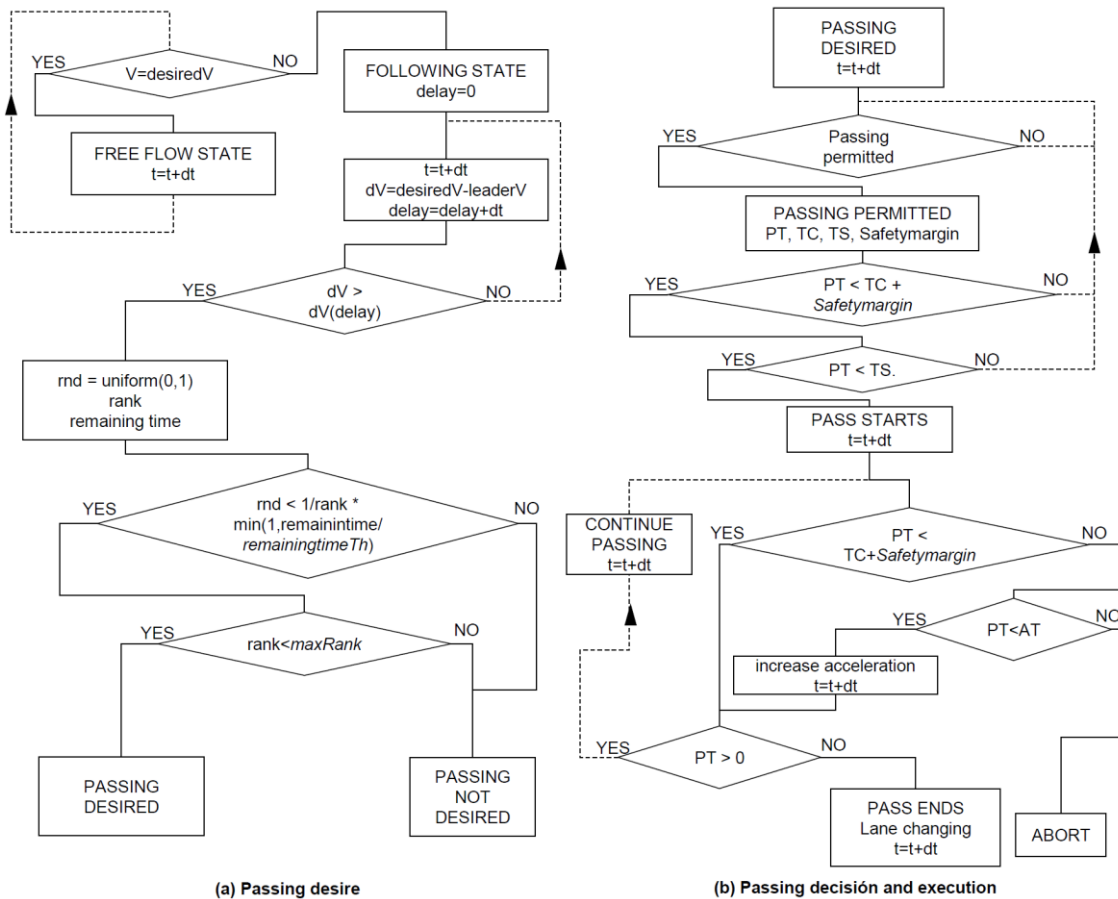


Figure 3. Model flowchart

5. Calibration

The process of determining if a simulation model is close enough to the actual system is achieved through the calibration and validation (Barceló, 2010). The objective of the calibration is to find the values of the parameters of the model that are valid in a particular location. After the calibration process, the validation will answer the question whether the simulation model provides an accurate representation of the system under study or not.

After initial testing to detect and correct errors, the calibration of the passing model developed in this study was divided in two steps. A first step tested the model from the individual behavior point of view. This part verified that single driver decision and maneuvers were close enough to the observations. The second step compared the performance measures between the reality and the simulated model of four different passing zones and two different traffic volumes.

This procedure was selected due to the following reasons. Firstly, this provided a better control of the new model, in order to ensure that it is representative either at micro or macroscopic scale. Secondly, it was still not possible to use automatic calibration methodologies, as the model was in a development stage, being an independent module in Aimsun. Thirdly, the results of this procedure concluded which variables do not need further re-calibration and should be hidden for the user because their variation had low sensitivity on the results. Lastly, the manual calibration procedure resulted in an easier and better understanding of how the model works, although the accuracy of variable values might be slightly lower.

5.1. Microscopic scale calibration

The calibration at microscopic scale was a comparison between observed and simulated passing behavior. In this section, the analysis of individual's behavior calibrated the value of the following parameters, which control passing decision and passing execution:

- Maximum Acceleration (Vehicle type): maximum acceleration rate of vehicles.
- Desired Speed (V_{max}) (Vehicle type): desired free flow speed of vehicles.
- Speed acceptance factor (θ) (Vehicle type): factor that multiplies speed limit in order to allow exceeding it.
- Sensitivity factor for reduced car-following (RCF) (Experiment): explained in section 4.
- Passing vehicle speed enhancement ($PVSE$) (Experiment): explained in section 4.
- Speed difference threshold for enhanced passing vehicle speed ($PVSETh$) (Experiment): explained in section 4.
- Safety margin for passing maneuver (minimum, maximum, mean and standard deviation of $safetymargin$) (Vehicle type): explained in section 4.

The values of these parameters were selected according to Aimsun default values (if the parameter already existed). This was the case of the three first parameters. The rest of parameters were selected based on the observed behavior (if they could be measured) or in a sensitivity analysis (if they could not be measured). The following sections develop the microscopic scale calibration of each output variable. The simulation scenario was a long passing zone (the longest of the macroscopic calibration step).

5.1.1. Desired speed

Desired speed is defined as the driver's selected speed without the effect of neither traffic nor highway alignment. Three parameters affect free-flow speed of a vehicle in Aimsun:

- V_{max} : maximum desired speed.
- θ : Speed acceptance factor.
- $Slimit$: Speed limit.

The desired speed of a vehicle is $V_{desired} = \min(V_{max}, \theta \cdot Slimit)$.

The values of the three parameters were adjusted to the observed speed measurement data at 100 km/h speed limit locations, both for heavy vehicles and light vehicles. Simulated and observed distribution were compared adjusting the Aimsun parameters using a least square method.

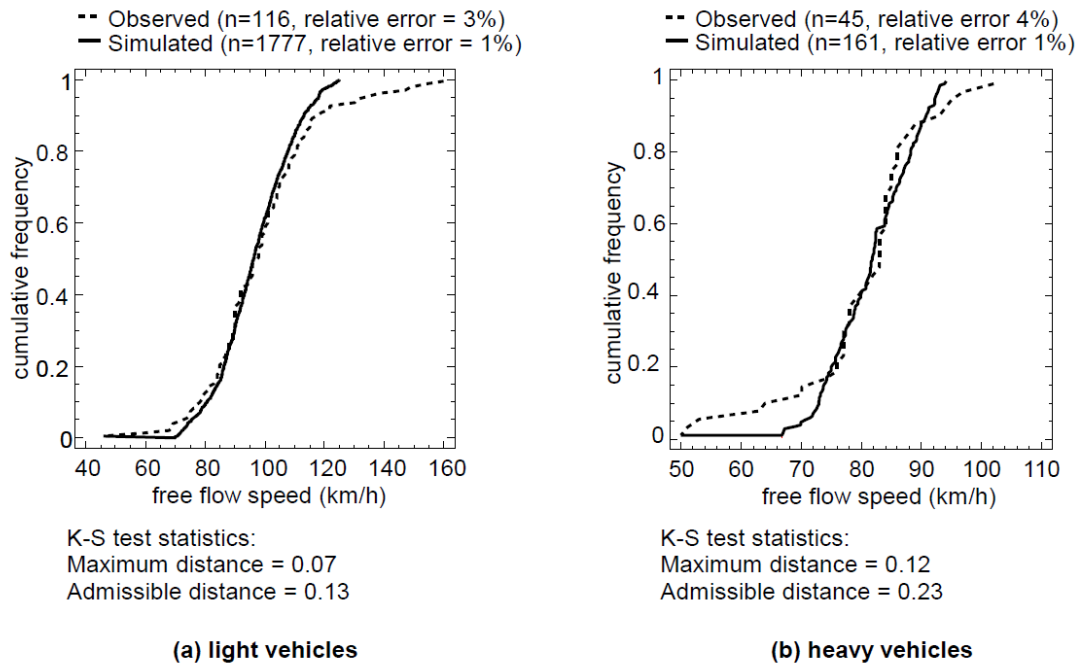


Figure 4. Desired speeds

To compare the observed and simulated distributions shown in Figure 4, the non-parametric Kolmogorov Smirnov (K-S) test was carried out. The null hypothesis implies that both samples come from the same distribution. The test computes the maximum distance between the cumulative distributions of them, without assuming normality in none of them. In this case, the p-value was 0.678 (light vehicles) and 0.658 (heavy vehicles), so the null hypothesis could not be rejected at the 95% confidence level and there was not a statistically significant difference between the observed and the simulated speed distribution. In the Figure, the relative error is the amplitude of the confidence interval divided by the mean.

5.1.2. Passing time (PT)

Passing time *PT* is the opposing lane occupation time. Passing time is the most significant passing maneuver variable, since it characterizes the time while the potential conflict with an opposing vehicle exists. The following analysis considers only simple maneuvers (one impeding vehicle).

The maximum vehicle acceleration was set as 4 m/s^2 , according the Aimsun default values. A sensitivity analysis evaluated the influence of car-following reduction factor (*RCF*), *PVSE* and *PVSE_{th}*. Decreasing *RCF* factor resulted in lower passing times. The value which minimized the difference between observed and simulated mean passing times was *RCF* = 0.65. After selection of these parameters, simulated and observed passing time distributions were compared, as shown in Figure 5. On the other hand, the influence on passing time of *PVSE* and *PVSE_{th}* was not significant. Their values were set according to the observed passing vehicle speed at the end of the maneuver (t_3). This assumed that passing vehicle speed at t_3 was the equal to Aimsun defined desired speed for passing. This assumption justified selecting *PVSE_{th}* of 15 km/h (only in less than a 5% of observed maneuvers the speed difference was under 15 km/h). On the other hand, *PVSE* was set at 1.1 as only a 5% of passing maneuvers ended with a speed over 110 km/h (being the speed limit equal to 100 km/h).

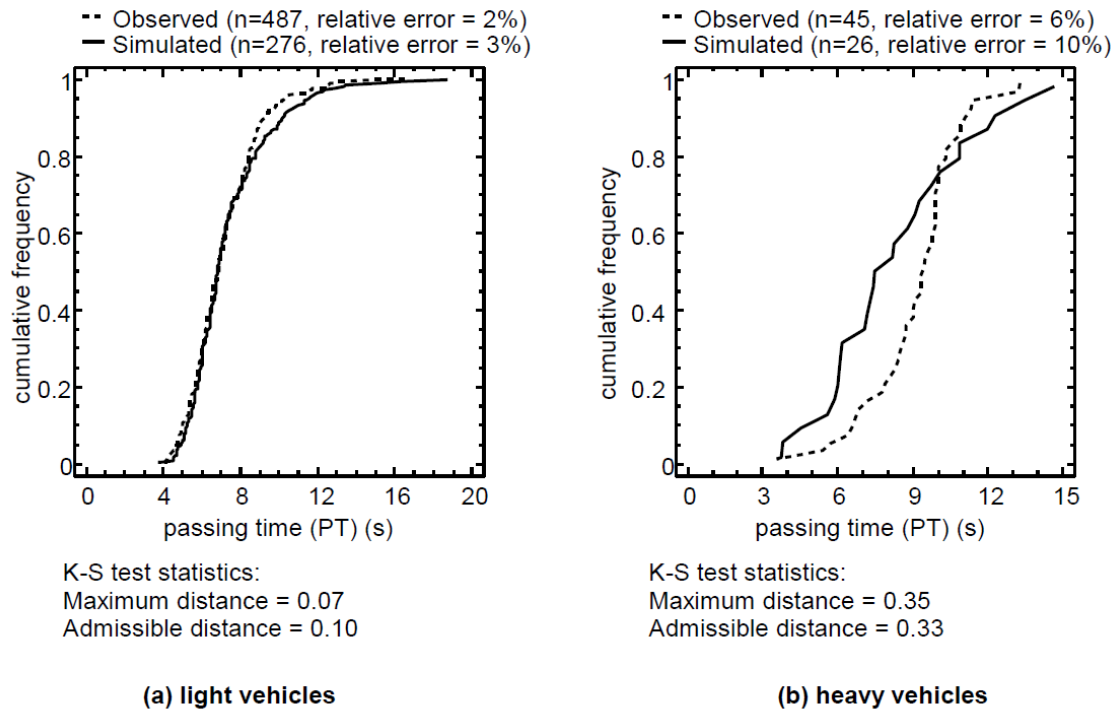


Figure 5. Passing time

The K-S test concluded that there were no statistically significant differences at the 95% confidence level between observed and simulated passing times PT , in the case of light impeding vehicle (p -value 0.377, accepting the null hypothesis). For heavy impeding vehicles, the observed and simulated times PT were different at the 95% level of confidence. As the only impeding heavy vehicles used in the data collection was a 16.5 m truck (upper length threshold in the simulation), the observed time distribution was slightly higher than the simulated.

5.1.3. Gap acceptance

The result of the passing decision is whether a gap in opposing traffic is accepted or not. A passing gap is the sum of passing time (PT) and time until crossing with the next oncoming vehicle, if it exists (denoted by t_4-t_3 , in Figure 1). The *safetymargin* parameter is for each individual driver the minimum acceptable time t_4-t_3 . However, the *safetymargin* parameter cannot be measured in reality. A minimum value of 1 s was chosen based on previous research (Hassan et al, 1996, Harwood et al, 2010) and on minimum observed t_4-t_3 . The maximum value was 10 s, as longer safety margins are not reasonable even with very conservative drivers. Thereafter, mean and standard deviation were selected by adjusting simulated and observed critical gaps (those with a probability of acceptance equal to 0.5).

To compare simulated and observed passing decisions, a probit binary choice model was defined. This model (Brlon et al. 1999) assumes a critical gap $t_{c,d}$ for each driver according to equation 2.

Equation 2

$$t_{c,d} = t_c + \varepsilon_d$$

where:

- $t_{c,d}$: critical gap for driver d.
- t_c : mean critical gap.
- ε_d : random error term.

The probability that a driver will accept a gap of size t is calculated as shown in equation 3.

Equation 3

$$Pa(t) = P(t > t_{c,d}) = \phi\left(\frac{t-t_c}{\sigma}\right)$$

where:

- $Pa(t)$: probability of acceptance of gap t .
- ϕ : standard normal distribution.
- t_c : mean critical gap.
- σ : standard deviation of critical gap distribution.

Assuming that the random error term is normal distributed with mean zero, the probit model is constructed. A probit model was estimated for both simulated and observed gap sample. As a result, the critical gap distribution came from a normal distribution with mean t_c and standard deviation σ . Both models were significant, according to Chi-Square tests, which compare the model with and without the selected variable (*Gap*). Adjusted R-squared coefficients were 46% (simulated) and 29% (observed). The mean critical gap for the observed sample was 17.9 s, being the standard deviation equal to 8.6 s. In the model, a mean *safetymargin* of 5 s provided the same simulated mean critical gap (17.8 s), being their dispersion lower (standard deviation equal to 5,8 s).

The previous analysis considered oncoming vehicle-limited and sight distance-limited passes. The difference between them is the visibility of the oncoming vehicle at the time the pass starts. Initially, this model is not able to distinguish both cases. In order to capture the different passing behavior in both cases, a sight distance factor (*SDfactor*) was defined in the model. The objective of this factor was to enlarge sight distance-limited gaps to have the same acceptance model as oncoming vehicle-limited gaps, but increasing their probability of acceptance. The size (in seconds) of sight distance-limited gaps in the reality is equal to the available sight distance at the decision station divided by the approaching relative speed (the sum of passing vehicle speed and opposing vehicle speed, assumed as speed limit) (Llorca et al. 2012).

Using the same probit model for observed gaps, but including an additional binary variable of visibility of opposing vehicles, the mean critical gap was 15.8 s gap for sight distance-limited maneuvers and 26.5 s for oncoming vehicle-limited maneuvers. This suggested that *SDfactor* was equal to its ratio, 1.75.

5.2. Macroscopic scale calibration

This analysis started with the selection of four passing zones as calibration scenarios. The four passing zones were 265, 505, 1,050 and 1,270 m long, which covered a wide range of this variable. Moreover, two observed traffic volume levels were selected: working days (directional

traffic flow of 140 vph and 21% HV) and Sundays (directional traffic flows of 335 vph and 2% HV).

These scenarios belong to road 7 (N-225, as previously described in Table 1). Zones 1 and 2 (Z1 and Z2) are at the same tangent, as well as Z3 and Z4. Z3 and Z4 are located west from Z1 and Z2, at a 500 m distance from them. Directional split is 50% each direction. Therefore, input traffic flow at the four zones is equal. Observed percent of followers depended on traffic volume (working day or Sunday). Table 3 summarizes traffic input observed variables.

Table 3. Calibration scenarios

Zone	Working day				Sunday				Available Sight Distance (m)
	Volume (vph) (mean)	Directional split	%HV(mean)	%FV (mean)	Volume (vph) (mean)	Directional split	%HV (mean)	%FV (mean)	
Z1	140	50/50	21%	26%	335	50/50	2%	51%	400
Z2				26%				51%	250
Z3				26%				51%	300
Z4				26%				51%	250

The sight distance at the end of each passing zone (*ASD*) was 400 m, 250 m, 250 m and 300 m, in Z1, Z2, Z3, and Z4, respectively.

The macroscopic scale calibration compared first the following traffic variables with the reality: input traffic volumes and percent of followers. After that, the comparison of number of passes in the selected scenarios was used to calibrate the passing desire parameters (*mindV*, *maxdV* and *delayTh*).

This analysis used an aggregation time interval of 15 min, according to Highway Capacity Manual recommendation (TRB, 2010). In these analyses *maxRank* value was equal to 2, since passing maneuvers involving more than two vehicles were rarely detected (less than 1% of cases). On the other hand, according to Spanish driving regulations, simultaneous maneuvers are not permitted. Therefore, *maxSimul* was equal to the unit and the value of *delaySimul* did not affected the simulation. Lastly, since this study analyzed only single passing zones, the influence of *remainingtimeTh* was not considered. This parameter was zero in the simulations.

5.2.1. Replications

In a microsimulation model, most of input variables are random values. A replication is the simulation of a scenario taking particular values of the input variables. In order to characterize the system behavior, it is necessary to simulate a certain number of replications. The higher the variability of this behavior, the higher the number of replications needed to estimate its average.

Equation 4 estimated the minimum number of replications assuming that all variables came from normal distributions, as proposed by Hollander and Liu (2008).

Equation 4

$$n > \frac{Z_{0.95}^2 \cdot s^2}{e^2}$$

where:

- n : minimum sample size.
- $Z_{0.95}$: t-statistic, for a 95% confidence level it is equal to 1.96.
- s : sample standard deviation.
- e : maximum error admitted. The confidence interval for the mean has a $2e$ amplitude.

Table 4 summarizes the results of this estimation. For the simulation, the sample mean and sample standard deviation were obtained after an initial set of 10 replications. In the case of the number of passes, all passing zones were analyzed separately and the table only shows the worst case. Number of passes was converted to the equivalent 1-hour interval, as it presented a very high dispersion.

(a) Estimation of the error of the observed sample			
Traffic volume	15-min traffic volume	15-min percent followers	1-hour number of passes
Low	47*		
High	19*		
maximum relative error in the observations (using equation 4)	8%	9%	17% (6 passes)
(b) Minimum number of replications to achieve a target 5% relative error			
Traffic volume	15-min traffic volume	15-min percent followers	1-hour number of passes**
Low	15***	15***	4***
High	6***	6***	15***
*the values represent sample size			
**the target error in number of passes was 4 passes (lower than in the observations), as a 5% would lead to a much higher number of simulations, especially in shorter zones where number of passes is low.			
***the values represent a minimum number of replications (using equation 4).			

Table 4. Samples size and number of replications

After the results of Table 4, the number of replications was fixed at 15. Once the 15 replications run, the error obtained from equation 4 was checked again.

Table 4 showed similar and reasonable maximum errors in the estimation of the mean of the macroscopic variables. The objective of the next sections was to adjust the simulated variables to the observed equivalent values.

5.2.2. Traffic input

Aimsun traffic volume value corresponds to the mean one-way traffic input volume at the modeled highway in vph. Headways between consecutive vehicles are randomly generated using an exponential function. Consequently, the actual vehicles entering the network are also randomly distributed.

The first step of the calibration compared the 15-min one-way traffic volume distributions of observed and simulated conditions. The K-S test showed no difference between observed and simulated distributions (accepting the null hypothesis at the 95% confidence level with p-values of 0.643 and 0.507, on working days and Sundays, respectively). This step did not involve any change in the model parameters.

5.2.3. Platooning

Vehicles form platoons while driving on two-lane rural highways, due to their speed dispersion. Faster vehicles enter in platoons behind slower vehicles, while passing is forbidden, limited by opposing traffic or simply not desired. The percent followers entering a passing zone depends on the geometry, operating speed, marking, and signing upstream the location. However, the calibration process carried out in this study considered only single passing zones. Therefore, the highway upstream with its passing zones was substituted by one no-passing zone segment.

The no-passing zone segment length depended on the traffic volume, and was fixed to generate the same percent followers (either the mean or the frequency distribution) entering the simulated passing zones as in the observed scenarios. In this case, the segment was 2300 m for working day conditions and 2800 m for Sunday conditions, since the percent followers was different in both cases. In this analysis, a vehicle was inside a platoon (in following-state) if its headway was under 3 s, according to common Highway Capacity Manual criterion (Transportation Research Board, 2010). K-S test showed that there were no differences between observed and simulated samples (accepting the null hypothesis at the 95% confidence level with p-values of 0.133 and 0.070, on working days and Sundays, respectively). This step only modified the length of the adjacent no-passing sections, without affecting the other passing model parameters.

5.2.4. Passing maneuvers

The previous steps have generated the traffic flow entering the selected passing zones, which was not statistically different from the observed. Then, it was verified whether the two-way passing model simulated realistically passing maneuvers.

This analysis compared the 1-hour number of passing maneuvers in single passing zones between the Aimsun model and the observations. Only completed maneuvers were considered. Aborted maneuvers represented less than 1% of cases, both in simulation and in the reality. The objective was to calibrate the parameters *delayTh*, *maxdV* and *mindV* that provided the minimum difference on number of completed passing maneuvers.

In order to obtain the value of the parameters that minimize the error in the number of passes in each passing zone, the root mean square error (*RMSE*) (Equation 5) was proposed as optimization criterion, as proposed by Hollander and Liu (2008).

Equation 5

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (NP_{obs,i} - NP_{sim,i})^2}{N}}$$

where:

- $NP_{sim,i}$: simulated number of passes at the scenario i
- $NP_{obs,i}$: observed number of passes at the scenario i
- N : number of calibration scenarios

A total of 3x3x3 calibration cases were simulated: three values of each parameter. The parameter $delayTh$ was 180, 240, 300 s, $mindV$ 5, 10, 15 km/h and $maxdV$ 30, 35 and 40 km/h.

The result of simulating each calibration case was the number of passes in eight passing zones (four zones with two traffic levels). These values were used to calculate $RMSE$. The calibration case with lower $RMSE$ was selected, as shown in Figure 6.

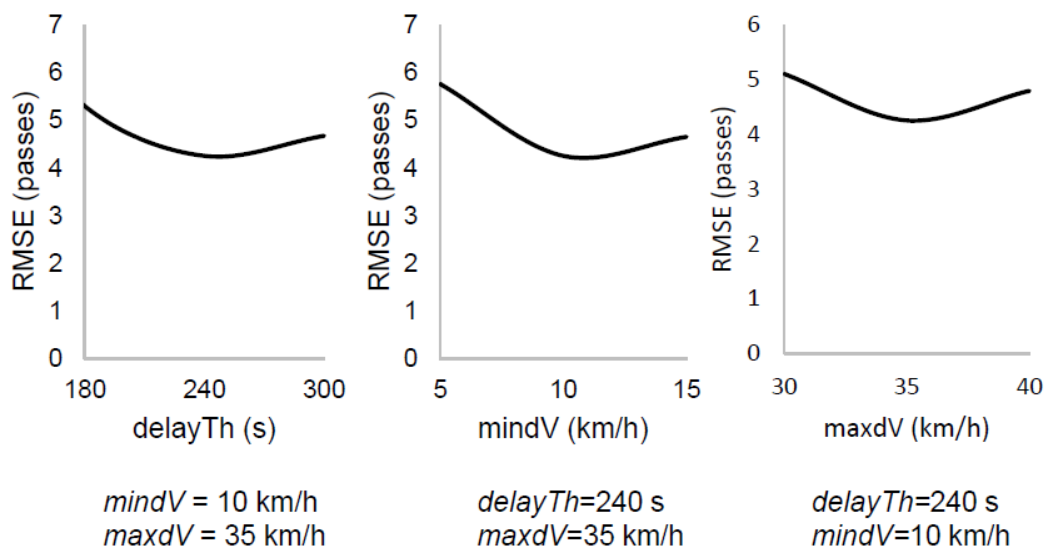


Figure 6. Calibration of passing desire parameters

As a result, the values of the parameters were $delayTh = 240$ s, $mindV = 10$ km/h and $maxdV = 35$ km/h. $RMSE$ was 4.2 passing maneuvers.

6. Validation

The objective of the validation is to apply the calibrated model to other scenarios. This step provides information about the ability of the model to represent a variety of situations, and not only the particular locations used for calibration.

The validation process tested the calibrated model in four different passing zones: with low (Z7) and high traffic volume (Z5), short (Z8) and long (Z6) passing zones and with different directional splits, percent followers and percent heavy vehicles. Table 5 summarizes the validation scenarios and the results.

Table 5. Validation scenarios and results

ZONES	Scenarios characteristics							Validation results		
	Volume (vph) (mean)	Directional split (mean)	%HV (mean)	%FV (mean)	Available Sight Distance (m)	Passing zone length (m)	Posted speed limit (km/h)	1-hour observed number of passes	1-hour simulated number of passes	Difference
Z5 (Rd. 8)	314	42/58	6%	29%	200	895	80	5.6	2.8	2.8
Z6 (Rd. 1)	164	52/48	18%	34%	550	1,765	100	25.0	23.4	1.6
Z7 (Rd. 6)	70	50/50	16%	30%	200	540	90	1.0	0.5	0.5
Z8 (Rd. 3)	145	50/50	16%	28%	200	265	100	0.5	1.1	-0.7
									RMSE	1.6

The validation started with the definition of input traffic flow according to observations. The next step established the no-passing zone length upstream to the analyzed passing zones. The same desired speed and speed acceptance distributions were considered, although posted speed limit varied in each validation zone.

Once entering flows were equivalent to the observations, the number of passes was estimated using the calibrated model. The number of replications was fixed again in 15. Table 5 shows the results.

The results of the validation showed that this model may also be applied to conditions significantly different to the calibration scenarios. The *RMSE* obtained was lower than in the calibration scene, having a value of 1.6 passes.

7. Conclusions

This study has developed a microsimulation model for two-way two-lane rural highways. The model incorporated 14 parameters, which allow the user to include and analyze the effect of human factor, road geometry and vehicle characteristics on car-following and passing maneuvers. Every part of the model was created based on the observation of car-following and passing maneuvers on a sample of 10 rural highways in Spain.

The study obtained the following conclusions:

1. Characterization of 1,752 maneuvers on 10 two-lane rural highways using two methodologies. It included both a microscopic description (based on passing time, passing speeds and gap acceptance decisions) and a macroscopic description (traffic flows, percent followers and number of passes). The data collection covered a wide range of passing zone lengths (100 to 1,855 m), design speeds (70 to 120 km/h) and traffic flows (one-way volumes from 52 to 740 vph).
2. Development of a modified car-following and a passing model for Aimsun microsimulation software. This model was divided into three stages: passing desire, passing decision and passing execution. The major innovations of this model in comparison with most of previous models, that reflect the observed driver behavior, were:
 - a. Global passing desire function which incorporates both the time spent following and the speed difference between desired speed and leader speed.
 - b. Effect of available sight distance on the gap acceptance process. Besides, the possibility to distinguish passing driver behavior facing sight distance-limited and oncoming vehicle-limited maneuvers.

- c. Possibility that passing vehicles increase their speed while passing over free flow desired speed. This speed enhancement is permitted by Spanish traffic regulations.
 - d. Effect of reducing passing desire when the remaining time until the end of the two-lane rural road segment is reduced.
 - e. Impact of reducing passing desire if the number of vehicles to pass increases.
3. Sensitivity factor to reduce car-following safety distance prior passing. Calibration of the model. The values of the model parameters were calibrated comparing the simulation results with the observational data. This study focused only on single passing zones. Calibration was divided in two stages:
- a. Microscopic scale, to adjust parameters affecting individual desired speeds, passing times and gap acceptance decisions. The results showed an adequate characterization of passing behavior, based on the comparison of simulated and observed frequency distributions and binary choice models.
 - b. Macroscopic scale, to adjust parameters affecting passing desire. The results show that the model adequately estimated the performance measures. The root mean square error in the estimation of 1-hour number of passes was 4.2.
- The conclusions of this calibration showed also the sensitivity of the parameters in the estimation of either microscopic or macroscopic passing variables.
4. Validation of the model. The model was applied to four other scenarios with a wide passing zone length and traffic flow range. The results provided a root mean square error of 1.6 in the estimation of the number of passes. This supported the validity of the model in the estimation of the number of passes in different types of passing zones.

The results of the calibration and validation for this model depended on the collected data; so, any extrapolation to other conditions and scenarios must be taken with care. Besides, the model was implemented and calibrated on single passing zones, so the interaction among passing zones and no-passing zones was not investigated.

The result of this study is a modified car-following and a passing model implemented in Aimsun software, which can estimate adequately the operation of single passing zones. In the future, a more complex calibration will be performed using longer two-lane rural road segments with multiple passing zones. A full sensitivity analysis should also be conducted. The comparison with data from other regions will contribute to set the value of certain parameters, improving model simplicity.

8. Acknowledgements

Data collection was part of the research project “Desarrollo de modelos de distancias de visibilidad de adelantamiento”, funded by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness, with reference number TRA2010-21736. Authors wish to thank Spanish General Directorate of Traffic, Spanish Ministry of Public Works, Valencia Regional Department of Transport and Valencia Province Road Department, for their collaboration in the field study.

9. References

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2004. A policy on geometric design of highways and streets, 5th edition. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, USA.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2011. A policy on geometric design of highways and streets, 6th edition. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, USA.

Barceló, J., 2010. Models, Traffic Models, Simulation and Traffic Simulation. In: Barceló, J. (Ed.), Fundamentals of Traffic Simulation, Springer Science+Business Media, New York, NY, USA, pp-1-62.

Bessa, J.E., Setti, J.R., 2011. Derivation of ATS and PTSF Functions for Two-Lane, Rural Highways in Brazil. In: 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, Stockholm, Sweden, Proccedia - Social and Behavioral Sciences, 16, 228-292.

Brilon, W.; Brannolte, U.: Simulation des Verkehrsablaufs auf Landstraßen. Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik" des BMV, Heft 239, Bonn, 1977

Brilon, W., Koenig, R., Troutbeck, R.J., 1999. Useful estimation procedures for critical gaps, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 33(3-4), 161-186.

Carlson, P.J., Miles, J.D., Johnson, P.K., 2006. Daytime high-speed passing maneuvers observed on rural two-lane, two-way highway findings and implications, Transportation Research Record, 2006, 9-15.

Dey, P., Chandra, S., Gangopadhyay, S., 2008. Simulation of Mixed Traffic Flow on Two-Lane Roads, Journal of Transportation Engineering, 134(9), 361-369.

Farah, H. 2011, Age and gender differences in overtaking maneuvers on two-lane rural highways. Transportation Research Record, 2248, 30-36.

Farah, H., Toledo, T., 2010. Passing behavior on two-lane highways. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 13(6), 355-364.

Federal Highway Administration FHWA, 2003. Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD), Federal Highway Administration, Washington DC, USA.

Gipps, P.G., 1981. A behavioural car-following model for computer simulation, Transportation Research Part B: Methodological, 15(2), 105-111.

Ghods, A.H., Saccomanno, F., 2013. Safety Implications of Truck/Car Speed Limits for Two-Lane Highway Operations. In: Transportation Research Board 92nd Annual Meeting, Washington DC, USA.

Harwood, D., May, A., Anderson, I., Leiman, L., Archilla, R., Capacity and Quality of Service of Two-Lane Highways. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington DC, USA.

Harwood, D.W., Gilmore, D.K., Richard, K.R., 2010. Criteria for passing sight distance for roadway design and marking. Transportation Research Record, 2195, 36-46.

Hassan, Y., Easa, S.M., Abd El Halim, A.O., 1996. Passing sight distance on two-lane highways: Review and revision, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 30(6), 453-467.

Hegeman, G., Tapani, A., Hoogendoorn, S., 2009. Overtaking assistant assessment using traffic simulation. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 17(6), 617-630.

- Hoban, C. J., R. J. Shepherd, G. J. Fawcett and G. K. Robinson, 1991. A Model for Simulating Traffic on Two-Lane Rural Roads: User guide and manual for TRARR version 3.2. Australian Road Research Board, Victoria.
- Hollander, Y.; Liu, R., 2008. The principles of calibrating traffic microsimulation models. *Transportation*, Springer Science and Business Media, LLC, 35, 347-362.
- Ištoka Otković, I., Tollazzi, T., Šraml, M., 2013. Calibration of microsimulation traffic model using neural network approach, *Expert Systems with Applications*, 40(15), 5965-5974.
- Jenkins, J. M., Rilett, L. R., 2004. Application of distributed traffic simulation for passing behavior study, *Transportation Research Record*, 1899, 11–18.
- Jie, L., Van Zuylen, H.V., Chen, Y., Viti, F., Wilmink, I., 2013. Calibration of a microscopic simulation model for emission calculation, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 31, 172-184.
- Khoury, J.E., Hobeika, A.G., 2012. Integrated Stochastic Approach for Risk and Service Estimation: Passing Sight Distance Application, *Journal of Transportation Engineering*, 135(5), 571-579
- Kim, J., Elefteriadou, L., 2010. Estimation of capacity of two-lane two-ways highways using simulation model. *Journal of Transportation Engineering*, 136(1), 61-66
- Li, J., Washburn, S.S., 2011. Implementing Two-Lane Highway Simulation Modeling into CORSIM1. In: 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, Stockholm, Sweden, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 16, 296-305.
- Llorca, C. Moreno, A.T., García, A., Pérez-Zuriaga, A.M., 2012. New approach on passing gap acceptance. In: *Transportation Research Board 91st Annual Meeting*, Washington DC, USA.
- Llorca, C. Moreno, A.T., García, A., Pérez-Zuriaga, A.M., 2013a. Daytime and Nighttime Passing Maneuvers on Two-Lane Rural Road in Spain, *Transportation Research Record*, 2358, 3-11.
- Llorca, C. Moreno, A.T., García, A., Pérez-Zuriaga, A.M., 2013b. Influence of age, gender and delay on overtaking dynamics, *IET Intelligent Transport Systems*, 7(2), 174-181.
- Llorca, C., García, A., 2011. Evaluation of passing process on two-lane rural highways in Spain with new methodology based on video data. *Transportation Research Record*, 2262, 42-51.
- Moreno, A.T., Llorca, C., García, A., Pérez-Zuriaga, A.M., 2013. Operational Effectiveness of Passing Zones Depending on Their Length and Traffic Volume, *Transportation Research Record*, 2395, 57-65.
- Polus, A., Livneh, M., Frischer, B. 2000. Evaluation of the passing process on two-lane rural highways. *Transportation Research Record*, 1701, 53-60.
- Stevanovic, A., Stevanovic, J. Kergaye, C., 2013. Optimization of traffic signal timings based on surrogate measures of safety, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 32, 159-178.
- Tapani, A., 2005. Versatile model for simulation of rural road traffic. *Transportation Research Record*, 1934, 169-178.

Transport Simulation Systems, 2013. TSS Aimsun Version 8.0.2 User Manual. Transport Simulation Systems, Barcelona, Spain.

Transportation Research Board, 2010. Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, Washington DC, USA.

Valencia Alaix, V.G., García, A. 2010. Procedures to facilitate passing on conventional highways by means of simulation. In: 4th International Symposium on Highway Geometric Design, Valencia, Spain.

10. List of Tables

Table 1. Data collection sites.....	7
Table 2. Summary of observed variables	8
Table 3. Calibration scenarios	18
Table 4. Samples size and number of replications.....	19
Table 5. Validation scenarios and results.....	22

11. List of figures

Figure 1. Field study layout and description of the passing maneuver	6
Figure 2. Passing desire	10
Figure 3. Model flowchart.....	13
Figure 4. Desired speeds	15
Figure 5. Passing time	16
Figure 6. Calibration of passing desire parameters	21

6. Llorca, C., Moreno, A.T., Sayed, T., García, A., 2014. Sight Distance Standards Based on Observational Data Risk Evaluation of Passing. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2404, 18–26. doi:10.3141/2404-03.

1 **ABSTRACT**

2 This paper presents an application of reliability analysis for evaluating the risk associated with
3 passing sight distance standards in terms of expected probability of noncompliance.

4 The calculation of passing sight distance (*PSD*) is required to determine where drivers
5 can safely execute passing maneuvers. Traditional *PSD* standards are based on deterministic,
6 theoretical models, which are calibrated using conservative percentiles values for uncertain design
7 inputs to account for uncertainty. They do not provide information about the risk of deviating
8 from them. Reliability analysis is a technique based on limit state design that accounts for the
9 propagation of variability from input random parameters to the design outputs.

10 A total of 1,098 passing maneuvers were observed on several two-lane highways in Spain,
11 using two different data collection methodologies: external observations and instrumented
12 vehicle. The most significant factors affecting *PSD* were: impeding vehicle speed, passing vehicle
13 acceleration, and headways between impeding and passing vehicles. A uniform acceleration
14 model described passing vehicle trajectory. The characterized input parameters and the passing
15 model were used to perform a reliability analysis. The results showed the probability of
16 noncompliance in different scenarios, defined as the proportion of cases where the required *PSD*
17 would exceed the available sight distance.

18 American and Spanish *PSD* standards were evaluated. Geometric design standards
19 presented a probability of noncompliance of about 0.15, while some of the marking standards had
20 probability of noncompliance exceeding 0.85. These standards may be associated with higher risk
21 levels if they were followed by drivers. As well, *PSD* risk levels were not consistent for different
22 design speeds, since they underestimate operating speed at some locations.

23

1 INTRODUCTION

2 Several researchers have noted that existing design guides provide a deterministic approach for
3 design requirements, using conservative percentile values for uncertain design inputs to
4 account for uncertainty. These conservative percentile values are not based on safety leading to
5 designs with unknown safety levels (1, 2). One example of the shortcomings of the deterministic
6 approach can be found in the case of existing guidelines for the required passing sight distance
7 (*PSD*). Passing sight distance is the sight distance required to pass safely a slower vehicle,
8 considering an oncoming vehicle approaching on the opposing lane. The existence of a certain
9 proportion of road length with sufficient *PSD* is necessary to determine the location of passing
10 zones. Passing maneuvers in these zones contribute to increase level of service, as faster vehicles
11 can travel at their own desired speeds without suffering delays.

12 Passing sight distance depends on many parameters, such as the speeds of the impeding
13 vehicle and the opposing vehicle, as well as the acceleration of the passing vehicle. The
14 knowledge about these parameters is imperfect, since they are stochastic and show a high
15 variability among drivers, traffic conditions or geographical locations. The problem of using the
16 traditional approach, based on the selection of conservative percentiles, is that it may result in the
17 definition of potentially too conservative design standards. As well, the deterministic approach
18 provides no information of the consequences of a deviation from the *PSD* design standards.

19 An alternative approach to account for uncertainty in the geometric design process is
20 reliability analysis. This approach is based on the limit state design procedure, used frequently in
21 structural engineering. This approach accounts the variability of design parameters, considering
22 them as stochastic variables defined by their probability distributions rather than single values. In
23 this approach, the system is considered to fail when the demand exceeds the supply.

24 Previous studies have analyzed risk levels of road design standards using reliability
25 analysis. In most cases, limit state functions were based on the guideline models, such as stopping
26 sight distance models (1,3).

27 This paper deals with the use of reliability analysis to evaluate passing sight distance
28 standards. The main elements of the paper are first, the formulation of a limit state function to
29 evaluate passing sight distance based on experimental observation of passing maneuvers on two-
30 lane rural roads, and second, the characterization of input variables from observational data.

31 PREVIOUS WORK

32 Passing sight distance

33 The use of *PSD* criteria in the design stage is required mainly to ensure a minimum percentage of
34 road length having sufficient passing sight distance. On the other hand, in the operation stage,
35 *PSD* marking criteria are used to determine where passing and no-passing zones are established.
36
37

1

Country - Standard		PSD(m) at reference speed (km/h)									Reference Speed
		40	50	60	70	80	90	100	110	120	
Spain 3.1 IC (2000) (4)		200	300	400	450	500	550	600			V_d
US AASHTO Green Book (2011) (5)		140	160	180	210	245	280	320	355	395	V_d
US AASHTO Green Book (2001) (6)		266	341	407	482	538	613	670	727	774	V_d
Spain 8.2 IC (1987) (7)	Start of passing zone (a)	145	180	225	265	310	355	395			V_M
	End of passing zone (b)	50	75	100	130	165	205	250			V_M
	Minimum passing zone length (c)	160	200	245	290	340	385	435			V_M
US MUTCD (2003) (8)		140	160	180	210	245	280	320	355	395	V_{85}

V_d : design speed, V_M : posted speed limit, V_{85} : 85th percentile of operating speed

2 **Table 1. PSD design and marking standards**

3 Table 1 provides *PSD* geometric design and marking standards for the US and Spain.
4 Generally, the values from Table 1 come from deterministic approaches, where safety risk has
5 not been taken into account and conservative percentiles of variables have been selected.

6 The previous US AASHTO *PSD* criterion (6) used an empirical model where passing
7 sight distance was equal to the sum of four components. *PSD* included the whole distance traveled
8 by the passing vehicle from the initial decision to pass as well as the distance travelled by the
9 opposing vehicle. The current US *PSD* geometric design standard (5) is the same as the marking
10 standard provided by MUTCD (8) based on research work of Harwood et al. (9). These studies
11 adapted MUTCD *PSD* values also for the design criterion. This was also supported on previous
12 analytical *PSD* models (10-12) which represented the passing sight distance required to complete
13 the maneuver starting at the critical position.

14 Spanish geometric design and marking criteria (4) were based on analytical models of the
15 maneuver, although no information about the model assumptions and input parameters is
16 provided in the guidelines.

18 Reliability analysis

19 The variability observed in standard *PSD* values was also found in research studies. Previous
20 research work have collected data of passing maneuver under naturalistic conditions, in order to
21 compare the existing standards with the observed behavior or to analyze other factors involved in
22 the passing process. Recently, some studies have recorded passing maneuvers from external
23 positions (13,14) as well as from instrumented vehicles (15,16). Some of these observations
24 showed that existing design criteria, such as the US previous AASHTO standard could be too
25 conservative. The high dispersion in all previous work suggested that the passing process presents
26 a high variability, related to geometric, behavioral or geographical factors. An alternative
27 approach to account for this variability is the use of reliability analysis to analyze and formulate
28 design standards.

29 There have been several studies using reliability analysis in road design to evaluate the
30 probability of collision at railway crossings (17), sight distance limitations (3,18,19), traffic signal
31 timing and intersection sight distance (20-22). Ismail and Sayed (1,2) defined a framework for
32 calibrating crest curves design standards. Ibrahim and Sayed (23) established a link between the
33 reliability index and collision frequency in horizontal curves, showing that probability of
34 noncompliance had a significant effect on safety performance function.

35 In particular, there have been only few applications of reliability analysis to the study of
36 passing maneuver. El Khoury and Hobeika (24,25) proposed a probabilistic approach to evaluate
37 risk index of AASHTO (6) and MUTCD (8) *PSD* design and marking standards. These studies

1 used a deterministic model (10) but they incorporated probability distributions for each input
2 variable. The model was applied to a single case using a Monte Carlo simulation to estimate the
3 risk level of each *PSD* value. El-Bassiouni and Sayed (26) evaluated risk of the AASHTO (6)
4 design standards. A 20 driver driving simulator experiment was used to calibrate the AASHTO
5 passing maneuver model. This study concluded that the previous AASHTO standard had a
6 probability of noncompliance of 18.7% at the design speed of 100 km/h.

7 Those studies have not been based on actual field passing maneuver observations, neither
8 to characterize the input parameters nor to verify passing model assumptions. They used
9 probabilistic distributions of input parameters based on a literature review or on a driving
10 simulator experiment, so the validity of results could be limited.

11 **OBJECTIVES**

12 The main goal of this study is the evaluation of the risk levels of passing sight distance design
13 and marking criteria using reliability analysis based on experimental data. The specific objectives
14 are:
15

- 16 • Formulation of a limit-state function for passing maneuver by modeling observational
17 data.
- 18 • Statistical characterization of input variables.
- 19 • Reliability analysis of passing maneuver at the selected scenarios.
- 20 • Evaluation of existing *PSD* criteria.
- 21 • A procedure to obtain *PSD* design criteria from a risk-based approach.

22 **METHODOLOGY**

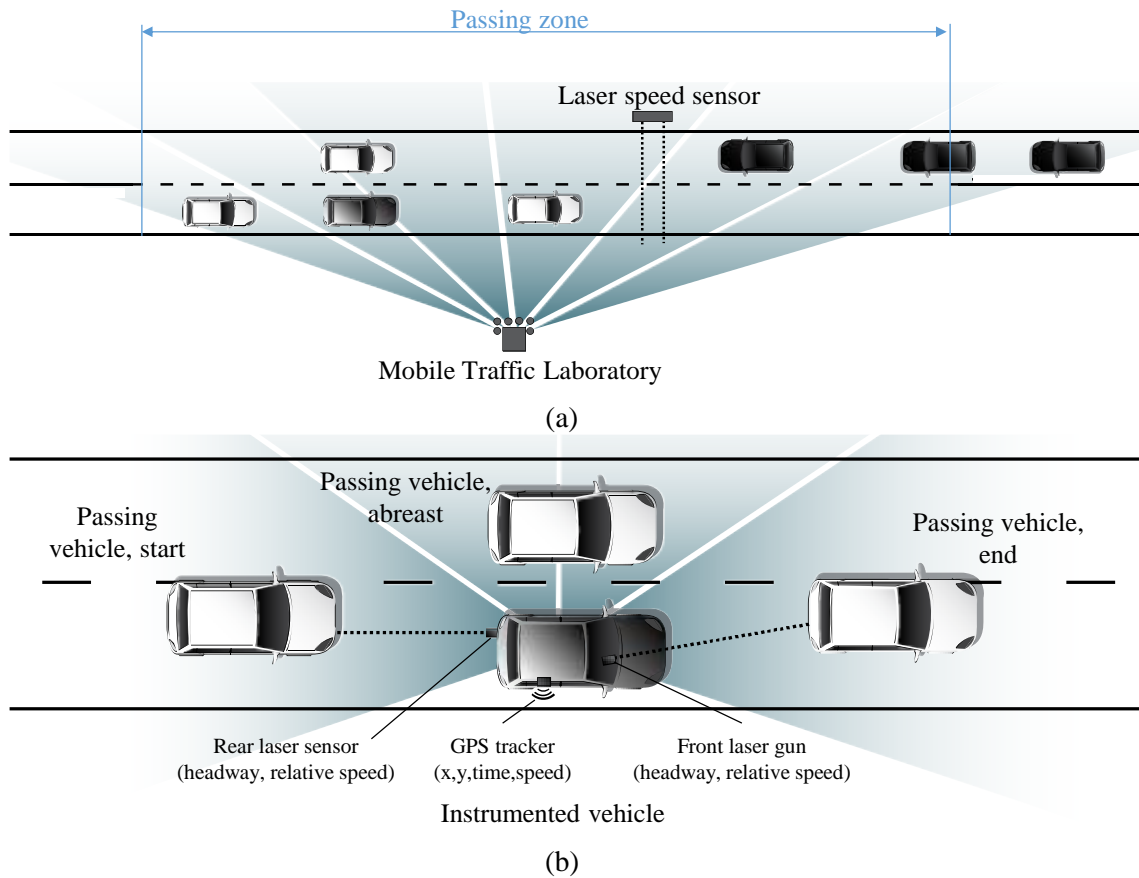
23 **Data collection**

24 The main contribution of this study was the characterization of the performance function and their
25 input parameters from observational data. Data collection has been based on video recording of
26 passing maneuvers under naturalistic conditions, which minimizes the influence of observers.
27 Two methodologies have been used to record passing maneuvers (14,16).

28 The first methodology (static) consisted of video recordings from external fixed positions.
29 Data was collected in 20 passing zones located in 10 two-lane rural highways segments in the
30 surroundings of Valencia (Spain). The mobile traffic laboratory of the Universitat Politècnica de
31 València (Spain) has six surveillance digital video cameras installed on the top of an elevator
32 platform. Zoom and focus of the cameras were adjusted on site to collect video images of entire
33 passing zones with uniform quality (Figure 1a). A total of 648 maneuvers were recorded in 20
34 passing zones. In 120 maneuvers, the speeds of impeding vehicles were characterized extracting
35 their trajectory from video data. In the same locations, the speed of 450 vehicles in free-flow
36 conditions was measured either from video data or with a LTI T100/T200 laser speed sensor.

37 The second methodology (dynamic) was based on an instrumented vehicle, which was
38 driven along various road segments, which included passing zones observed with the first method.
39 The objective was for other vehicles to pass the instrumented vehicle, collecting data of these
40 maneuvers and the entire following process (Figure 1b). The instrumented vehicle was equipped
41 with four 720x576 pixels resolution cameras, covering rear, left side and front of the vehicle, and
42 connected to a Racelogic VBOX recording unit, as well as with a high definition mini-camera
43 covering rear part. Two LTI True Sense S200 laser rangefinders were installed to measure
44 headways between vehicles behind and in front of it. Accuracy of the distance measurement was
45 4 cm. Measuring systems are very small and are installed inside the car (cameras and recording
46 units) or in front and rear bumpers (rangefinders). A 10 Hz GPS tracker registered the position
47 and speed of the vehicle. Instrumented vehicle speed was selected thanks to the observations of
48 the static methodology, which had been previously carried out. This speed was around the 15th
49 percentile of speed of impeding vehicles at this location, neither too fast nor too slow, balancing
50

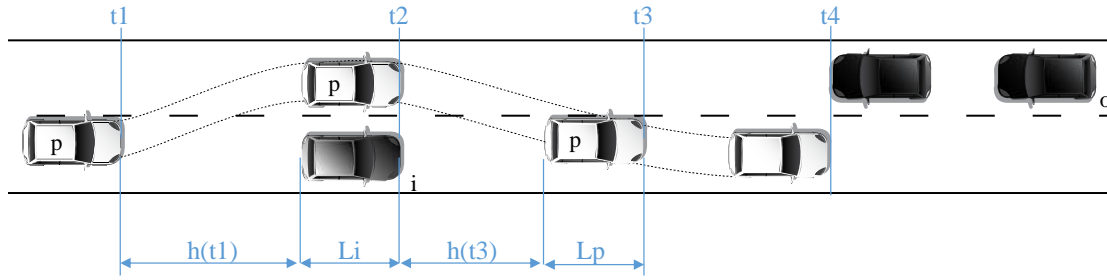
1 a realistic behavior and a high sample size. No unexpected maneuvers of drivers who follow the
 2 instrumented vehicle were observed, such as following without pass or with longer headways.
 3
 4



5 **Figure 1. Data collection methodologies: (a) static and (b) dynamic**

6 The instrumented vehicle data provided an accurate characterization of 450 passing
 7 vehicle trajectories. They were observed in 8 two-lane highway segments in the surroundings of
 8 Valencia (Spain). A homogeneous sample of 150 maneuvers was selected to characterize the
 9 passing vehicle trajectory. This sub-sample included simple maneuvers (only one impeding
 10 vehicle) performed by light vehicles (a passenger car or van). Using a combination of video, GPS
 11 and laser rangefinder data, following variables were measured (Figure 2):

- 12 • Starting time of passing maneuver: $t1$
- 13 • Abreast position time: $t2$
- 14 • Ending time of passing maneuver: $t3$
- 15 • Crossing time between opposing and passing vehicle: $t4$
- 16 • Headways at the start $h(t1)$ and end $h(t3)$ of passing maneuver.
- 17 • Speed of impeding vehicle: V_i
- 18 • Speed of passing vehicle at the start of the passing maneuver $V_p(t1)$ and at the end $V_p(t3)$
- 19



1
2 **Figure 2. Passing maneuver dynamic variables**

Variable	Units	Sample size	Minimum	Mean	SD	Maximum
d12(passing)	(m)	150	39.2	61.2	19.0	98.0
d13(passing)	(m)	150	114.1	163.8	42.0	241.6
t2-t1	(s)	150	1.7	2.9	0.9	4.6
t3-t1	(s)	150	4.8	7.1	1.8	10.1
h(t1)	(m)	150	3.4	7.5	3.7	13.5
Vp(t1)	(km/h)	150	58.6	71.1	10.4	89.3
h(t3)	(m)	150	10.0	21.1	8.2	35.7
Vp(t3)	(km/h)	150	73.0	88.8	11.1	109.2
Vi (dynamic method)	(km/h)	150	55.7	65.5	8.3	78.0
Vi (static method)	(km/h)	120	42.8	77.3	18.9	109.8
free-flow speed	(km/h)	450	63.0	90.1	18.0	120.1

3 **Table 2. Summary of data collection variables**

4 The length of passing and impeding vehicle L_i and L_p were obtained after identifying its
 5 brand and model. The selection of the previous variables followed previous research studies (9-
 6 15). These variables provided information about passing duration, passing speeds and distance
 7 traveled during passing. These are components of PSD . Table 2 presents the fundamental statistics
 8 of the observed and analyzed data.

9 **Reliability theory**

10 Reliability theory provides the analytical tools for accounting for variability of input parameters
 11 throughout the design process. The main target of reliability analysis is to determine the
 12 probability that a design element (the available sight distance, ASD) is within acceptable limits
 13 (the required passing sight distance, PSD).

14 The probability of failure is adopted as an indicator in several civil engineering
 15 disciplines. However, according to Ismail and Sayed (*I*), the term probability of noncompliance
 16 (P_{nc}) is more appropriate for road safety applications, since there is not any physical failure in
 17 those systems.

18 The reliability analysis is based on a performance function $G(X)$, where X is a N -
 19 dimensional vector of input parameters $X = x_1, x_2, \dots, x_n$. The performance function is defined such
 20 that it is positive for favorable system conditions. It is commonly written in terms of supply R and
 21 demand S (Equation 1). Therefore, if demand exceeds supply the function is negative and the
 22 system failure is produced.

$$23 \quad G(X) = R(X) - S(X) \quad (1)$$

1 In highway geometric design, the supply term is the provision of safe and comfortable
 2 driving conditions, such as available sight distance. On the other hand, demand depends on driver
 3 or vehicle requirements, such as stopping sight distance or passing sight distance. Randomness of
 4 the performance function is characterized by their probability density function $f(x)$. Equation 2
 5 gives the probability of noncompliance of the system.

$$6 \quad Pnc = P(G < 0) = \int_{G(X) < 0} f(x) dx \quad (2)$$

8
 9 The integral in equation 2 can be solved by numerical or analytical methods. Numerical
 10 methods are based on Monte Carlo simulation. This method starts with the generation of n -
 11 dimensional random vectors according to the normal probability function, which are transformed
 12 to the input parameter distributions in order to evaluate the performance function $G(X)$.
 13 Probability of noncompliance is the proportion of negative $G(X)$ cases of the total number of
 14 cases.

15 On the other hand, analytical analyses are based on different approximations of the
 16 performance function. First order second moment reliability method (FOSM) is based on the first-
 17 order Taylor expansion of the performance function at the mean values of the design inputs. First
 18 order reliability method (FORM) is based on the same first-order expansion but performed at the
 19 design point, so that non-normal input variables can be considered. The objective of the FORM
 20 method is the finding of the design point where function $G(X)$ is equal to zero. Highly nonlinear
 21 performance functions need to be solved using second order reliability methods (SORM),
 22 although this method is seldom needed in road safety applications (1). This study used FORM
 23 method, although some cases were solved using Monte Carlo simulation, for comparison
 24 purposes.

26 The Performance function

27 The limit state function (or performance function) of equation 3, was formulated as the difference
 28 between the system supply and the system demand, according to the reliability theory. In this
 29 case, the supply term was the available sight distance at a specific location (ASD), provided by
 30 road geometry. The demand was the required distance to complete a passing maneuver (PSD).

$$32 \quad G = ASD - PSD \quad (3)$$

34 For this analysis, the supply term ASD was selected as a constant depending on each
 35 analysis scenario. This facilitate the application of resulting PSD standards to ASD profiles
 36 obtained in reality. This ASD profiles may account not only for specific geometric elements (such
 37 as vertical or horizontal curves) but also for any type of sight distance obstruction. Analysis
 38 scenarios considered a wide range of ASD values (from 200 to 1100 m), which represented the
 39 majority of values measured in the data collection sites. On the other hand, the demand component
 40 was calculated as a function of the parameters which had a significant influence on PSD ,
 41 according to the calibrated model.

43 PSD model

44 According to its definition, passing sight distance is the sum of three components, as shown in
 45 equation 4.

$$47 \quad PSD = d13(passing) + d13(opposing) + d34(safety margin) \quad (4)$$

49 The first component is equal to the distance traveled by the passing vehicle on the left
 50 lane. The distance $d13(passing)$, as well as the required time $t3-t1$ were calculated using a uniform

1 acceleration model. According to this, passing vehicle accelerates with a uniform rate during the
2 entire left lane occupation time.

3 This model was selected among a variety of assumptions in the literature, such as uniform
4 speed (6), or uniform speed from critical point (10,11). Alternative models were also evaluated,
5 such as acceleration linear functions of time or speed. The model was calibrated using the
6 instrumented vehicle data. The calibration consisted in minimizing the square error between the
7 estimated and the observed value of the following variables, for each individual maneuver:

- 8 • distance travelled during the entire passing maneuver $d13$ (*passing*), in $t3-t1$ (m)
- 9 • distance travelled until the abreast position: $d12$ (*passing*), in $t2-t1$ (m)
- 10 • initial speed $Vp(t1)$ (m/s)
- 11 • final speed $Vp(t3)$ (m/s)

12
13 The results of the acceleration model calibration showed that the root mean square error
14 of the previous four variables was under 6% of their means. This model balanced low error
15 (compared to uniform speed, with root mean square errors up to 13%) and model simplicity
16 (compared to uniform speed form critical point model).

17 The second component of passing sight distance $d13$ (*opposing*) was assumed to be a
18 uniform movement of opposing vehicle during passing time, and the third component $d34$ (*safety*)
19 was calculated as the sum of distances travelled at uniform speed by the passing and the opposing
20 vehicle during a critical safety margin. Equations 5 to 8 were used to calculate the components of
21 PSD.

$$t3 - t1 = \frac{- (V_p(t1) - V_i) + \sqrt{(V_p(t1) - V_i)^2 + 2a(L_i + L_p + h(t1) + h(t3))}}{a} \quad (5)$$

$$d13 \text{ (passing)} = V_p(t1) \cdot (1 - \alpha) \cdot (t3 - t1) + \frac{1}{2} a \cdot (t3 - t1)^2 \cdot (1 - \alpha^2) \quad (6)$$

$$d13 \text{ (opposing)} = V_o \cdot (1 - \alpha) \cdot (t3 - t1) \quad (7)$$

$$d34 \text{ (safety margin)} = (t4 - t3)_{critical} \cdot (V_o + Vp(t3)) \quad (8)$$

23 where:

- 24 • $Vp(t1)$: initial passing vehicle speed (m/s)
- 25 • V_i : impeding vehicle speed (m/s)
- 26 • a : acceleration rate (m/s²)
- 27 • L_i and L_p : length of impeding and passing vehicles (m)
- 28 • $h(t1)$ and $h(t3)$: headway impeding-passing vehicle at $t1$ and $t3$ (m)
- 29 • α : proportion of passing time at the analysis point
- 30 • V_o : opposing vehicle speed (m/s)
- 31 • $(t4-t3)_{critical}$: time between end of passing maneuver and crossing with the opposing
32 vehicle (s)
- 33 • $Vp(t3)$: final passing vehicle speed, equal to $Vp(t1) + a \cdot (t3 - t1)$ (m/s)

34
35 Since the required PSD decreases during the maneuver progress (from its maximum at
36 the starting time until zero when it ends), the parameter α was included. It is defined as the
37 proportion of left lane occupation time $t3-t1$ at the analysis point. The start of a passing maneuver
38 corresponded to $\alpha=0$ (as passing has not yet started), while the critical point was assumed at $\alpha=0.5$.
39 A value of $\alpha=1$ would mean that the maneuver is already completed. The assumption of critical

point at $\alpha=0.5$ was similar to other models (10,11), and was necessary since the observation of aborted maneuvers was very unusual (observed 3 aborted and 1,098 completed).

Input Parameters

The speeds of both impeding and opposing vehicle were obtained from static observations. The opposing vehicle speed was assumed to be equal to the free-flow operating speed because opposing vehicles drive in this condition. The speeds came from a normal distribution, at the 95% confidence level (Chi-square test) and were different for each design speed level.

Average vehicle lengths from a previous study (14) were assigned to each vehicle category to obtain the lengths distribution. The analysis considered both heavy and light impeding vehicles, but only light passing vehicles, according to observations.

Table 3 shows the *PSD* model parameters. Distribution fitting was significant at the 95% confidence level according to Chi-Square tests.

Variable		Units	distribution	mean	SD
Passing vehicle relative initial speed	$Vp(t1)/Vi$	-	lognormal	1.10	0.05
Acceleration rate	a	m/s ²	lognormal	0.77	0.47
Headway passing-impeding at start	$h(t1)$	m	lognormal	9.61	5.65
Headway passing-impeding at end	$h(t3)$	m	lognormal	23.88	9.58

Table 3. Passing vehicle acceleration model variables

The safety margin, or clearance time, was estimated from instrumented vehicle collected data. However, experimental data provided only the time between the end of passing maneuver and the crossing with the next opposing vehicle, named previously $t4-t3$. This time should not be identified with the critical safety margin since it includes many different situations, including both forced and not forced passing maneuvers. In consequence, their distribution include very high values which are not reflecting the critical value necessary to estimate a minimum *PSD* requirement. Based on the agreement found on previous research on passing maneuver (9-11), a critical value of 1 second is recommended. This value was chosen also since it is low percentile of a 160-maneuvers sub-sample of observed $t4-t3$, ranging between 0.8 and 20.0 s. In this case, the use of a statistical distribution was discarded, because it would have caused the existence of negative (i.e. with normal distribution) or very small values (i.e. with lognormal), which are not realistic.

After the individual characterization of passing variables, a statistical analysis was done to analyze possible correlations among the previously defined variables. Correlation coefficients were under 0.4, and consequently, they were not included in the analysis.

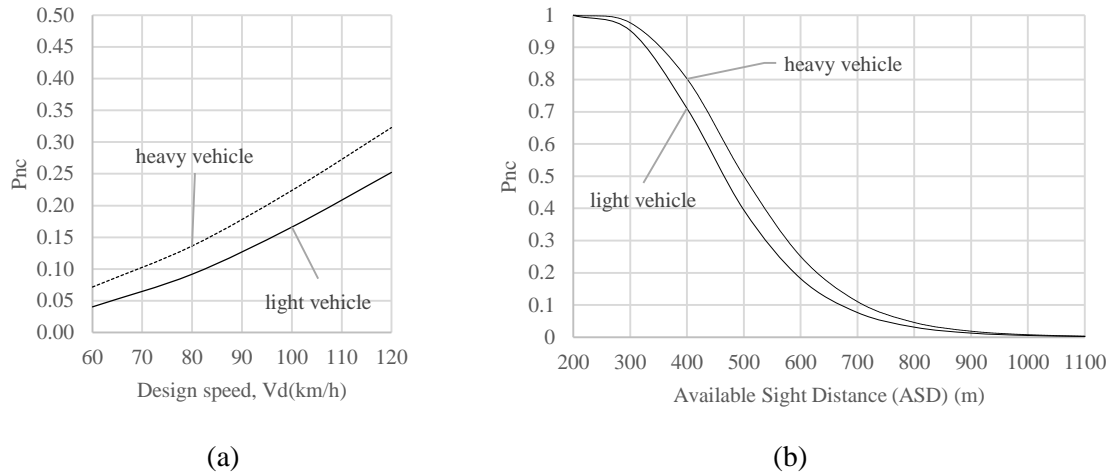
ANALYSIS AND RESULTS

In this study, first-order reliability method (FORM) has been used, since most of the input variables do not follow a normal distribution and the design model is nonlinear. However, to verify the adequacy of FORM method, it was compared with Monte Carlo simulation. Sampling analysis does not make any linearization of the performance function. Therefore, if significant differences were found between sampling and FORM analysis, the linear expansion of the performance made by the FORM method would not be valid.

The Monte Carlo sampling analysis was performed in a part of analysis scenarios: design speed equal to 100 km/h and different *ASD* and impeding vehicle types. A 2% target coefficient of variation of the probability of noncompliance was reached in less than 100000 samples. Results of FORM and Montecarlo analyses were compared. The results were very similar (85% of cases

1 with differences under 5% in the probability of noncompliance and 60% under 1%). This can
 2 support the FORM linear approximation around the design point. This conclusion is similar to
 3 other studies, which applied FORM analysis to similar reliability problems (1,26).

4 In order to compare and review the different existing *PSD* criteria, different scenarios
 5 have been analyzed. The selection of different analysis conditions covered the whole range of
 6 situations where data was collected as well as where existing *PSD* standards can be applied. As a
 7 result, a total of 4 design speeds (from 60 to 120 km/h), 10 available sight distances (from 200 to
 8 1100), 2 types of impeding vehicle (heavy and light vehicles) and 2 positions in the passing
 9 maneuver ($\alpha=0$ – start and to $\alpha=0.5$ – critical position) have been analyzed.



11 **Figure 3. Vd, ASD and impeding vehicle type effect on P_{nc}**

12 As shown in Figure 3, P_{nc} increases with higher design speeds, given a fixed sight distance
 13 (ASD). On the other hand, P_{nc} decreased when available sight distance (ASD) increased, since
 14 longer available sight distances are associated with safer conditions. Between 300 and 700 m
 15 ASD, probability of noncompliance decreased faster, so any variation of ASD lead to a significant
 16 decrease in P_{nc} . If the impeding vehicle was a heavy vehicle the probability of noncompliance
 17 was higher, due to the difference in length.

18 In FORM analysis, importance vectors are intended to reveal the relative importance of
 19 input parameters. The *Alpha-vector* is an importance vector for input random variables. The
 20 higher the absolute value of its components α_i , the more important random variable i is. The
 21 results showed that the variables with a higher influence on the value of the probability of
 22 noncompliance were the acceleration and initial speed of passing vehicle, as well as the headway
 23 $h(t_3)$ at the end of the maneuver.

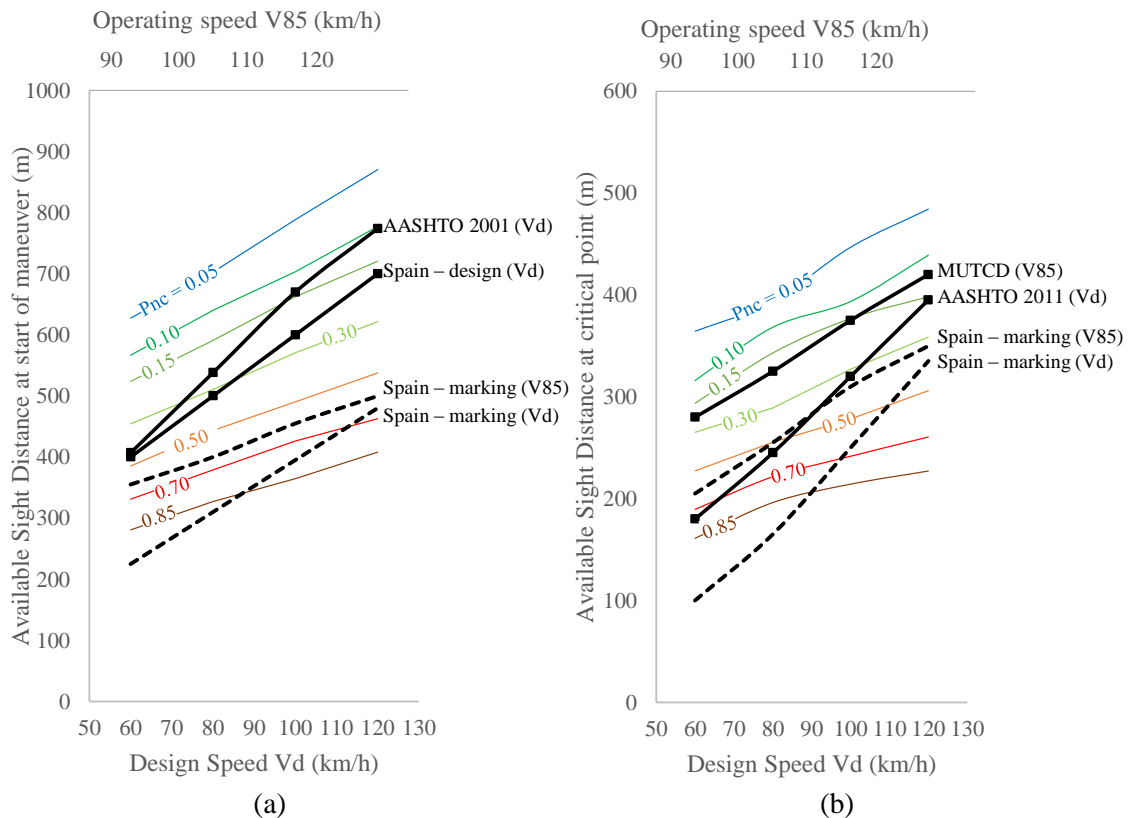
25 **PSD standards risk evaluation**

26 The reliability analysis has been applied to all of the selected scenarios, in order to provide a risk
 27 measure of different *PSD* standards. Risk has been characterized by the value of the P_{nc} . The
 28 higher the P_{nc} , the higher the potential risk drivers should expect if they followed the standard. It
 29 should be noted that data was collected at different locations in Spain. Therefore, the comparison
 30 with US standards should be considered with caution, as US criteria were never applied on the
 31 observed roads.

32 Reference speed of each *PSD* standard was either the design speed (V_d) or the 85th
 33 percentile of operating speed (V_{85}) at the observed locations.

34 Figure 4a represents the probability of noncompliance of different US and Spain existing
 35 design and marking criteria. These standards are based in the *PSD* at the starting point of a passing
 36 maneuver.

1



2 **Figure 4. P_{nc} of existing criteria: (a) at the starting point and (b) at the critical point**

3 Figure 4b shows the probability of noncompliance of the criteria based in the required
 4 PSD at the critical point. This is the case of the current AASHTO design standard (5), as well as
 5 the equivalent MUTCD (8) and the Spanish marking standard (7) used to establish the end of
 6 passing zones.

7 There are significant differences among different PSD standards, as well as different
 8 design and operating speeds. Generally, design criteria had a lower P_{nc} , especially at design speeds
 9 over 90km/h (corresponding to 85th percentiles of operating speeds over 110 km/h).

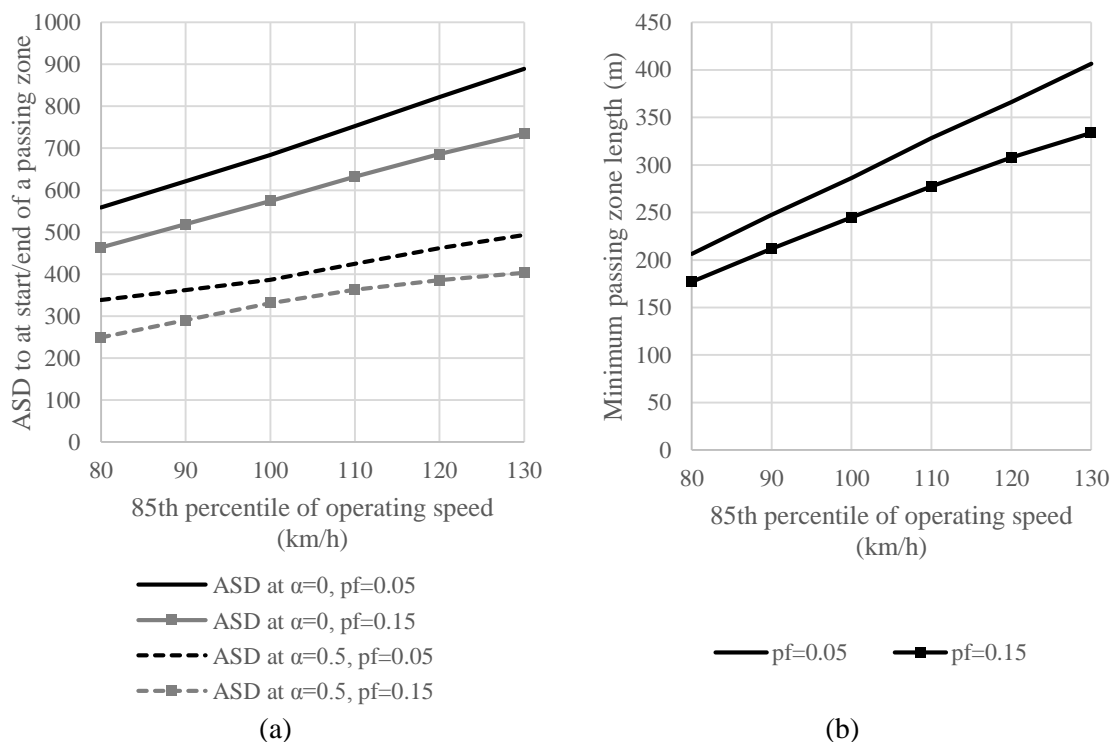
10 Although current AASHTO and MUTCD criteria use the same passing maneuver model,
 11 they provided different results since they are applied using design and operating speed,
 12 respectively. Operating speed-based standards showed a lower probability of noncompliance.
 13 Generally, the use of 85th percentile of operating speed determines a more consistent risk level
 14 (the same risk at different speeds). The reason is that design speed usually underestimates the
 15 operating speed, especially at lower design speed segments which have long tangent sections
 16 where passing is permitted.

17 On the other hand, Spanish marking standard (8.2 IC) showed the higher probability of
 18 noncompliance, either at starting of passing maneuver or at the critical point. This may be
 19 associated with a high-risk level if drivers followed the standard. However, a more common
 20 consequence is that drivers do not pass other vehicles where available sight distance is close to
 21 the standard requirement.

23 Framework for new PSD standards

24 The objective of this section is not to determine a new PSD criteria (since it would require a more
 25 extensive data collection including crash data, as well construction or accident-related costs). A
 26 procedure to formulate PSD standards based on reliability analysis would have the following
 27 steps:

- 1 1. Selection of a target probability of noncompliance (P_{nc}). In this case, 5% and 15% were
- 2 chosen for demonstration, in order to provide a guideline on how to address the *PSD*
- 3 standard formulation.
- 4 2. Selection of an operating speed, either measured (for existing roads) or estimated (for
- 5 new roads, based on estimation models (27)). The use of design speed should be avoided,
- 6 because it may underestimate operating speed on longer tangents. The reason of this is
- 7 that design speed is taken from the minimum horizontal curve radii (or vertical curve
- 8 curvature rate), which does not reproduce the speed on long tangents where passing zones
- 9 are located. Moreover, speed limit does not estimate adequately the operating speed of
- 10 vehicles in long sections, as measured in the data collection.
- 11 3. Selection of the required *PSD* based on reliability analysis results (Figure 4). The
- 12 application of the 5% and 15% P_{nc} levels to different operating speeds is shown in Figure
- 13 5.
- 14



15 **Figure 5. Sight distance requirement at start and end of passing zones. Minimum passing**
 16 **zone length requirements.**

17 The solid lines in Figure 5a show the values of required *PSD* at the starting point of the

18 maneuver, determined from Figure 4a. They indicate the starting point of the passing zone (where

19 *ASD* exceeds that *PSD*). If these standards were used to determine the end of the passing zone,

20 they would be very conservative, since no left lane occupation is permitted after this point,

21 according to most international driving regulations.

22 In contrast, the dashed lines in Figure 5a show the sight distance necessary to start a non-

23 passing zone (they were obtained from Figure 4b). This approach less conservative but still safe,

24 since there is a buffer area where drivers can complete the maneuver safely but not legally. In

25 addition, the length of passing zones should be, at least, the distance traveled on left lane by

26 passing vehicle. This distance (shown in Figure 5b) has been calculated from equation 6, using

27 the same model that in the reliability analysis. The input parameters vector X at the point where

28 $G(X)=0$ was used. Those values provided the $d13$ value, which was consistent with the selected

29 probability of noncompliance.

1 It should be noted that in Figure 5, only light impeding vehicles were considered. Finally,
2 there is not any reason to use different standards for geometric design and marking. The adequacy
3 of these standards to each location would depend on the quality of both sight distance and
4 operating speed accuracy, on either the design or the operation phase.

6 **CONCLUSIONS**

7 This study developed a reliability analysis on passing sight distance, based on observation of
8 maneuvers in a sample of Spanish two-lane roads. The application of this tool to the evaluation
9 of passing sight distance may account for existing variability and for the risk of deviating from
10 design and marking standards. Although previous work (24-26) have already performed reliability
11 analyses for this application, input parameters were not characterized from real data.

12 The main methodological conclusions of this paper are as follows:

- 13 1. Observation of 1,098 passing maneuvers in two-lane rural roads in Spain using two recently
14 developed methodologies.
- 15 2. Calibration of a model to describe passing vehicle trajectory on the opposing lane, based on
16 field data. Characterization of input parameters by their statistical distributions.
- 17 3. Formulation of a performance function based on observational data.
- 18 4. Reliability analysis at different scenarios: design speeds from 60 to 120 km/h and available
19 sight distances from 200 to 1100 m.

20
21 This method was applied to estimate the risk level (in terms of probability of
22 noncompliance) of Spanish geometric design and marking standards. The results of this analysis
23 were:

- 24 1. The current Spanish design standard showed relatively low probability of noncompliance
25 (between 0.15 and 0.30).
- 26 2. The Spanish marking standards had a higher probability of noncompliance (over 0.85 at lower
27 design speeds).
- 28 3. Generally, standards did not present consistent levels of probabilities of noncompliance
29 among different speeds. They show higher risk level at low design speed. The reason of this
30 may be related to the inaccurate estimation of operating speed by design speed, especially at
31 locations with lower design speeds.
- 32 4. Consequently, marking standards might be associated with risky situations if drivers followed
33 them. On the other hand, design standard might be conservative, since the expected
34 probability of noncompliance was 0.15 at high design speeds.

35
36 As a result, a consistent risk-based approach for PSD standards was developed. This
37 approach starts with the selection of a target probability of noncompliance. The estimation or
38 measurement of input parameters at a specific location (such as operating speed and impeding
39 vehicle length and speed) is used to estimate the required PSD that satisfies the target probability
40 of noncompliance. Therefore, uniform risk levels may be expected at every location.

41 Further work is needed in order to establish a link between the probabilities of
42 noncompliance, and other safety measures, such as crash data or traffic conflicts. This will be
43 necessary to determine the most adequate values of the target probability of noncompliance, in
44 order to develop reliable risk-based standards.

46 **ACKNOWLEDGMENTS**

47 This paper has been developed as a result of a mobility stay at the University of British Columbia
48 (UBC) funded by the Erasmus Mundus Program of the European Commission under the
49 Transatlantic Partnership for Excellence in Engineering – TEE Project.

50 The authors would like to thank Spanish Ministry of Economy and Competitiveness that
51 subsidizes the research project with reference code TRA2010-21736, and Spanish General

1 Directorate of Traffic, Spanish Ministry of Public Works, Valencia Regional Department of
2 Transport and Valencia Province Road Department, for their collaboration during the field study.
3

4 REFERENCES

- 5 1. Ismail, K., Sayed, T., 2009. A risk-based framework for accommodating uncertainty in
6 highway geometric design. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 36, No. 5, 2009,
7 pp. 743-753
- 8 2. Ismail, K., and Sayed, T. Risk-based Highway Design: Case Studies from British
9 Columbia, Canada. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation*
10 *Research Board* Vol 2195, 2010, pp. 3-13
- 11 3. Richl, L. and Sayed, T. Evaluating the safety risk of narrow medians using reliability
12 analysis. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 132, No. 5, 2006, pp. 366-375
- 13 4. Ministry of Public Works, Spain. Instrucción de Carreteras 3.1 IC "Trazado", 2000
- 14 5. American Association of State Highway and Transportation Officials, A Policy on
15 Geometric Design of Highways and Streets, Fifth Edition, Washington, DC, 2001
- 16 6. American Association of State Highway and Transportation Officials, A Policy on
17 Geometric Design of Highways and Streets, Sixth Edition, Washington, DC, 2011
- 18 7. Ministry of Public Works, Spain, Instrucción de Carreteras 8.2 IC "Marcas viales", 1987
- 19 8. Federal Highway Administration, US, Manual on Uniform Traffic Control Devices for
20 Streets and Highways, 2003
- 21 9. Harwood, D. W., Gilmore, D. and Richard, K., Passing Sight Distance Criteria for
22 Roadway Design and Marking, *Transportation Research Record: Journal of the*
23 *Transportation Research Board*, Vol. 2195, 2010, pp 36-46
- 24 10. Glennon, J. New and improved model of passing sight distance, *Transportation Research*
25 *Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1195, 1988, pp. 55-69
- 26 11. Hassan, Y., El Halim, A. and Easa, S.M., Passing sight distance on two-lane highways:
27 review and revision, *Transportation Research. Part A*, Vol. 30, No. 6, 1996, pp. 453-467
- 28 12. Wang, Y. and Cartmell, M., New Model for Passing Sight Distance on Two-Lane
29 Highways, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 124, 1998, p. 536
- 30 13. Polus, A., Livneh, M. and Frischer, B., Evaluation of the passing process on two-lane
31 rural highways, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation*
32 *Research Board*, Vol. 1701, 2000, p. 53
- 33 14. Llorca, C and García, A., Evaluation of Passing Process on Two-lane Rural Roads in
34 Spain using a New Methodology Based on Video Data, *Transportation Research Record:*
35 *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2262, 2011, pp. 42-51
- 36 15. Carlson, P. J., Miles, J.D., and Johnson, P.K., Daytime High Speed Passing Maneuvers
37 observed on Rural Two-Lane, Two-Way Highway: Findings and Implications,
38 *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, Vol. 961,
39 2006, p. 9
- 40 16. Llorca, C., Moreno, A.T., García, A., Perez, A.M. Observations of daytime and nighttime
41 passing maneuvers on a two-lane rural road in Spain. *Transportation Research Record:*
42 *Journal of the Transportation Research Board*, 2013
- 43 17. Faghri, A. and Demetsky, M.J., Reliability and risk assessment in the Prediction of
44 Hazards at Rail-Highway Grade Crossing. *Transportation Research Record: Journal of*
45 *the Transportation Research Board*, Vol. 1160, 1988, pp. 45-51
- 46 18. Navin, F., Safety factors for road design: can they be estimated? *Transportation Research*
47 *Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1280, 1990, pp. 181-189
- 48 19. Navin, F., Safe road design as limit state. *Proceedings of the Conference, Strategic*
49 *Highway Research Program and Traffic Safety on Two Continents*, Part Two, 1991
- 50 20. Easa, S.M., Reliability-based design of intergreen interval at traffic signals. *Journal of*
51 *Transportation Engineering*, Vol. 19, No. 2, 1993, pp 225-271
- 52 21. Easa, S.M., Reliability-based design of sight distance at railroad grade crossings.
53 *Transportation Research Part A-Policy and Practice*, Vol. 28, No. 1, 1994, pp. 1-15

- 1 22. Easa, S.M., Reliability approach to Intersection Sight Distance design. *Transportation*
2 *Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1701, 2000, pp.
3 42–52
- 4 23. Ibrahim, S., and Sayed, T. Developing safety performance functions incorporating
5 reliability-based risk measures. *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 43, 2011, pp.
6 2153-2159
- 7 24. El Khoury, J., and Hobeika, A., Assessing the Risk in the Design of Passing Sight
8 Distances. *Journal of Transportation Engineering* Vol.133, 2007, p. 370
- 9 25. El Khoury, J., and Hobeika, A. Integrated Stochastic Approach for Risk and Service
10 Estimation: Passing Sight Distance Application. *Journal of Transportation Engineering*,
11 Vol. 138, No. 5, 2012, p. 571
- 12 26. El-Bassiouni, S and Sayed, T., Design Requirements for Passing Sight Distance: A Risk-
13 based Approach, *Presented at Transportation Research Board 89th Annual Meeting*,
14 Washington DC (US) 2010.
- 15 27. Kim, S. and Choi, J. Effects of preceding geometric conditions on operating speed
16 consistency of multilane highways, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 40, No.
17 6, 2013, pp. 528-536.

7. Llorca, C. Moreno, A.T. and García, A. Modeling vehicles acceleration during passing maneuvers. To be sent to journal.

Modeling vehicles acceleration during passing maneuvers

Carlos Llorca

PhD Candidate

Highway Engineering Research Group

Universitat Politècnica de València

Camino de Vera s/n 46022, Valencia (Spain)

+34 96 3877374

carloaga@cam.upv.es

Ana Tsui Moreno

PhD Candidate

Highway Engineering Research Group

Universitat Politècnica de València

anmoch@cam.upv.es

Alfredo Garcia

Professor

Highway Engineering Research Group

Universitat Politècnica de València

agarciag@tra.upv.es

Abstract

Passing maneuver is a key issue in the design and marking of two-lane rural roads. These roads must provide sufficient passing sight distance at certain locations. This improves level of service, avoiding interferences between slow and fast vehicles. The determination of the values of passing sight distance has been widely studied in the past. Many different models were proposed, but only a very few were compared with observations. This study proposes a deep analysis on passing vehicle trajectories, based on field data. Data of 151 maneuvers were collected using an instrumented vehicle, equipped with two laser rangefinders, a GPS tracker and 5 video cameras. Other vehicles passed the instrumented car under normal traffic conditions. The method was able to characterize trajectories in three control points: at the start of the maneuver, at the abreast position and at the end. Up to six different models (including uniform speed, uniform acceleration and variable acceleration) were calibrated with these data, both for accelerative and flying passes. The models parameter distributions and their error were analyzed. This resulted in a more accurate description on the passing vehicle trajectory. Generally, it was detected that drivers started to accelerate before changing to the opposing lane. Most of them reached their maximum speed at the end of the maneuver, although the acceleration rate decreased along time. The mean acceleration rate was under 1 m/s^2 in 77% of cases. These models can be applied to estimate passing sight distance, to perform reliability analysis and probabilistic modeling of passing or to develop and improve microsimulation models.

1. Introduction and background

On two-lane rural roads, vehicles travelling at slower speeds cause delays to faster vehicles. Passing maneuvers allow faster drivers to travel at their own desired speed minimizing these delays. However, it is necessary to occupy the opposing lane to pass a slower vehicle. Therefore, there is an interaction with the opposing traffic that has both operational and safety implications.

The severity of accidents related to passing maneuvers is usually higher than in other maneuvers (Molinero et al., 2008). Drivers make passing decisions according to their own behavior and experience, as well as to road and traffic perception. To complete a passing maneuver, the passing vehicle must increase its speed in order to pass a slower vehicle and return to the right lane. At the same time, an opposing vehicle could be approaching at a relatively high speed. The potential collision risk during the time the left lane is occupied makes driving behavior different from other conditions, such as free-flow or following situations.

To ensure road safety, passing is only allowed in the zones where available sight distance is higher than the required passing sight distance (PSD). PSD is defined as the distance required to complete a passing maneuver when an opposing vehicle is approaching. PSD has been traditionally estimated using different passing maneuver models. The assumptions of those models, especially in relation to the passing vehicle acceleration, vary significantly and are not verified with field data.

In some cases, speed of passing vehicle was assumed uniform during the left lane occupation time (American Association of State Highway and Transportation Official, 2004), although an acceleration stage was identified before occupying the left lane. That model proposed average acceleration rates of 0.62 m/s^2 . Other approaches have used more complex kinematic equations, in order to describe passing vehicle trajectories (American Association of State Highway and Transportation Official, 2011; Federal Highway Administration, 2009; Glennon, 1988; Hassan et al., 1996). Those models usually have suggested the existence of a critical point. After the critical point, it is better to complete the passing maneuver rather than to abort it. According to these models, the passing vehicle accelerates at a constant rate until the critical position and after that position; speed is constant and equal to the design speed. Alternative models, vary from uniform acceleration models (Rocci, 1998) to different uniform acceleration models depending on whether a final speed was reached or not (Wang and Cartmell, 1998), or acceleration models that decreased linearly as speed increased (Lieberman, 1982).

On the other hand, some authors accounted uncertainty in the passing process using reliability analysis or simulation techniques. These statistical tools could account the variability of input parameters and provide a probabilistic formulation for passing sight distance. Sparks et al. (Sparks et al., 1993) used Glennon's and Liebermann's models incorporating statistical distributions of input parameters. Hanley and Forkenbrok (Hanley and Forkenbrock, 2005) performed a simulation with previous PSD models, incorporating random distributions of input parameters, too. The average acceleration rates were obtained from automobile manufacturer's data, and ranged between 0.40 and 0.76 m/s^2 . El Khoury and Hoberika (Khoury and Hobeika, 2012) proposed a Monte Carlo simulation to evaluate risk level of PSD Glennon's model. The statistical distributions of acceleration rates were obtained from previous research works, although they were not related to passing maneuver studies. El Bassiouni and Sayed (El-bassiouni and Sayed, 2010) developed a reliability analysis to compare AASHTO PSD model (American Association of State Highway and Transportation Official, 2004) with driving simulator data. However, they used the same models that previous studies and the assumptions of those models remained unverified.

Other studies have used data of driving simulator experiments to analyze the acceleration of passing vehicles. Jenkins and Rilett (Jenkins and Rilett, 2004) characterized the distribution of time spent accelerating for a sample of 96 maneuvers. It was observed that on average the acceleration time was 13.3 s . They analyzed the point where drivers start the acceleration when they perform a passing maneuver and it started before entering the left lane in 47% of passes. In all passes a deceleration was detected: in 44% of passes a deceleration started after reaching

the abreast position but before returning to the own lane. Rakha et al. (Rakha et al., 2004) collected data of acceleration rates of different passenger cars performing an experiment under controlled conditions. The relationships between acceleration rates and speed were determined. The experiment was based on an acceleration movement starting at 0 km/h. Therefore, this results cannot be directly applied to passing maneuvers, since acceleration rates can be different depending on the speed the maneuver starts and on driver reaction to a potential risky situation.

Some field studies (Harwood et al., 2010; Polus et al., 2000) recorded passing maneuvers in order to calibrate the 2001 AASTHO model parameters using experimental data. However, they frequently did not verify assumptions of those models either. Others authors ((Carlson et al., 2006; Hegeman, 2008)) have used instrumented vehicles to analyze the passing process on two-lane rural roads. Carlson et al. (2005) described the evolution of passing vehicle speed, showing an initial acceleration stage followed by a second stage (after the abreast position) where acceleration was lower.

Llorca and Garcia (Llorca and García, 2011) showed also an approach to describe the speed evolution of the impeding and the passing vehicle of 58 passing maneuvers. The maneuvers were recorded using six cameras covering four different passing zones. Although this study did not calculate instant acceleration values, it showed the evolution of speeds along four sub-phases of the passing maneuver. According to this study, the passing vehicle accelerates at a higher rate before reaching the abreast position. As well, the results showed that around 50% proportion of impeding vehicles did increase its speed with a moderate acceleration rate.

2. Objectives

Therefore, the aim of this study was to calibrate passing acceleration models on two-lane rural roads with field data. An improved data collection method was used to collect data of passing maneuvers on naturalistic conditions on two-lane rural road segments in Spain and characterize the evolution of passing vehicles.

Several kinematic models were formulated, based on the assumptions from previous research studies. In addition, new models were proposed so that some of those assumptions would no longer be required.

Experimental data were used to calibrate the models. The calibration process obtained the parameters of the selected models for the observed sample. After that, they were used to describe the trajectory of passing vehicles on the opposing lane.

3. Methodology

The models were calibrated from observational data, collected with an instrumented vehicle. After that, several models were developed and calibrated.

3.1. Field study

In this research work, the methodology, analysis and conclusions were based on experimental data, which was collected using a recently developed methodology (Llorca and García, 2011; Llorca et al., 2013a, 2013b). The authors have used this methodology in the past, although it has been improved to analyze the acceleration process of passing vehicle under naturalistic conditions.

3.1.1. Equipment

Data was collected using an instrumented vehicle. It travelled along 5 different two-lane rural road segments at a fixed, slightly reduced speed. If the desired speed of the other vehicles was higher, they followed the instrumented vehicle and finally passed it when they found an available gap. Different data was collected during the following process as well as during the passing maneuver.

This vehicle was equipped with four Racelogic VBOX 720x576 resolution digital video cameras covering the whole trajectory of a passing vehicle (rear, left and front side). In addition to this, two

LTI True Senses S200 laser rangefinders measured the distance between the instrumented vehicle and every vehicle located behind and in front of it at a 12.5 Hz frequency. Since distance measurement was continuous, instant speeds of those vehicles were also obtained. Rear laser rangefinder was placed at the rear bumper. The front distance measurements were obtained with a laser gun controlled by the co-driver. On the other hand, a Racelogic VBOX 10 Hz GPS tracker registered the position and speed of the instrumented vehicle at any time.

Equipment was adequately small that other drivers could not easily detected its presence. In addition to this, the vehicle drove at a uniform speed V_i . It was selected within normal impeding vehicle speed range, which was obtained from external observations from a previous research study (Llorca and García, 2011).

3.1.2. Passing maneuver variables

Although video recordings provided a continuous observation of the passing phenomenon, the estimation of the passing vehicle trajectory was made from three point measurements, where position of passing vehicle was measured accurately (Figure 1):

- Time (t_1) at the starting time of passing maneuver (when passing vehicle left front wheel crosses the centerline), headway between passing and impeding vehicle (h_1) and relative speed (dV_{p1}).
- Time (t_2) at the abreast location (when front bumper of both passing and impeding vehicle are at the same point).
- Time (t_3) at the ending time of passing maneuver (when passing vehicle left rear wheel crosses the centerline), headway between passing and impeding vehicle (h_3) and relative speed (dV_{p3}).

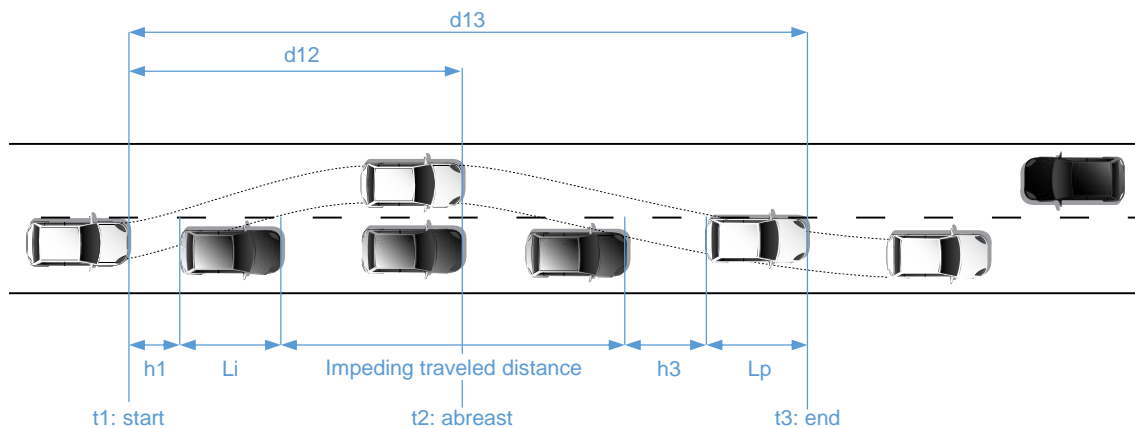


Figure 1. Passing maneuver variables

The values of t_1 , t_2 and t_3 were identified by viewing video files of each maneuver. Distance between passing and impeding vehicle at t_1 and t_3 were obtained using the rear laser rangefinder and front laser gun, respectively. Distances travelled along the one-second intervals centered at t_1 and t_3 were considered for the relative speed calculation in order to reduce possible measurement errors.

In addition to this, GPS data provided the trajectory of the instrumented impeding vehicle at a 10 Hz frequency. Speed of the impeding vehicle V_i was added to the relative speeds to obtain the absolute passing vehicle speeds V_{p1} (at t_1) and V_{p3} (at t_3). The distance traveled between t_1 and t_2 (interval t_{12}) was named d_{12} . The distance traveled from t_1 to t_3 (interval t_{13}) was named d_{13} .

Additional data were also collected from video images and vehicle passenger annotations. The following variables were registered:

- Type of passing vehicle: car, van, truck, SUV...

- Gender and estimated age of the passing driver.
- Number of passengers in the passing vehicle.
- Time spent following before passing.
- Rejected gaps during the following time and the accepted gap.
- Starting mode: if the passing vehicle starts the maneuver after following the impeding at the same speed, the maneuver was accelerative, otherwise: flying.

3.1.3. Data collection

Using the described methodology, 267 passing maneuvers were recorded on 5 two-lane rural road segments.

A total of 85 were discarded due to one or more of the following reasons:

- Passing vehicle was a truck (14 maneuvers).
- More than one impeding vehicle was passed (40 multiple maneuvers).
- In accelerative maneuvers, either front, or rear or both laser distance measurements were missing or not valid (52 maneuvers).

In consequence, model calibration was made using only maneuvers involving one passing passenger car and one impeding vehicle (the instrumented vehicle); and with plausible laser measurements at t1 and t3. The selected sample was 151 accelerative passing maneuvers and 29 flying passing maneuvers.

No aborted maneuvers were registered during data collection. Only completed passing maneuvers were modeled, since no information about aborting decisions and deceleration rates could be obtained.

In order to avoid the influence of the impeding vehicle speed variation during passing maneuver, instrumented car driver fixed the speed along the entire road segment using the cruise control.

Table 1 summarizes characteristics of road segments and passing zones. Table 2 shows recorded passing maneuver variables.

Sample Type	Road	Date	Design speed (km/h)	Number of maneuvers
Calibration	N-225	06/02/2012	100	62
	CV-415 (i)	13/09/2012	70	55
	CV-415 (ii)	08/11/2012	70	30
	CV-50 (iii)	08/11/2012	80	49
	CV-405	20/11/2012	70	71

Table 1. Selected road segments

Sample type		Variable								
		d12 (m)	d13 (m)	t12 (s)	t13 (s)	h1 (m)	Vp1 (km/h)	h3 (m)	Vp3 (km/h)	Vi (km/h)
Calibration accelerative	Mean	61.2	163.8	2.9	7.1	7.5	71.1	21.2	88.8	65.5
	SD	19.0	42.0	0.9	1.8	3.7	10.4	8.2	11.1	8.3
Calibration flying	Mean	70.2	162.5	2.7	6.3	27.8	n/a	25.2	n/a	64.3
	SD	22.1	44.5	0.8	1.6	14.2	n/a	14.0	n/a	8.4

Table 2. Data summary

3.2. Models proposal

The aim of this study was the calibration of several passing vehicle acceleration models using experimental data. The field study in this research made possible the measurement of more variables than any other previous studies. However, there is still a lack of information between the

times t_1 and t_2 , and t_2 and t_3 . This justifies the procedure of fitting different models and compare the calibration errors among them, as will be explained later. Table 3 shows a list of models, starting with the simplest one (uniform passing vehicle speed) and following with more complex approaches. Most of recent existing PSD models in the literature have been included in Table 3. This include new model proposals, too.

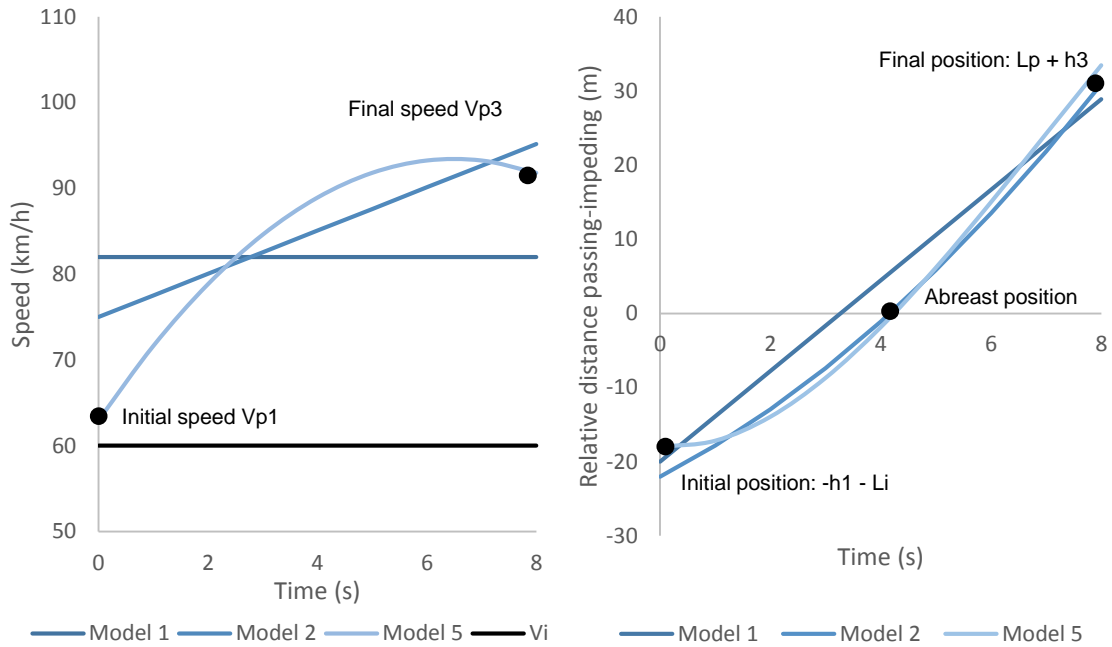


Figure 2. Comparison between different passing models

Figure 2 shows an example of the differences between three of the six alternative models. Black dots represented measured data points. The use of different models may affect the accuracy in the estimation of initial and final speeds (left figure), and distance traveled at the abreast position and at the end of the passing maneuver (right figure).

Model (references)	Formulation	Parameters
1 Uniform speed (American Association of State Highway and Transportation Official, 2004; El-bassiouni and Sayed, 2010; Polus et al., 2000)	$a = 0$ $V = V_{pm13}$	a: acceleration V_{pm13} : passing vehicle average speed between t_1 and t_{13}
2 Uniform acceleration (Rocci, 1998)	$a = a(\text{uniform})$ $V = V_{p1} + a \cdot t$	a: acceleration rate V_{p1} : passing vehicle initial speed
3 Two-stage uniform acceleration	$\text{if } t < t_{12}: \\ a = a_{12} \\ v = V_{p1} + a_{12} \cdot t$ $\text{if } t > t_{12}: \\ a = a_{23} \\ v = V_{p1} + a_1 \cdot t_{12} + a_2 \cdot (t - t_{12})$	t_{12} : time until the abreast position a_{12} : acceleration rate before abreast position a_{23} : acceleration rate after abreast position V_{p1} : passing vehicle initial speed
4 Uniform acceleration until reaching final speed (American Association of State Highway and Transportation Official, 2011; Glennon, 1988; Hassan et al., 1996; Khoury and Hobeika, 2007; Wang and Cartmell, 1998)	$\text{if } t < t_f: \\ a = a \\ V = V_{p1} + a \cdot t$ $\text{if } t > t_f: \\ a = 0 \\ V = V_{p1} + a \cdot t_f$	t_f : ending time of the acceleration stage a: acceleration rate V_{p1} : passing vehicle initial speed
5 variable acceleration (linear time function)	$a = mt + n$ $V = V_{p1} + m \cdot t^2 + n \cdot t$	a: acceleration rate m: acceleration change per time unit n: initial acceleration at time 0 V_{p1} : passing vehicle initial speed
6: variable acceleration (linear speed function)	$a = mv + n$ $V = \frac{n + m \cdot V_{p1}}{m} \cdot e^{-m \cdot t} - \frac{n}{m}$	a: acceleration rate m: acceleration change per speed unit n: acceleration at speed = 0 V_{p1} : passing vehicle initial speed

Table 3. List of models, equations and parameters

The real acceleration process depends on driver's decision and ability, as well as on vehicle performance, and do not necessary follow any of the models that were presented. However, the potential applications of this study (microsimulation models, probabilistic PSD standards) require the formulation of simple models, where the parameters are defined as random variables. Models were defined as a set of equations which described the evolution of the passing vehicle along its left lane occupation time.

3.3. Model calibration

Due to passing variables randomness, the objective of calibration was to estimate the model parameters for each single passing maneuver. After that, a probability function of each parameter was estimated considering the entire sample. The calibration of models was carried out in two different groups. The first one included only accelerative maneuvers, since they always involved a positive acceleration starting at a slow speed, near to impeding vehicle speed. A total of 151 passing maneuvers were included in this group.

The second group corresponded to flying passing maneuvers. In this case, passing vehicle trajectory was very different and starting speed was not necessary so close to impeding vehicle speed as in accelerative passes. On the other hand, during most flying passing maneuvers, no rear distance measurement could be possible, since in those maneuvers, the value of headway h_1 was significantly higher (an average of 27.8 m while it was 7.5 m in accelerative passes) or was out of the laser rangefinder measurement field. A total of 29 maneuvers were included in the second group.

3.3.1. Accelerative maneuvers

The objective of the calibration of the models of Table 3 was to estimate the value of model parameters, which determine the minimum deviation between estimated and observed passing vehicle trajectory.

Parameters estimation was performed for each individual passing maneuver and after that, they were aggregated. For each model and each recorded passing maneuver the calibration was made by minimizing the function F (Equation 1)

$$F(X_i, M_i) = \left\{ \begin{array}{c} \frac{d13_{model}(M_i) - d13_{observed}}{d13_{observed}} \\ \frac{d12_{model}(M_i) - d12_{observed}}{d12_{observed}} \\ \frac{Vp1_{model}(M_i) - Vp1_{observed}}{Vp1_{observed}} \\ \frac{Vp3_{model}(M_i) - Vp3_{observed}}{Vp3_{observed}} \end{array} \right\} = 0 \quad (1)$$

Where:

- $X_i = (d13_{observed}, d12_{observed}, Vp1_{observed}, Vp3_{observed})$ is a vector of the four observed dynamic variables for maneuver i .
- $d13_{model}, d12_{model}, Vp1_{model}$ and $Vp3_{model}$ are functions of M_i , according to the selected model, based on Table 3.
- $M_i = (mi_1, mi_2, \dots, mi_K)$ is a vector of K model parameters for maneuver i

Each component of the function corresponded to the difference between the estimated and the observed value of the following variables: distance traveled at t_3 ($d13$), distance traveled at t_2 ($d12$), speed at t_1 ($Vp1$) and speed at t_3 ($Vp3$). These components were divided by the observed value of each one. The reason of this was to give the same relative importance to all of them.

Since number of parameters (between 1 and 3, depending on the model) was lower than number of available data, the equation was solved using least square methods. Both linear and nonlinear least square procedures were applied, (depending on the linearity of model equations), using the Optimization Toolbox included in MATLAB software. The objective of these function was to minimize the terms of the function $F(X_i, M_i)$ according to the Equation 2.

$$M_i / \min(f_1(X_i, M_i)^2 + f_2(X_i, M_i)^2 + f_3(X_i, M_i)^2 + f_4(X_i, M_i)^2) \text{ for } i=1 \text{ to } N \quad (2)$$

For each model, parameter probability distributions were analyzed after aggregating all maneuvers. Table 4 summarizes the probability distribution of each parameter as well as existing correlations between different parameters. In every case, the distribution fitting was checked using Kolmogorov-Smirnov tests (p -values shown in table). Correlations between model parameters have been analyzed. Table 4 include significant correlations (over 0.5) at the 95% confidence level.

Since speed of the instrumented (impeding) vehicle was not a random variable but had a fixed value for each location, it could not be assumed that it came from a normal distribution. In consequence, both passing vehicle average speed and passing vehicle initial speed parameters were divided by the impeding vehicle speed. Therefore, normal or lognormal distributions could be fit to them.

Model	Parameters	Distribution and values
1 Uniform speed	Vp13/Vi	Lognormal p-value = 0.292 mean=1.20276 SD=0.0589031
	Vp1/Vi	Lognormal p-value = 0.826 mean=1.10053 SD=0.0498709
2 Uniform acceleration	a	Lognormal p-value = 0.185 mean=0.770249 SD=0.476336
	correlations (coefficient)	not significant
	Vp1/Vi	Lognormal p-value = 0.204 mean=1.07763 SD=0.0521906
3 Two-stage uniform acceleration	a12	Normal p-value = 0.723 mean=1.18567 SD=0.740293
	a23	Normal p-value = 0.850 mean=0.402021 SD=0.535844
	correlations (coefficient)	a12 and a23 (-0.5661)
	Vp1/Vi	lognormal p-value = 0.248 mean=1.07588 SD=0.0445466
4: Uniform acceleration until final speed	a	lognormal p-value = 0.980 mean=1.31485 SD=0.681384
	tf	normal p-value = 0.645 mean=4.31048 SD=1.72732
	correlations (coefficient)	a and tf (-0.6575)
	Vp1/Vi	lognormal p-value = 0.493 mean=1.08117 SD=0.0514994
5 Variable acceleration (linear time function)	m	normal p-value = 0.764 mean=-0.131611 SD=0.181016
	n	normal p-value = 0.841 mean=1.15223 SD=0.7504
	correlations (coefficient)	m and n (-0.9002)
	Vp1/Vi	normal p-value = 0.478 mean=1.08006 SD=0.0476019
6 Variable acceleration (linear speed function)	m	normal p-value = 0.331 mean=-0.18945 SD=0.28942
	n	normal p-value = 0.425 mean=5.13022 SD=6.44505
	correlations (coefficient)	m and n (-0.9856)
	Vp1/Vi	normal p-value = 0.478 mean=1.08006 SD=0.0476019

Table 4. Results of model calibration for accelerative passes

Figure 3 represents the percent root mean squared error (RMSE_j) for each calibration variable *j* and model. RMSE was calculated using the Equation 3.

$$RMSE_j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_{ij})^2} \quad (3)$$

Where *f_{ij}* is the relative error of variable *j* in the maneuver *i*, corresponding to a term of the function *f*(*X_i*, *M_i*).

As can be seen, increasing model complexity, the estimation errors generally decrease, since models 3, 4 and 5 had the lowest errors for each variable. In Figure 4, models are ranked according to the percentage of cases in which they are the best (and the second best) fit model.

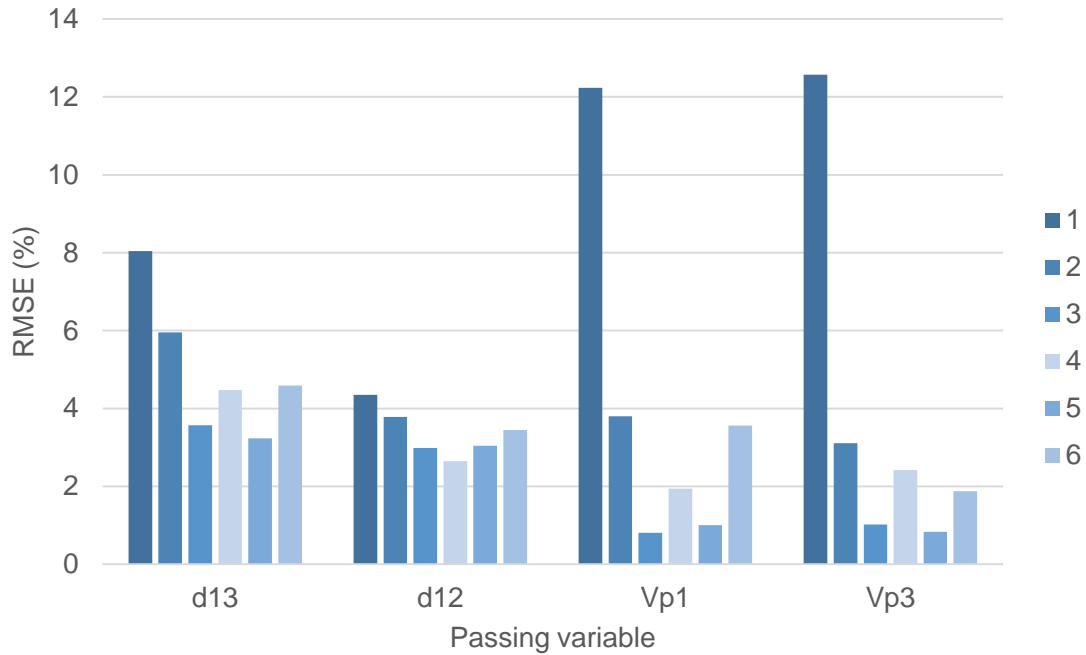


Figure 3. Root mean square error (percent) for each model and variable

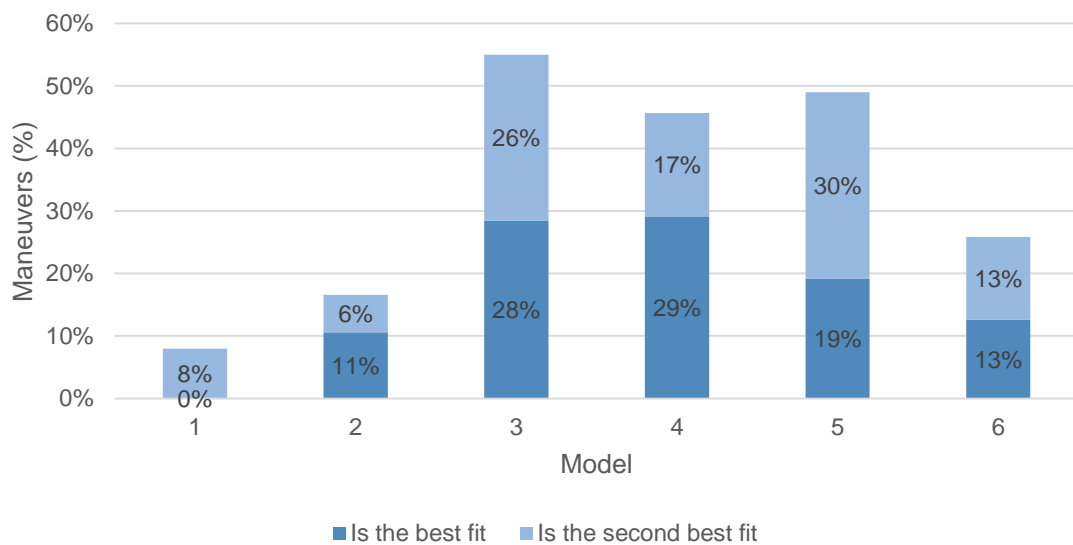


Figure 4. Best fit model

For each case, the estimated acceleration values were checked, in order to proof if the calibration resulted in abnormal values. Reference acceleration rates, based on Rakha et al. (2004), Sparks et al. (1993) and Liebermann (1982) for the positive values and Fitzpatrick et al. (Fitzpatrick et al., 2012) for the negative ones were used. These reference values determined whether an acceleration value exceed the reasonable rates or not. Figure 5 shows the range of reasonable acceleration rates, as well as the estimated values for each model, depending on the passing vehicle speed. Acceleration rates among lower and upper thresholds were considered as valid. Otherwise, they were discarded.

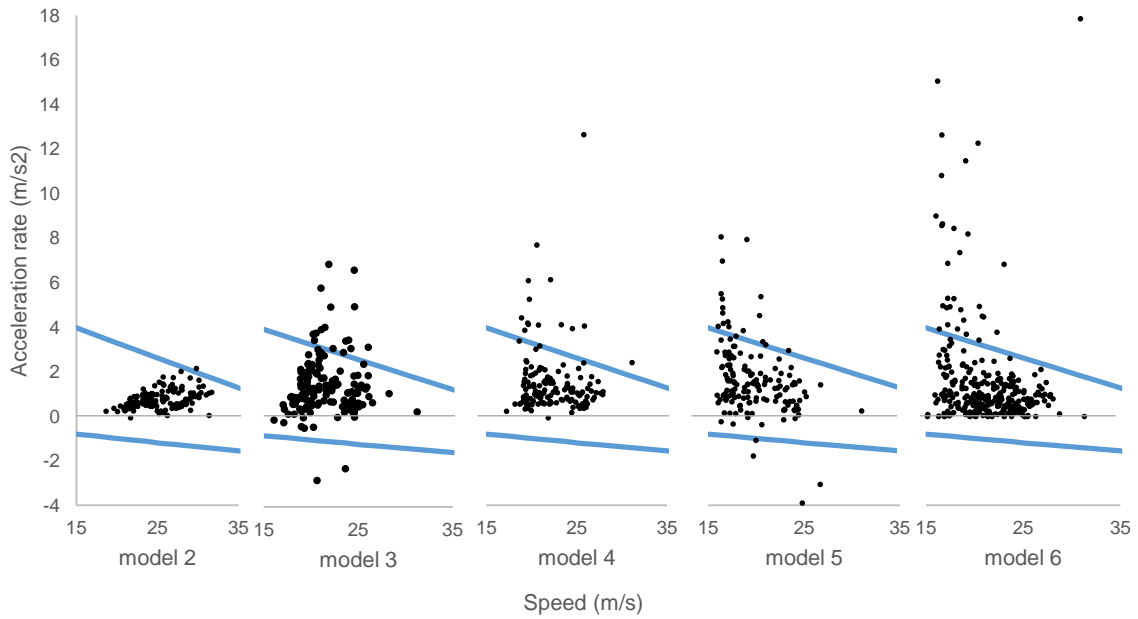


Figure 5. Acceleration rate thresholds and estimated values

By increasing model complexity, some observed maneuvers provided non plausible solutions, as can be seen in Figure 6. Those maneuvers were discarded when analyzing parameter distributions of Figure 6. Models with a high number of discarded maneuvers could not be able to explain passing vehicle behavior. This cases could be associated, in some cases, to overfitting, since the models represented not only the passing trajectory but also the random measurement errors.

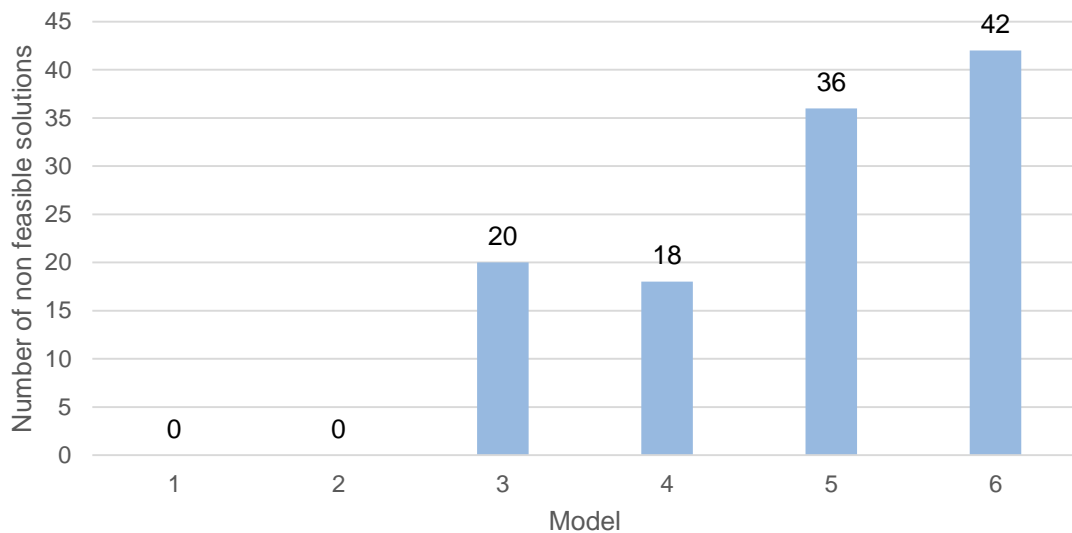


Figure 6. Non-feasible solutions for each model

3.3.2. Flying maneuvers

Flying passing maneuvers represent a different behavior, compared to accelerative passes. PSD requirements are usually lower for flying passes so they are not considered in many maneuver models (American Association of State Highway and Transportation Official, 2004; Glennon,

1988; Hassan et al., 1996). Flying passes do not involve necessarily an acceleration process, because passing vehicle speed is higher once the maneuver has started.

Only one model was calibrated for the flying maneuvers observed using the experimental methodology. It was the model 1, corresponding to a passing vehicle uniform speed. This selection was made due to the two following reasons:

- According to the definition of flying maneuver, the passing vehicle neither brakes nor accelerates, accepting a passing gap just after reaching the impeding vehicle.
- Passing vehicle trajectory measurement was more difficult in flying maneuvers than in accelerative, since headways h_1 and h_3 were longer. In most cases, it was not possible to measure the passing vehicle speed at t_1 and t_3 . Therefore, it was impossible to calibrate more complex models.

The calibration of this model was based on data from 29 maneuvers observed with the instrumented vehicle. Despite headways h_1 and h_3 could not be measured using the laser rangefinders, they were estimated from video images. This estimation was based on drawing reference lines on video frames at known distances. Those reference points were measured and recorded on video images before starting data collection. Accuracy of those measurements is lower, and it was not possible to calculate reliable instant speeds at t_1 or t_3 .

The model 1 was calibrated minimizing the error of the distances d_{12} and d_{13} . Percent RMSE was 5% for both d_{12} and d_{13} distances. Table 5 shows the distribution of adjusted parameters.

Model	Adjusted parameters	Distribution & Values
1 Uniform speed	V_{pm13}/V_i	Normal m = 1.42538 s = 0.102958

Table 5. Parameters of passing model for flying maneuvers.

4. Results

The result sections focused on the analysis and interpretation of model parameters, as well as in providing a general description of passing vehicle trajectories.

4.1. Model parameters

The results of the calibration showed that the use of different models involved significant differences in the estimation of passing vehicle trajectories.

A more complex study was made for accelerative passes, in contrast to flying passes. Simpler models, such as model 1 (uniform speed) were not able to explain the speed evolution during the left lane occupation, in the case of accelerative maneuver. This model was very inaccurate to represent the observed data, being the percent RMSE over 10% in initial and final speeds, and of 8 and 4% in distance d_{13} and d_{12} , respectively. This model would represent that the passing vehicle accelerated before the left lane occupation, and kept its uniform speed during the entire maneuver. According to the model calibration, the average speed of the passing vehicle would be a 20% higher than the impeding vehicle speed.

Models 2, 3 and 4 were more adequate (in terms of RMSE) to estimate both d_{13} and d_{12} , as well as initial and final speeds V_{p1} and V_{p3} . Those models increased the complexity level in order to characterize accelerative passing maneuvers by their speed variation. Model 2 explained the maneuver with a uniform acceleration movement during t_{13} . Model 3 incorporated two stages with different acceleration rates, in order to represent the potential change in the acceleration rate once the abreast position was reached. Model 4 was similar to model 3, although it assumed, based on previous research studies, that the passing vehicle accelerated until a final speed was reached, keeping this speed after that. The models 2, 3 and 4 presented a low percent RMSE for the calibration variables, being always under 5%.

Model 5 incorporated an additional term to represent a linear variation of the acceleration rate as a function of time. Model 6 was based also in a linear variation, but as a function of the speed, according to Rakha et al. (2004) acceleration profiles. The most complex models were not adequate to represent the entire observed data. The models 5 and 6 calibration process had as a result a relative high number of not feasible solutions, characterized by excessively high (or low) acceleration rates.

In models 2 to 6, the initial speed of the passing vehicle V_{p1} was, on average, between a 7% and 10% higher than the impeding vehicle speed, which revealed that an initial acceleration was performed before starting the passing maneuver. After this point, the different models showed different acceleration rates. The model 2 was characterized a mean uniform acceleration of 0.77 m/s². The model 3 defines two stages: before the abreast position, the mean acceleration rate was 1.18 m/s², while after this point it decreased until 0.40 m/s². The model 4 showed an equivalent result, being the mean acceleration rate of 1.3 until the time t_f , when it became zero. The mean time t_f was 0.75 times of t_{13} .

According to model 5, an average behavior was characterized an acceleration rate starting at 1.15 m/s² and decreasing 0.13 m/s² per second. The model 6 explains the average behavior by an acceleration rate following the relationship $a = 5.13 - 0.19v$ (with v in m/s and a in m/s²).

A general conclusion is that an average behavior of passing drivers could be modeled by a decreasing acceleration rate during the passing time t_{13} . The reason behind this could be, firstly, that maximum acceleration capacity decreased when speed increases, and second, that drivers may reduce their acceleration rate as far as they observe that the maneuver can be completed with safety. However, the use of alternative models to represent different passing behavior among a sample of drivers should be considered, as shown in the next section.

On the other hand, the model 1 was able to explain how a flying maneuver was performed. In this case, it had a percent RMSE under 5% in both d_{12} and d_{13} .

4.2. Passing vehicle trajectories

This part of the analysis pretended to characterize the trajectory of passing vehicles in left lane. For each maneuver, the model with best fit was selected. According to this, the sample of accelerative maneuvers was build adding six different groups (models 1 to 6). As shown in Figure 4, the sample was based on the sum of an 11% of the maneuvers from model 2, 28% from model 3, 29% from model 4, 19% from model 5 and 13% from model 6. Flying passes had only one group, defined by model 1.

In accelerative maneuvers, the passing vehicle initial speed from this sample was normally distributed (at the 95% confidence level) with mean equal to 1.087 times the impeding vehicle speed and standard deviation equal to 0.059.

For each accelerative maneuver, the values of initial, final, minimum, maximum and mean acceleration rates were analyzed. Figure 7 shows the results.

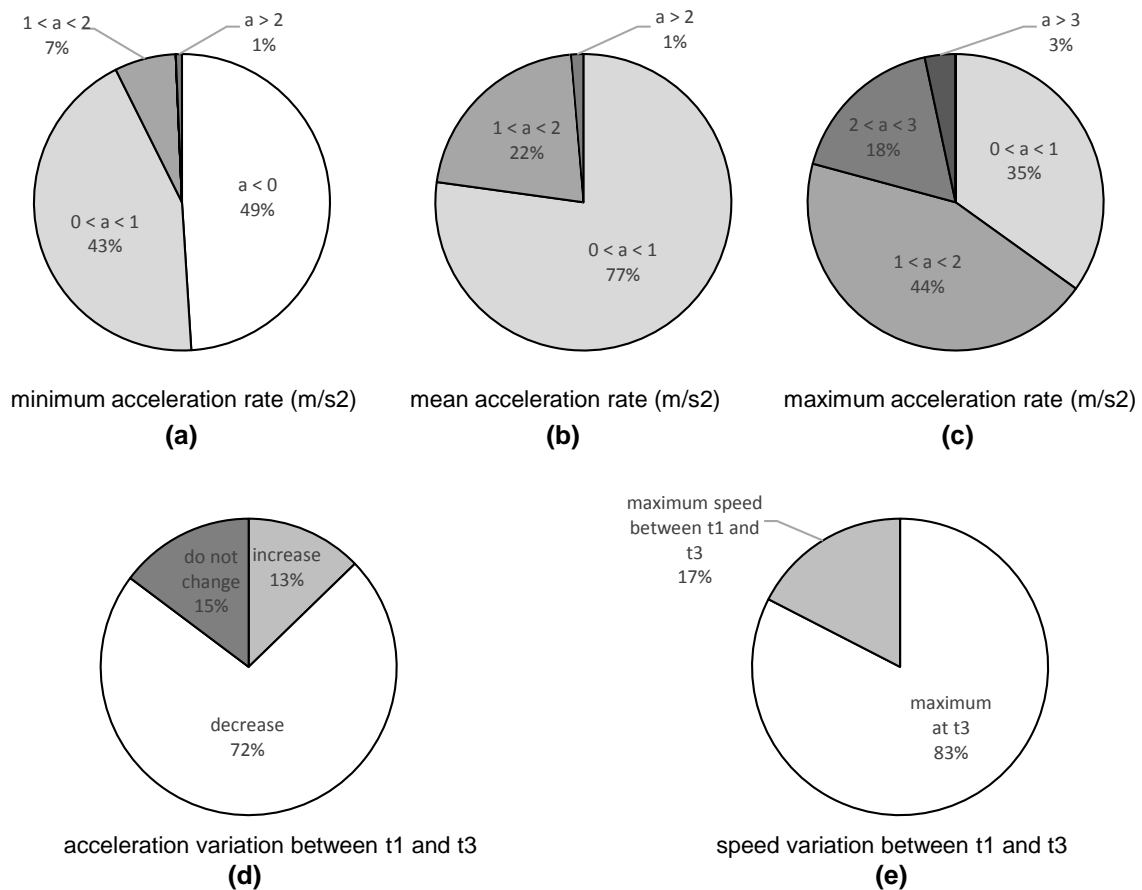


Figure 7. Passing acceleration rate and passing speed analysis (accelerative maneuvers)

As shown in Figure 7a, 49% of vehicles decelerate during some time while passing. Most of the other drivers (43% of the total) had a minimum acceleration between 0 and 1 m/s². Mean acceleration rates (Figure 7b) were between 0 and 1 m/s² in 77% of cases and between 1 and 2 m/s² in 22%. Maximum acceleration rates (Figure 7c) were over 3 m/s² for only the 3% for drivers, between 2 and 3 m/s² for 18%, between 1 and 2 m/s² for 44% and between 0 and 1 m/s² for the rest.

Figure 7d and 7e summarizes driving behavior in the sample of accelerative maneuvers built for this section. The 72% of vehicles decrease their acceleration rate during passing maneuver. Only a 13% increase their acceleration. A 15% of drivers did not change their acceleration significantly. The result is that an 83% of vehicles increased their speed during the entire maneuver (following different patterns, as defined by the acceleration models), while a 17 started the maneuver increasing their speed, reached a maximum speed, and then they decelerated, with deceleration rates always under 1%.

On the other hand, flying passes were adequately modeled using a uniform speed formulation. The only parameter that characterized this maneuver was the speed of passing vehicle. It was normally distributed with mean equal to 1.425 times the speed of the impeding vehicle, a 30% higher than in accelerative passes.

5. Discussion

This research study have compared previously existing passing models with observational data of passing maneuver on a sample of two-lane rural roads in the surrounding of Valencia (Spain). Validity of results should be initially limited to this geographical area.

Model 1 was equivalent to the previous AASHTO Green Book model (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004). This model couldn't account the passing vehicle speed variation in accelerative passing maneuvers, since only a uniform speed was considered. In this study, the model was calibrated to minimize the error of distances d_{13} , d_{12} and speeds V_{p1} and V_{p3} , being the result that the model was not adequate to characterize the passing process with this level of detail.

Model 2 was equal to the one proposed by Rocci (Rocci, 1998). This author proposed an acceleration value ranging between 0.27 and 2.17 m/s^2 , with a 50th percentile of 1.11 m/s^2 . These values are slightly higher than the observed distribution. Besides, the initial speed of passing vehicle was assumed by Rocci to be equal to the impeding vehicle speed. This was not observed in the present study data.

Model 4 is similar to Glennon (1988) and Hassan et al. (1996) although those authors proposed that the passing vehicle speed was uniform after the critical point. This model was calibrated assuming that the uniform speed started at a certain point during the passing maneuver, since the critical point was not detectable with the equipment. Besides, the uniform speed, among all the other parameters including the final point of the acceleration phase, were assumed to be random variables. The results of the calibration showed that, in contrast to Glennon and Hassan et al. models, the passing vehicle speed at the starting point of the maneuver was not equal to the impeding vehicle speed. Moreover, the final speed was a random variable 10 km/h (on average) over the design speed.

In relation to the acceleration rates, the AASHTO (2004) model proposed similar mean values (around 0.62 m/s^2) to those obtained from Model 2. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (50th percentile at 0.70 m/s^2). The AASHTO model defined the acceleration stage before entering the left lane, though. If extreme acceleration rates are analyzed, the 85th percentile obtained from Model 2 (2.25 m/s^2) was close to those observed by Rakha et al. (2004) and to those proposed by Sparks et al (1993) at the equivalent speed levels (shown in Figure 5).

6. Conclusion

The movement of a vehicle on the left lane during a passing maneuver depends on driver's abilities and decisions, as well as on vehicle performance. There is not any unique model to define the evolution of the speed of vehicles during their movement on the left lane, since each driver can perform this maneuver in a different way.

However, the analysis of passing process is an important task with consequences in road design and operation. The definition of PSD standards, as well as traffic studies based on microsimulation models requires an accurate knowledge of passing maneuver.

This study has evaluated different approaches for this maneuver. Six different models have been compared, in order to determine if they were able to explain how the passing vehicle trajectory was observed. Instead of using deterministic approaches for the model parameters, they have been characterized by their probability distributions. This made possible to account the existing variability.

Traditionally, different approaches were formulated using deterministic models where the parameters were taken from conservative percentiles of observational data. Different passing models, such as the uniform speed model or the uniform acceleration model have been used to formulate PSD standards, although their assumptions were not verified. Those models may have been adequate to estimate the total distance required to pass a slower vehicle, but they were not suitable to represent the evolution of the speed along the entire maneuver. For instance, the uniform speed model cannot account the speed evolution, and underestimates the passing vehicle speed at the end of the maneuver. Besides, either the uniform speed or the uniform acceleration models may not locate accurately the point where passing and impeding vehicle are abreast or the assumption that the final speed is equal to the design speed was rejected.

As a result, this paper explains the adequacy of different passing models. The selection of the best model would depend on its intended applications. Potential applications of the models presented in this study are the formulation of probabilistic PSD design standards, and the calibration of traffic microsimulation models.

7. Acknowledgments

Part of this research was included in the project “Desarrollo de modelos de distancias de visibilidad de adelantamiento”, with reference code TRA2010-21736 and subsidized by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness. Authors would also like to thank Prof. Dr. Sayed, from University of British Columbia, for the review effort.

8. References

American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 5th Edition.

American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 6th Edition.

Carlson, P., Miles, J., Johnson, P., 2006. Daytime High-Speed Passing Maneuvers Observed on Rural Two-Lane, Two-Way Highway: Findings and Implications. *Transportation Research Record* 1961, 9–15. doi:10.3141/1961-02

El-bassiouni, S., Sayed, T., 2010. Design Requirements for Passing Sight Distance : A Risk-based Approach, in: 90th Transportation Research Board Annual Meeting.

Federal Highway Administration, 2009. Manual on Uniform Traffic Control Devices.

Fitzpatrick, K., Chrysler, S.T., Brewer, M., 2012. Deceleration Lengths for Exit Terminals 768–775. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000380.

Glennon, J.C., 1988. New and improved model of passing sight distance on two-lane highways, *Transportation Research Record*.

Hanley, P.F., Forkenbrock, D.J., 2005. Safety of passing longer combination vehicles on two-lane highways. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 39, 1–15. doi:10.1016/j.tra.2004.09.001

Harwood, D.W., Gilmore, D.K., Richard, K.R., 2010. Passing Sight Distance Criteria for Roadway Design and Marking. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2195, 36–46.

Hassan, Y., Easa, S.M., El Halim, A.O.A., 1996. Passing sight distance on two-lane highways: Review and revision. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 30, 453–467. doi:10.1016/0965-8564(95)00032-1

Hegeman, G., 2008. Assisted Overtaking, An Assessment of Overtaking on Two-Lane Rural Roads. PhD Thesis. TU Delft.

Jenkins, J.M., Rilett, L.R., 2004. Application of distributed traffic simulation for passing behavior study, in: *Transportation Research Record*. pp. 11–18.

Khoury, J. El, Hobeika, A., 2007. Incorporating Uncertainty into the Estimation of the Passing Sight Distance Requirements. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 22, 347–357. doi:10.1111/j.1467-8667.2007.00491.x

Khoury, J. El, Hobeika, A.G., 2012. Integrated Stochastic Approach for Risk and Service Estimation : Passing Sight Distance Application. *Journal of Transportation Engineering* 571–579. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000366.

- Lieberman, E.B., 1982. Model for Calculating Safe Passing Distances on Two-Lane Rural Roads. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1280, 70–76.
- Llorca, C., García, A., 2011. Evaluation of Passing Process on Two-Lane Rural Highways in Spain with New Methodology Based on Video Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2262, 42–51. doi:10.3141/2262-05
- Llorca, C., García, A., Moreno, A.T., Pérez-Zuriaga, A.M., 2013a. Influence of age, gender and delay on overtaking dynamics. *IET Intelligent Transport Systems* 7, 174–181. doi:10.1049/iet-its.2012.0147
- Llorca, C., Moreno, A.T., García, A., Pérez-Zuriaga, A.M., 2013b. Daytime and Nighttime Passing Maneuvers on a Two-Lane Rural Road in Spain. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2358, 3–11. doi:10.3141/2358-01
- Molinero, A., Carter, E., Naing, C., Simon, M., Hermintte, T., 2008. Accident causation and pre-accidental driving situations. Part 1. Overview and general statistics, TRACE - Traffic Accident Causation in Europe Report.
- Polus, A., Livneh, M., Frischer, B., 2000. Evaluation of the Passing Process on Two-Lane Rural Highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1701, 53–60.
- Rakha, H., Ahn, K., Trani, A., 2004. Development of VT-Micro model for estimating hot stabilized light duty vehicle and truck emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 9, 49–74. doi:10.1016/S1361-9209(03)00054-3
- Rocci, S., 1998. A system for no passing zones signing and marking setup, in: *Transportation Research Board Circular*.
- Sparks, B.G.A., Neudorf, R.D., Robinson, J.B.L., Good, D., 1993. Effect Of Vehicle Length On Passing Operations. *Journal of Transportation Engineering* 119.
- Wang, Y., Cartmell, M.P., 1998. New model for passing sight distance on two-lane highways. *Journal of Transportation Engineering* 124, 536–544.

8. Llorca, C. Moreno, A.T. and García, A. Passing sight distance standards based on drivers' behavior and road safety. Sent to Transportation Research Part C – Traffic Psychology and Behavior on Jan. 2015.

Passing sight distance standards based on drivers' behavior and road safety

Carlos Llorca

PhD Candidate

Highway Engineering Research Group

Universitat Politècnica de València

Camino de Vera s/n 46022, Valencia (Spain)

+34 96 3877374

carlloga@cam.upv.es

Ana Tsui Moreno

PhD Candidate

Highway Engineering Research Group

Universitat Politècnica de València

anmoch@cam.upv.es

Alfredo Garcia

Professor

Highway Engineering Research Group

Universitat Politècnica de València

agarciag@tra.upv.es

Abstract

Passing maneuver is a key issue in the design and marking of two-lane rural roads. There should be provide sufficient passing sight distance at certain locations of road segments, to improve level of service, and to avoid interferences between slow and fast vehicles. The determination of the values of passing sight distance has been widely studied in the past. However, current criteria are not uniform across different countries, and in most cases, geometric design and marking criteria are different in the same country. Although some authors carried out probabilistic analyses of this phenomenon, their results were not applied to improve existing standards because of they were not validated with objective safety measures. This work has used field data of more than 1100 maneuvers to characterize passing gap acceptance and required passing sight distance. This was used to carry out a reliability analysis, resulting in the probability of noncompliance of passing gaps. Thereafter, crash data at 138 passing zones was compared with the outcomes of the reliability analysis, finding a correlation between crash frequency and probability of noncompliance. This was used to determine the optimum sight distance and length that passing zones must have, to provide safe conditions for drivers. The proposed criteria were compared to existing design and marking standards.

1. Introduction

Existing guidelines provide a deterministic approach for many design problems. As a result, every design parameter must exceed (or be under) a minimum (or maximum) threshold. According to this, the compliance of design parameters with the guidelines is the only safety criterion, assuming that a higher provision of those parameters is always positive.

One example of this is the minimum requirements for passing sight distance (*PSD*), which is the distance required to pass a slower vehicle, when an opposing vehicle is approaching. A certain proportion of two-lane rural roads length with sufficient *PSD* is necessary to allow drivers to pass slower vehicles, improving the level of service (Transportation Research Board, 2010). However, passing on two-lane roads requires the occupation of the opposing lane, which has a significant impact on road safety, being accidents related to passing maneuvers very severe (Molinero et al., 2008).

There are many factors affecting passing sight distance, such as the speed of impeding and passing vehicles, as well as the acceleration of the passing vehicle during the maneuver. Knowledge about those parameters is imperfect, since they are stochastic and vary across drivers' population, lighting and weather conditions or geographical areas. Traditionally, design criteria were formulated using deterministic approaches (Harwood and Glennon, 1989; Hassan et al., 1996; Wang and Cartmell, 1998), by selecting conservative percentiles of the input variables to determine the output. However, it may lead to too conservative standards. Therefore, design guidelines do not have any information on the consequences of deviating from them.

More recent studies focused in the analysis of risk level of passing sight distance standards, based on probabilistic models of the maneuvers (El-bassiouni and Sayed, 2010; Khoury and Hobeika, 2012). The risk was estimated in terms of probability of non-compliance, as a surrogate measure of safety. However, this risk measure was not compared with the occurrence of passing related crashes. Consequently, those studies were not sufficient to develop safer passing sight distance standards.

This paper deals firstly with the comparison of a probabilistic model of passing maneuver (based on observational data) and the frequency of passing-related crashes on two-lane rural roads. Secondly, the results are applied to the development of passing sight distance criteria and to the evaluation of current guidelines.

2. Previous work

2.1. Passing sight distance

The use of passing sight distance criteria is required to provide a minimum percentage of road length with sufficient distance to pass (in the design phase) and to establish the location of passing and no-passing zone marking and signing (in the construction and operation phase).

Table 1 provides *PSD* geometric design and marking standards for the United States and Spain. Generally, the values of Table 1 come from deterministic models, in which the risk of passing has not been taken into account. In contrast to this, conservative values of the outputs are provided.

Country - Standard		<i>PSD</i> (m) at reference speed (km/h)								Reference Speed	
		40	50	60	70	80	90	100	110		120
Spain 3.1 IC (Ministerio de Fomento, 2000)		200	300	400	450	500	550	600			<i>V_d</i>
US AASHTO Green Book (American Association of State Highway and Transportation Official, 2011)		266	341	407	482	538	613	670	727	774	<i>V_d</i>
US AASHTO Green Book (American Association of State Highway and Transportation Official, 2004)		140	160	180	210	245	280	320	355	395	<i>V_d</i>
Spain 8.2 IC (Ministerio de Fomento, 1987)	Start of passing zone (a)	145	180	225	265	310	355	395			<i>SL</i>
	End of passing zone (b)	50	75	100	130	165	205	250			<i>SL</i>
US MUTCD (Federal Highway Administration, 2009)		140	160	180	210	245	280	320	355	395	<i>V₈₅</i>
<i>V_d</i>: design speed, <i>SL</i>: posted speed limit, <i>V₈₅</i>: 85th percentile of operating speed											

Table 1. Passing sight distance criteria

The previous US AASHTO *PSD* criterion (American Association of State Highway and Transportation Official, 2004) used an empirical model where passing sight distance was equal to the sum of four components. *PSD* included the whole distance traveled by the passing vehicle from the initial decision to pass as well as the distance travelled by the opposing vehicle. The current US *PSD* geometric design standard (American Association of State Highway and Transportation Official, 2011) is the same as the marking standard provided by MUTCD (Federal Highway Administration, 2009) based on recent research work (Harwood et al., 2010). These studies adapted MUTCD *PSD* values also for the design criterion. This was also supported on previous analytical *PSD* models (Harwood and Glennon, 1976; Hassan et al., 1996) which represented the passing sight distance required to complete the maneuver starting at the critical position.

Spanish geometric design and marking criteria (Ministerio de Fomento, 2000, 1987) were based on analytical models of the maneuver, although no information about the model assumptions and input parameters is provided in the guidelines.

2.2. Passing gap acceptance

While passing sight distance criteria represent the provision of distance for drivers to perform safely the maneuver, passing gap acceptance analyzes the way drivers decide to overtake.

Passing process is a complex task that starts when a faster vehicle reaches a slower one and ends when finally passes. Most of previous work have assumed the following three stages:

- Passing desire: driver's desire to pass or to keep on following the slower vehicle.
- Passing decision (gap acceptance): for drivers who desired to pass, their decision to accept or reject a passing opportunity (named gap) in the opposing traffic.
- Passing completion: for drivers who accepted a gap, their decision to complete or abort the maneuver, before reaching the critical point (point of no return).

Most of previous research was focused only on the third stage, in order to estimate PSD requirements. However, some authors (Farah and Toledo, 2010; Farah et al., 2009) analyzed passing behavior from driving simulator data. They formulated a two-stage passing model (passing desire and passing gap acceptance) using a binary choice probit model. According to Farah and Toledo (2010), driver's desire to pass increased with the difference between the desired speed and the speed of the lead vehicle, as well as with shorter headways between the lead and the subject vehicle. On the other hand, the likelihood of a gap to be accepted increased with its duration and was higher for young drivers. The effect of individuals were characterized by using random parameters in the model, which characterized unobserved variables, such as aggressive behavior or driving skills. Other authors (Ghods and Saccomanno, 2014) analyzed gap acceptance decision from observations, although the number of observations was very limited.

An alternative approach was based on the macroscopic analysis of two-lane rural roads (Pollatscheck and Polus, 2005; S. et al., 2013). They have analyzed driver's gap acceptance and impatience based on macroscopic traffic flow data. The individual driver behavior was not modeled in those studies, though.

2.3. Reliability analysis

The variability observed in PSD standards values was also found in research studies. Previous research work have collected data of passing maneuver under naturalistic conditions, in order to compare the existing standards with the observed behavior or to analyze other factors involved in the passing process. Recently, some studies have recorded passing maneuvers from external positions (Harwood et al., 2008; Llorca and García, 2011; Polus et al., 2000) as well as from instrumented vehicles (Carlson et al., 2006; Hegeman, 2008; Llorca et al., 2013b). Some of these observations showed that existing design criteria, such as the US previous AASHTO standard could be too conservative. The high dispersion in all previous work suggested that the passing process presents a high variability, related to geometric, behavioral or geographical factors. An alternative approach to account for this variability is the use of reliability analysis to analyze and formulate design standards.

There have been several studies using reliability analysis in road design to evaluate the probability of collision at railway crossings (Faghri and Demetsky, 1988), sight distance limitations (Navin, 1990; Richl and Sayed, 2006), traffic signal timing and intersection sight distance (Easa, 2000, 1994, 1993). Ismail and Sayed (Ismail and Sayed, 2009) defined a framework for calibrating crest curves design standards. Ibrahim and Sayed (Ibrahim and Sayed, 2011) established a link between the reliability index and collision frequency in horizontal curves, showing that probability of noncompliance had a significant effect on safety performance function.

In particular, there have been only few applications of reliability analysis to the study of passing maneuver. El Khoury and Hobeika (Khoury and Hobeika, 2007, 2012) proposed a probabilistic approach to evaluate risk index of AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Official, 2004) and MUTCD (Federal Highway Administration, 2009) PSD design and marking standards. These studies used a deterministic model (Glennon, 1988) but they incorporated probability distributions for each input variable. The model was applied to a single case using a Monte Carlo simulation to estimate the risk level of each PSD value. Other authors (El-bassiouni and Sayed, 2010) evaluated risk of the AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Official, 2004) design standards. A 20 driver driving simulator experiment was used to calibrate the AASHTO passing maneuver model. This study concluded that the previous AASHTO standard had a probability of noncompliance of 18.7% at the design speed of 100 km/h.

Lastly, Llorca et al. (Llorca et al., 2014b) did use observational data of passing maneuvers to calibrate a passing model and to characterize the statistical distributions of the inputs variables. As a result, they studied the probability of non-compliance of current criterion.

2.4. Research motivation

There is still the necessity of validating the adequacy of probabilistic models to estimate the actual risk of passing, which should be measured by the frequency of passing-related crashes. The present study focused on this objective, in order to develop new passing sight distance criterion. The hypothesis that motivated this research was the existence of a relationship between probability of passing, probability of passing failure and probability of crash. This relationship would be adequate to obtain more reliable passing sight distance criteria.

Besides, the results may quantify deviations from the design standards, verifying that the compliance of the standard is not the only safety criterion.

3. Objectives

The main goal of this paper was the establishment of passing sight distance standards based on both road safety and drivers behavior. This included:

- Characterization of individual passing behavior using observational data.
- Evaluation of passing safety combining individual observations and crash data.
- Assessment of the risk of existing passing sight distance standards.

4. Field study

For this research, field data characterized both passing behavior (driver's gap acceptance decisions) and passing safety (potential collision risk with an opposing vehicle). Data was obtained from video recordings from external points of view (first method) and from an instrumented vehicle (second method).

The first method (Llorca and García, 2011) consisted in the installation of video cameras in the surroundings of passing zones, obtaining naturalistic data without any intervention. This field study quantified the number of maneuvers, and defined a relationship between operating speeds and impeding vehicle speeds. Speeds were measured from video recordings (knowing the position of certain reference points and the timestamps of selected vehicles passing by those points) and using a laser speed measuring system LTI T100/T200 (Figure 1a).

Using the second method (Llorca et al., 2013a, 2013b), an instrumented passenger car was driven at slightly reduced speeds in order to be passed by other vehicles. The instrumented car was installed with five video cameras, a GPS tracker and laser rangefinders to measure the distance gap between the instrumented and the following vehicle (before passing) and between the passing vehicle and the instrumented vehicle (after passing). This experiment was repeated using a truck instead a passenger car (Figure 1b).

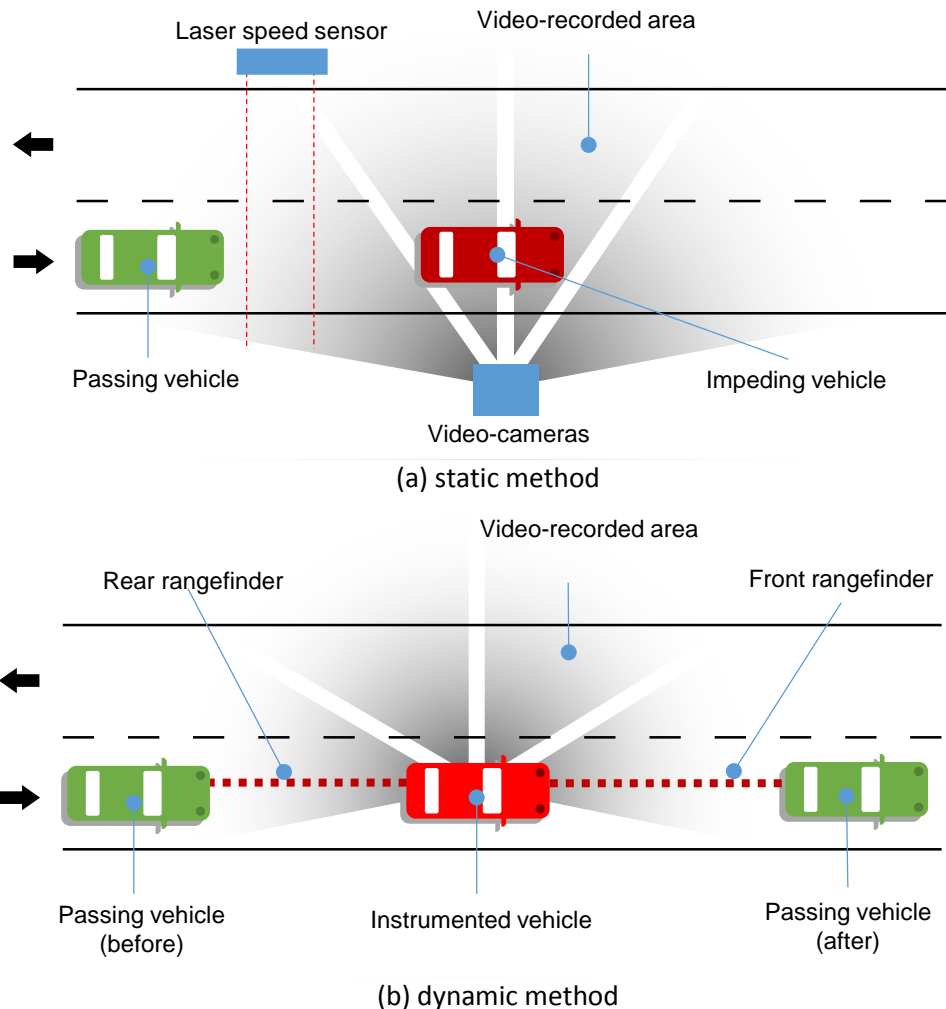


Figure 1. Field study layout

The equipment was small, being difficult to recognize by other drivers when following the instrumented vehicle. Any unexpected maneuvers (such as following keeping larger gaps) was not observed during data collection. For this reason, the second method was described as quasi-naturalistic. Table 2 summarizes the data collection.

Method	static	dynamic	total
Locations	10 points	6 segments	-
Passing zones	24	92	98*
Number of observations	648	531	1179
Observation time (h)	83.8	43.4	127.2

*the total is not the sum because some passing zones were observed using both methods, for validation purposes

Table 2. Observational data sample size

Further details of the field study and the collected data can be found in previous work (Llorca et al., 2014a, 2014b, 2013b)

5. Analysis

The analysis was divided in three sections: passing gap acceptance, passing safety (reliability analysis) and passing related crashes modeling.

5.1. Passing gap acceptance

This section analyzes driver's behavior before passing. Driver's decisions were characterized during the entire following time, using the second method (instrumented vehicle). The following variables characterized every passing decision:

- *Gap* in distance and time units (m and s).
- Visibility of opposing vehicles (*Opposing*). In case no opposing vehicle was visible (*Opposing* = 0), the gaps was equal to the available sight distance (*ASD*) (if measured in distance units) and equal to ASD/Vd if measured in time units.

Passing decisions were described as a binary choice: accept or reject an opposing flow gap. Probit models were estimated to analyze the effect of the previously defined variables on driver's choices, similarly to previous research (Farah and Toledo, 2010; Ghods and Saccomanno, 2014). Probit models are defined by a utility function Y^* , as shown in Equation 1. The value of Y^* for a driver i in a decision j corresponds to the unobserved value Y_{ij}^* .

$$Y_{ij}^* = \beta_j \cdot X_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

Where:

- β_j are coefficients.
- X_{ij} are explanatory variables.
- ε is the error term of the model.

However, the result of the decision is described by the observed function Y (Equation 2).

$$Y_{ij} = \begin{cases} Y_{ij} = 1 \text{ accept if } Y_{ij}^* \geq 0 \\ Y_{ij} = 0: \text{reject if } Y_{ij}^* < 0 \end{cases} \quad (2)$$

The estimation of a probit model consisted in obtaining the values of the parameters β , assuming that the error term follows a standard normal distribution. In this study, the estimation was carried out using a maximum likelihood method implemented in statistical software R. The results are showed in Table 3.

Model	Explanatory variable	Coefficient	Significance	percentage of deviation explained by the model
Model 1	Intercept	-1.442	***	42%
	<i>Gap</i> (distance)	0.002	***	
	<i>Opposing</i>	-0.918	***	
Model 2	Intercept	-0.436	***	22%
	<i>Gap</i> (time)	0.025	***	
	<i>Opposing</i>	-1.185	***	

Table 3. Passing gap acceptance model

As can be seen, models 1 and 2 considered solely the effect of road factors. The estimation of those models showed a better correlation between distance-based gaps and drivers' decisions,

rather than time-based gaps. Besides, the visibility of an opposing vehicle decreased the probability of a gap to be accepted, being critical gaps (those with a probability of acceptance equal to 0.5) 850 and 525 m if the vehicle was visible or not, respectively.

5.2. Reliability analysis

This section evaluates the risk of collision with an opposing vehicle, once the passing driver has started the maneuver. This analysis incorporated a description of passing vehicle trajectory and the study of the probability of a passing gap to be not sufficient to complete the maneuver with safety.

Using the second methodology, each passing maneuver was characterized by:

- Total passing time (s) and distance travelled (m) ($t3-t1$ and $d13_{passing}$).
- Time until abreast position (s) and distance travelled (m) ($t2-t1$).
- Gaps between impeding and passing vehicles (m) at start and end ($h1$ and $h3$).
- Initial and final speeds (km/h) ($Vp1$ and $Vp3$).

These data was used to calibrate several passing models (uniform speed, uniform acceleration and uniform acceleration until final speed). These models were fit using a least square method, estimating the fitting error from the difference between estimated and measured travelled distances at $t2$ and $t3$, as well as initial and final speeds. The results indicated that a uniform acceleration model obtained a root mean squared error under 5% for all the variables. This model was used to calculate the minimum required passing sight distance and the minimum passing zone length using the Equation 3.

$$\begin{aligned} PSD &= d13_{passing} + d13_{opposing} \\ PZL &= d13_{passing} \end{aligned} \quad (3)$$

Where the distance $d13_{passing}$ was calculated using the equation 4 and the distance $d13_{opposing}$ was calculated as a uniform speed trajectory during time $t13$ (equation 5) at free flow speed.

$$d13_{passing} = Vp1 \cdot (t3 - t1) + \frac{1}{2} a \cdot (t3 - t1)^2 \quad (4)$$

$$t3 - t1 = \frac{-(Vp1 - Vi) + \sqrt{(Vp1 - Vi)^2 + 2a(L_i + L_p + h1 + h3)}}{a} \quad (5)$$

Where:

- $Vp1$ is the initial speed of passing vehicle.
- Vi is the impeding vehicle speed.
- a is the acceleration rate.
- $h1$ and $h3$ are the gaps between passing and impeding vehicle at the start and end of maneuver.

After that, using the first methodology, the following speed distributions were analyzed (at every observed road segment, which had a specific road design):

- Impeding vehicle speed (km/h) (Vi).
- Free flow speed (km/h) (FFV).

A linear regression model was used to describe their relationship (see Table 4).

Combining these results, a reliability analysis estimated the probability that an available gap was not sufficient to complete the maneuver with safety. Reliability analysis resulted in the probability of compliance of the system; it means that the provision of sight distance (supply) is enough for drivers to pass safely (demand).

In this case, the proposed design model was the passing sight distance model, which is included in the performance function G (Equation 6), defined in terms of supply (R) and demand (S), as defined by previous research (El-bassiouni and Sayed, 2010).

$$G = R - S = ASD(X) - PSD(X) \quad (6)$$

Where:

- ASD is the available sight distance.
- PSD is the required passing sight distance.
- X is a set of explanatory variables.

Reliability analysis is a probabilistic tool that requires each variable to be characterized by its statistical distribution (as shown in Table 4), instead of characterizing each variable by a single value. The result was the probability of non-compliance, or probability of the function G of being under zero.

Table 4 summarizes the values of the parameters, and their statistical distribution for every input parameter. The analysis was carried out at different cases, covering a range of available sight distances and design speeds. Further details can be found in previous work (Llorca et al., 2014b).

Variable	Code	Unit	Distribution	Value
Available sight distance	ASD	m	Constant	From 100 to 1100 km/h, with 100 m interval
Design speed	Vd	km/h	Constant	From 60 to 120 km/h, with 20 km/h interval
Impeding vehicle speed	Vi	km/h	Normal	Light vehicle $m = 0,5907 \cdot Vd + 27,807$ SD = 15,70
Relative passing vehicle speed at time $t1$	$Vp1/Vi$	dimensionless	Lognormal	$m = 1,10$ SD = 0,05
Acceleration rate	a	m/s ²	Lognormal	$m = 0,77$ SD = 0,47
Gap passing-impeding vehicle before passing	$h(t1)$	m	Lognormal	$m = 9,61$ SD = 5,65
Gap passing-impeding vehicle after passing	$h(t3)$	m	Lognormal	$m = 23,88$ SD = 9,58
Impeding vehicle length	Li	m	Empirical	
Passing vehicle length	Lp	m	Empirical	
Free flow (opposing vehicle) speed	$FFV = Vo$	km/h	Normal	$m = 0,6809 \cdot Vd + 27,807$ SD = 15,70

Table 4. Reliability analysis inputs

This problem was solved analytically using a First Order Reliability Method (FORM). This method is based on Taylor's first order expansion of the performance function around the point where $G(X) = 0$. The validity of this method was verified comparing a part of the solutions with a numeric Monte Carlo method. The problem was solved using Rt software (Mahsuli and Haukaas, 2013)

5.3. Passing zone safety parameters

The previous sections obtained either the probability of gap acceptance or the probability of non-compliance of individual passing events. However, passing zones are road sections of certain length, and passing maneuvers may take place at any location of the zone. Besides, the previous behavioral and safety approaches are independent and should be combined to provide information about the real risk of passing. It means that very short available sight distances correspond to very risky maneuvers but their probability of occurrence is extremely low.

For these reason, the following parameters were proposed to evaluate passing behavior, passing safety and their combined effect of entire passing zones. These parameters are also described in Figure 2.

- Integral of probability of passing: $I_p = \int_{PZL} pa(x)dx$. This formula used the result of passing gap acceptance section. Model 1 was used for the case *Opposing* = 0, as only sight distance limited maneuvers are evaluated.
- Integral of probability of failure: $I_f = \int_{PZL} pf(x)dx$. This formula used the results of the reliability analysis section.
- Integral of passing risk: $I_r = \int_{PZL} pf(x) \cdot pa(x)dx$.

While the integral of probability of passing increases with available sight distance, the opposite happens with the integral of probability of failure. Because of the integral of passing risk is equal to their product, it is maximum for a range between 300 and 500 m of available sight distances to start a maneuver. Figure 2 summarizes the proposed parameters.

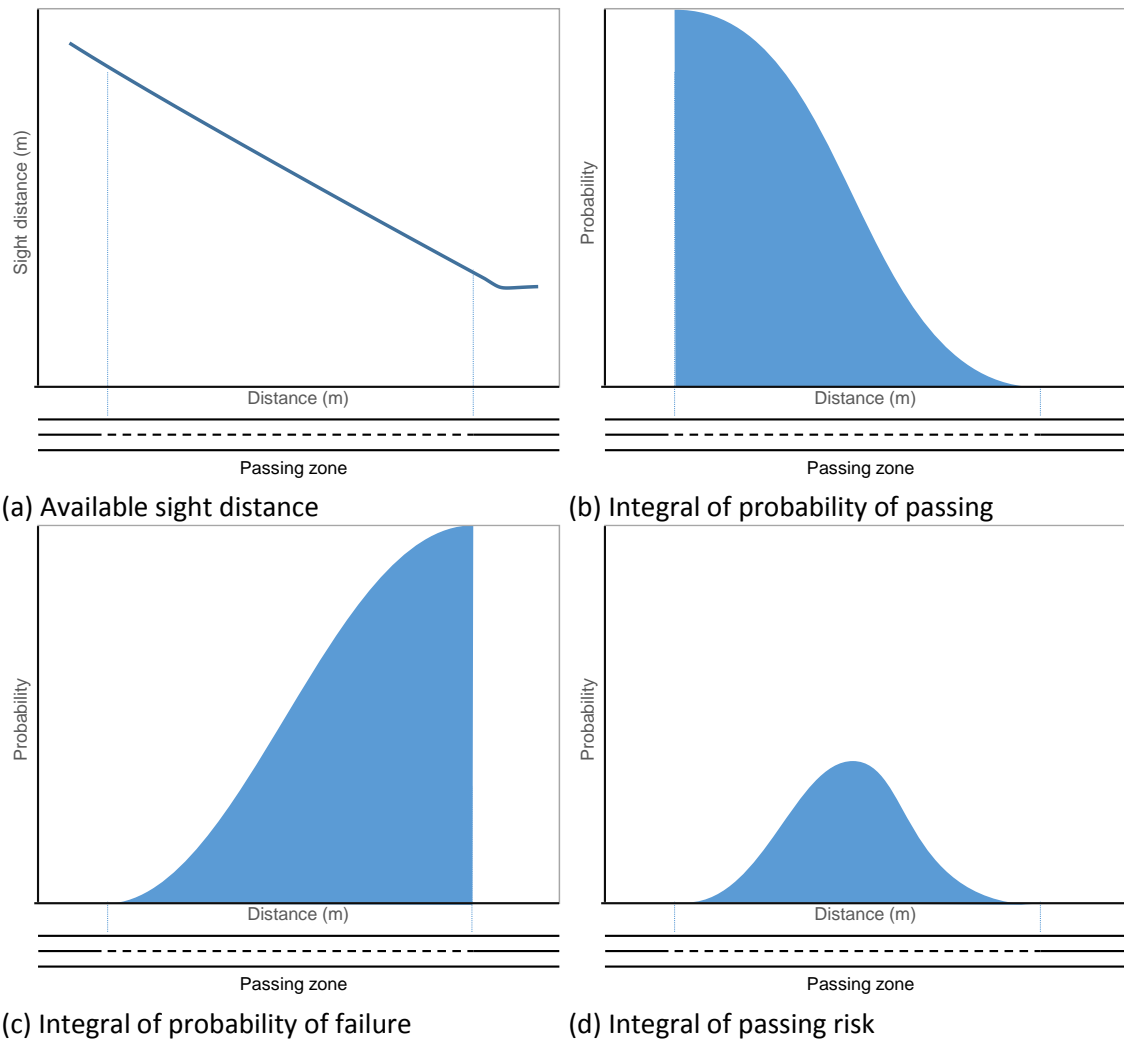


Figure 2. Passing zone safety parameters

Those variables were calculated numerically for a subsample of 138 passing zones (69 couples of passing zones) located in the Valencia Region. Available sight distances were obtained using aerial photography and street view images with a 25 m resolution.

As a result, a database of 138 passing zones was characterized in their geometry (*PZL*), expected level of safety (integrals of probability of passing, of probability of failure and of passing risk) as well as in traffic flow (Average Annual Daily Traffic, *AADT*). The Table 5 summarizes the values of these variables.

Variable	Min.	Mean	Max	Standard deviation	Count
<i>PZL</i> (m)	140	452	1250	256	138
<i>AADT</i> (veh/d)	992	8412	16714	4885	
<i>Ip</i>	32.5	157.5	649.5	127	
<i>If</i>	146.5	265	811	124.5	
<i>Ir</i>	30	58.5	169.5	25	

Table 5. Passing zone sample

The next section focused on the study of the potential correlation between those parameters and objective safety measures (crashes). For this section, passing zones were aggregated in 69 couples, because of crash data did not indicate the travel direction, and because passing zone

are highly symmetric. The mentioned passing zone variables were averaged between the two travel directions, and crashes were summed.

5.4. Crash data analysis

Lastly, the previously defined passing zone parameters were compared to existing crash data reports on a sample of passing zones. Crash data were extracted from Valencia Region cash database. This crash database contains more than 23,000 crash records.

Crashes that took place in the previously selected 69 passing zone couples were extracted and analyzed. They were separated between passing-related and no-passing related crashes, after reading individual crash reports. They are shown in Table 6.

Variable	Min.	Mean	Max	Standard deviation	Count
Y (crashes)	0	5.1	24	5.0	69
Yp (passing-related crashes)	0	0.4	4	0.7	

Table 6. Crashes in sample of passing zones

To analyze the relationship between crashes and passing zone characteristics, the number of crashes were estimated using safety performance functions (SPF). The effect of geometry of passing zones, as well as reliability analysis results were included as explanatory variables of the function. A similar procedure was carried out previously by Ibrahim and Sayed (Ibrahim and Sayed, 2011) for stopping sight distance on curves. An SPF is a statistical model that provides the expected number of crashes in a road element. It may be formulated as shown in equation 7.

$$Y = e^{\beta_0} \cdot AADT^{\beta_1} \cdot e^{\sum \beta_i \cdot X_i} \quad (7)$$

Where:

- Y is the estimated number of crashes.
- $AADT$ is the Average Annual Daily Traffic (veh/day).
- β_0 , β_1 , and β_i are coefficients.
- X_i are explanatory variables.

The error distribution in crash models follows a Poisson or negative binomial distribution, depending on the dispersion. This is explained by the characteristics of crash occurrence: discrete, rare (frequently equal to zero) and random.

In the present study, the road element considered for the model estimation was the passing zone couple. Different models were estimated using alternative explanatory variables, including passing zone length (PZL), integral of probability of acceptance (Ia), integral of probability of failure (If) and integral of passing risk (Ir). While $AADT$ considers the risks related to passing demand and presence of opposing vehicles, the explanatory variables may account for the risk of limited sight distance in passing zones.

The results of the estimation are shown in Table 7.

Model	Explanatory variable	<i>PZL</i>	<i>la</i>	<i>lf</i>	<i>lr</i>
Crashes	intercept	-6.1037***	-5.6849***	-5.4594***	-5.7561***
	log(AADT)	0.7878***	0.7591***	0.7601***	0.7736***
	explanatory variable coefficient	0.0014***	0.1388***	0.0414	0.3819*
	Type of error distribution	negative binomial			
	Over-dispersion parameter	2.5202	2.782	1.9083	1.9662
	Percent of deviation	39%	40%	28%	30%
	AIC	393	390	407	405
Passing related crashes	intercept	-9.0386**	-8.2116**	-8.1886**	-8.3236**
	log(AADT)	0.7904*	0.7569*	0.7076*	0.6906*
	explanatory variable coefficient	0.0017**	0.1058	0.1382**	0.8330***
	Type of error distribution	Poisson			
	Percent of deviation	19%	13%	18%	23%
	AIC	116	120	116	113
	Significance levels: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 ',' 0,1 ' ' 1				
AIC: Akaike Information Criterion					

Table 7. Safety performance functions estimation

Those results identified a relationship between some of the previously described passing zone parameters and the number of crashes. The better the correlation, the higher the value of percentage of deviation and lower the value of AIC. For the total number of crashes, the variables that obtained the best correlation were the passing zone length (as usually used for longer road segments) and the integral of passing probability. However, for passing-related crashes, the best correlation was obtained with the integral of passing risk (*lr*).

This result showed that there is a relationship between passing zone geometry (described by their available sight distance and length) and the expected number of crashes associated with passing maneuvers. According to this, the expected number of crashes is higher if the available sight distance is within the critical range, which usually occurs in either vertical or horizontal curves where passing is permitted.

6. Results

The results of the analysis section identified which factors affect the expected number of crashes. This result was used to obtain a passing zone design criteria, based on drivers' behavior and road safety. Therefore, the proposed criteria should minimize the value of the integral of passing risk for every passing zone.

However, the compliance of a passing zone criterion implies also that there are no violations of a no-passing zone. Therefore, the integral of risk included, in this section, the probability of the distance $d_{13passing}$ of being under the passing zone length. As a result, the noncompliance or failure of a passing zone is the occurrence of, at least, one of the following events:

- $PSD > ASD$.
- $d_{13passing} > PZL$.

The evaluation of the proposed criteria covered a wide range of lengths and sight distances, and not only those of dimensions close to the proposed threshold. A simple model of passing zone was used to demonstrate the adequacy of the method. This case (Figure 3) represents the sight distance in a passing zone that ends at a curve (horizontal or vertical). Sight distance decreases

linearly with distance. This model can be applied to sag vertical curves, too. This type of passing zone was the most common during the observations.

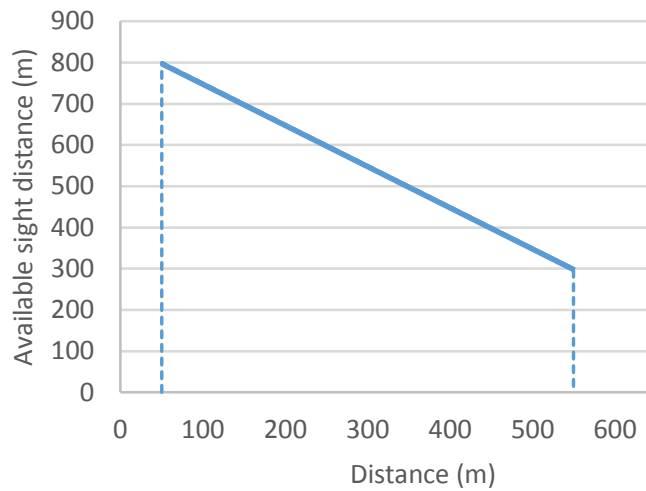


Figure 3. Available sight distance in a tangent passing zone

The correlation between crashes and passing zone geometry was used to develop new passing sight distance criteria. The Figure 4 represents the values of the integral of passing risk for a range of passing zones at a design speed of 100 km/h. In these figures, X-axis represents passing zone length and Y-axis the available sight distance at the starting point of the passing zone. The areas around label 'A' corresponded mainly to the risk of collision with opposing vehicles, while the label 'B' indicated a majority of no-passing zone violations.

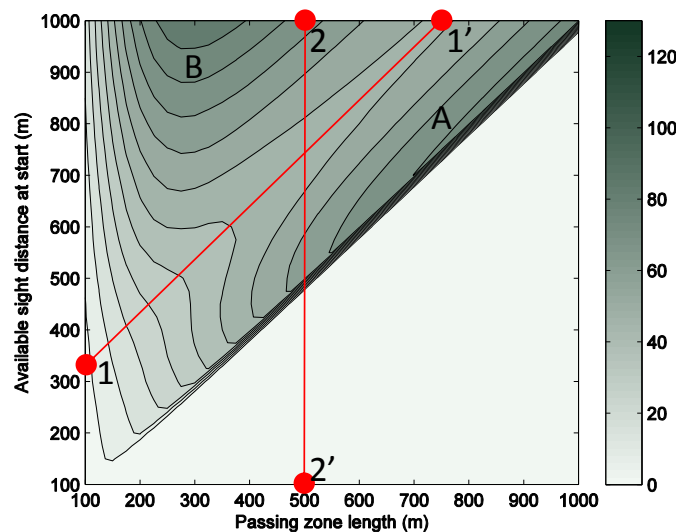
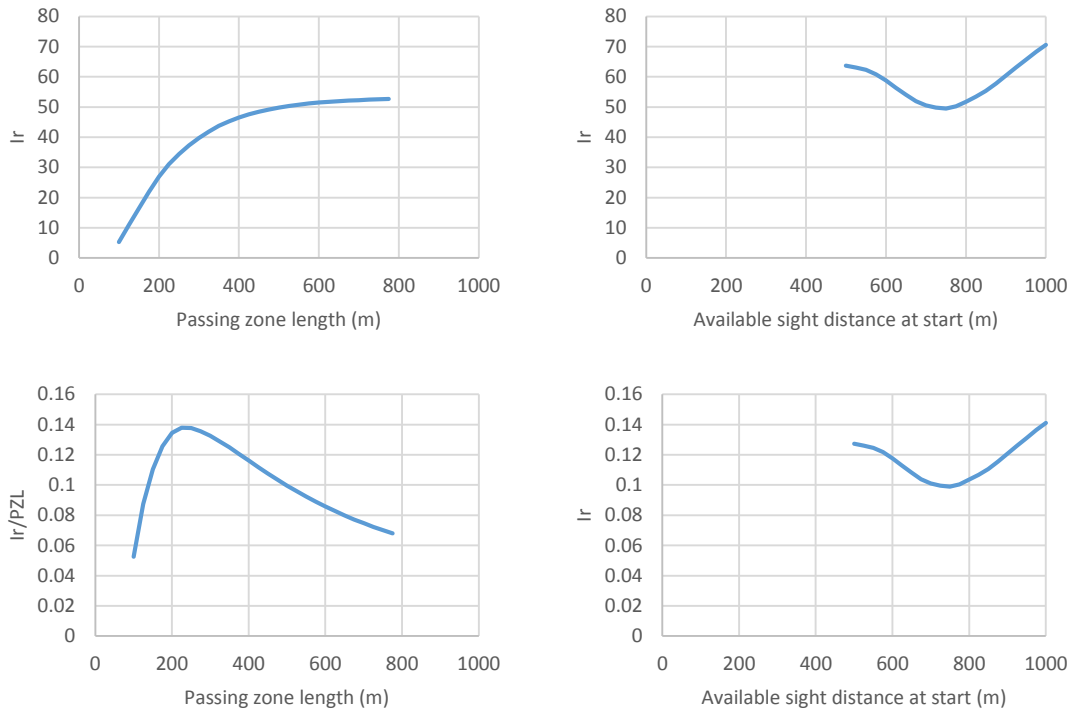


Figure 4. Values of I_r in passing zones ($V_d = 100$ km/h)

In Figure 4, there is an optimum value of ASD for each PZL that minimizes the values of I_r , reducing the probability of a passing gap and marked passing zone to be sufficient for a driver to complete safely and legally the maneuver. This optimum is achieved in the diagonal line 1-1', which corresponds to a certain value of available sight distance at the end of the passing zone.

From the values presented in Figure 4, the Figure 5 represents the effect of particular geometric characteristics. The first one shows the variation of I_r , in function of PZL, for the optimal available

sight distance at the end of the passing zone. Figure 5 shows that I_r increases very fast at short passing zones, and slower at longer passing zones. The second showed the existence of an optimum value of available sight distance, which minimizes the value of I_r , given a PZL . Figure 5 also plots the values of I_r/PZL (average of the integral of passing risk), showing that, starting at certain PZL value, the average of the integral of passing risk decreased.



(a) I_r and I_r/PZL vs PZL at start for ASD at end = 225 m (Section 2-2') (b) I_r vs ASD at start for $PZL = 500$ m (Section 2-2')

Figure 5. Sensitivity analysis of I_r ($Vd = 100$ km/h)

This procedure facilitated the development of passing sight distance criteria (and the corresponding value of minimum passing zone length) for different operating speeds. This consisted in the identification of optimum available sight distances at the end of the passing zone, as well as the identification of the points from which the increase of I_r was reduced.

The results are presented in Table 8. These criteria can be used in tangent road elements. According to the previous result and procedure, the criterion of available sight distance at the end of a passing zone is not a minimum value, but a recommended one. This means that providing more available sight distance at the end may be the cause of a higher risk, because of it would have a higher value of I_r .

Operating speed at tangent sections (85th Percentile) (km/h)	Design speed (km/h)	Recommended available sight distance at the end of the zone (m)	Minimum passing zone length (m)	Minimum available sight distance to start a passing zone length	<i>l_r</i> at longer passing zones
80	53	193	236	429	28
90	68	208	265	473	35
100	82	222	293	515	42
110	97	237	311	548	49
120	112	252	335	587	55

Table 8. Passing sight distance and passing zone length criteria

7. Discussion

Lastly, the proposed passing sight distance criteria were compared with current criteria in Spain (where data was collected) and US (only for comparison purposes). Traditionally, there were different criteria for road design and for road marking, being the first more conservative than the second is. US criteria were unified to the marking criteria, after last the last geometric design guideline review (American Association of State Highway and Transportation Official, 2011). In Spain, although there are still two different criteria, the draft of the oncoming review of the design guideline will also adopt the marking criteria standard.

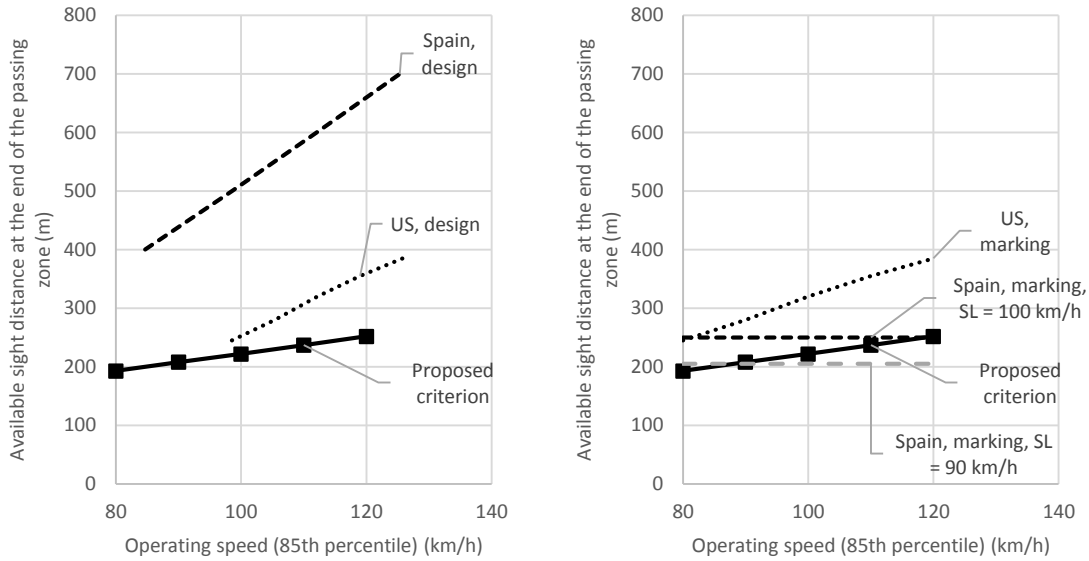
One of the key issues of passing sight distance standards is the reference speed. While geometric design standards are usually referred to design speed, marking standards may be referred to operating speed (in US) or to speed limit (*SL*) (in Spain).

Despite the unification of criteria in US, they are based in two different speed definitions and therefore their application is different. With regard of Spanish marking criteria, it should be pointed that two-lane rural roads usually have generic speed limits of 90 km/h (less than 1.5 m wide shoulders) or 100 km/h (more than 1.5 m wide shoulders). Only certain curves and intersections have specific reduced speed limitations. These speed limits are usually not linked to design speed. Tangents located most of passing zones, so they do not have specific speed limitations.

7.1. Passing sight distance criteria

The Figure 6 compares the proposed criteria with Spanish and US values. As can be seen, Spanish geometric design guideline (Ministerio de Fomento, 2000) provides a very conservative value (from a deterministic approach). This research showed that those values are not necessary safer, because they encourage drivers to pass, resulting in frequent no-passing zone violations. According to the definition of *l_r*, this criterion provides *l_r* within the range 50 to 80 (based on Figure 7). US design guideline (American Association of State Highway and Transportation Official, 2011) provides values closer to the proposed criterion, being *l_r* within the range 37 to 62 (based on Figure 7).

With respect of marking standards, the Spanish guideline (Ministerio de Fomento, 1987) is very close to the proposed criterion. However, as it is not based on operating speed, their values are not sensitive to speed. US marking criteria (Federal Highway Administration, 2009) provide slightly higher than the optimum sight distance values.



(a) Geometric design guidelines (b) Marking guidelines
Figure 6. Comparison of passing sight distance standards

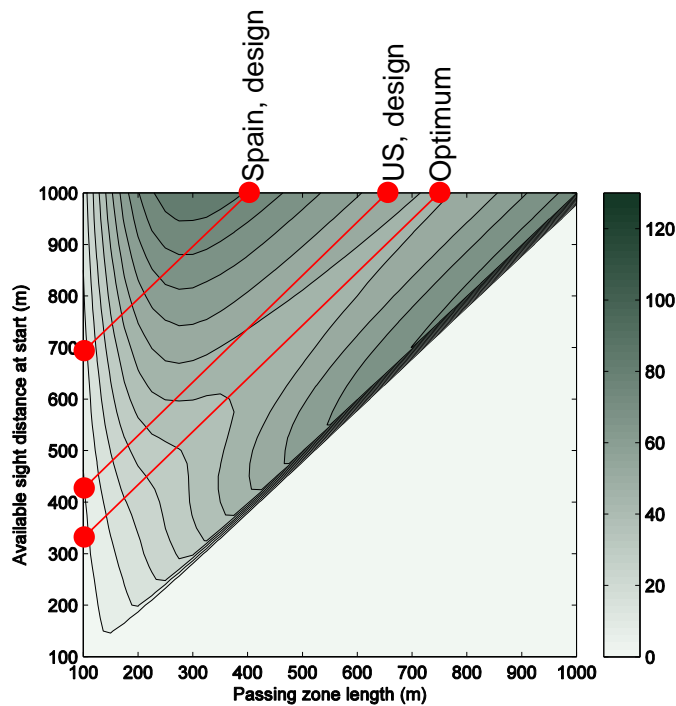


Figure 7. I_r for design standards ($V_d = 100$ km/h)

7.2. Minimum passing zone length

The minimum passing zone length standards are compared in Figure 8. Spanish criteria for existing roads (Ministerio de Fomento, 1987) and US criteria (Federal Highway Administration, 2009) are adequate for lower operating speed levels. However, they are not sufficient for higher speeds. The Figure 8 shows that with too short passing zones, the provision of values over the minimum may be riskier.

The Spanish marking guidelines for new roads (Ministerio de Fomento, 1987) provides conservative values of minimum passing zone length, that exceed the proposed criteria. In this case, this has no negative consequences on safety (according to Figure 5).

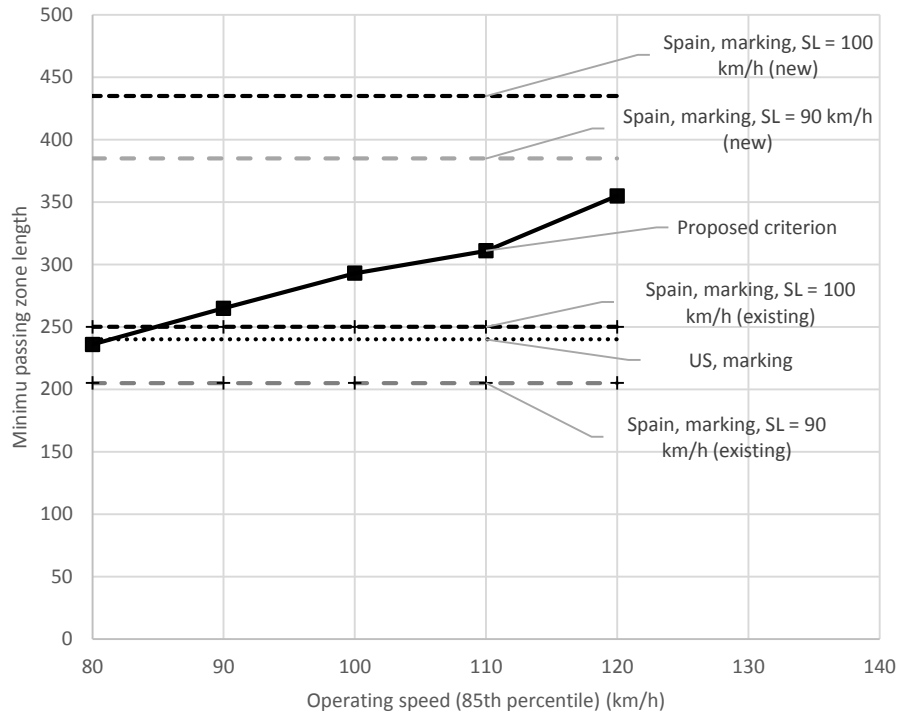


Figure 8. Comparison of minimum passing zone length standards

8. Conclusion

This research provided scientific support for the development of passing sight distance criteria. With this purpose, field data characterized passing behavior (gap acceptance and passing trajectories). Besides, crash data reports were compared with a probabilistic passing model covering complete passing zones.

The main results are summarized as follows:

- Passing gap acceptance decisions were highly correlated with available sight distance (if opposing vehicles were not visible) and with the distance to opposing vehicle (if it was visible). Drivers' decisions were different in both cases, being critical gaps much lower in case the opposing vehicle was visible (525 m vs 850 m).
- A uniform acceleration passing trajectory model was used to perform a reliability analysis. This resulted in the probability of noncompliance of a passing gap for individual passing decisions.
- The integral of the product of the probability of noncompliance and the probability of gap acceptance within a passing zone was correlated with the number of passing related crashes in that passing zone. This result demonstrated a relationship between geometric characteristics of the road and frequency of accidents caused by passing maneuvers.
- This relationship was used to provide a criterion to determine the location of passing zone in tangent road elements. Depending on the 85th percentile of operating speed in

the center of the tangent, passing sight distance at the end of the passing zone should be within the range 193 m (at $V_{85} = 80$ km/h) to 252 m (at $V_{85} = 120$ km/h).

- The results were also used to evaluate the risk of current passing sight distance standards. PSD of Spanish design standard were found to be too high, which would encourage drivers to pass, resulting in a high number of passing zone violations if the passing zones are short. Marking standards were closer to the criteria proposed in this work. However, the use of operating speed as reference speed is highly recommended. It may be different from design speed and posted speed limit, because of most of passing zones are located in long tangents.

This work has provided scientific evidence on passing sight distance standards, reducing the number of assumptions in comparison with current guidelines. However, the results are limited by the available crash data reports. Although the results of this paper were based on statistically significant factors, the sample size and level of detail of these crash data could be improved to increase the level of significance of the safety performance functions.

9. Acknowledgements

Part of this research was included in the project “Desarrollo de modelos de distancias de visibilidad de adelantamiento”, with reference code TRA2010-21736 and subsidized by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness.

10. References

American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 5th Edition.

American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 6th Edition.

Carlson, P., Miles, J., Johnson, P., 2006. Daytime High-Speed Passing Maneuvers Observed on Rural Two-Lane, Two-Way Highway: Findings and Implications. Transportation Research Record 1961, 9–15. doi:10.3141/1961-02

Easa, S.M., 1993. Reliability-based design of intergreen interval at traffic signals. Journal of Transportation Engineering 119, 255–271.

Easa, S.M., 1994. Reliability-based design of sight distance at railroad grade crossings. Transportation Research Part A: Policy and Practice 28, 1–15. doi:10.1016/0965-8564(94)90038-8

Easa, S.M., 2000. Reliability approach to intersection sight distance design. Transportation Research Record 42–52.

El-bassiouni, S., Sayed, T., 2010. Design Requirements for Passing Sight Distance : A Risk-based Approach, in: 90th Transportation Research Board Annual Meeting.

Faghri, A., Demetsky, M.J., 1988. Reliability and risk assessment in the prediction of hazards at rail-highway grade crossings, Transportation Research Record.

Farah, H., Bekhor, S., Polus, A., 2009. Risk evaluation by modeling of passing behavior on two-lane rural highways. Accident; analysis and prevention 41, 887–94. doi:10.1016/j.aap.2009.05.006

- Farah, H., Toledo, T., 2010. Passing behavior on two-lane highways. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 13, 355–364. doi:10.1016/j.trf.2010.07.003
- Federal Highway Administration, 2009. *Manual on Uniform Traffic Control Devices*.
- Ghods, A.H., Saccomanno, F.F., 2014. Microscopic Overtaking Gap Acceptance Model for Two-lane Highways, in: 93rd Transportation Research Board Annual Meeting. Washington DC (US).
- Glennon, J.C., 1988. New and improved model of passing sight distance on two-lane highways, *Transportation Research Record*.
- Harwood, D.W., Gilmore, D.K., Richard, K.R., 2010. Passing Sight Distance Criteria for Roadway Design and Marking. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2195, 36–46.
- Harwood, D.W., Gilmore, D.K., Richard, K.R., Dunn, J.M., Sun, C., 2008. Passing Sight Distance Criteria. NCHRP Report 605.
- Harwood, D.W., Glennon, J.C., 1976. Framework for Design and Operation of Passing Zones on Two-Lane Highways. *Transportation Research Record* 601, 45–50.
- Harwood, D.W., Glennon, J.C., 1989. Passing Sight Distance Design for Passenger Cars and Trucks. *Transportation Research Record* 1208, 59–69.
- Hassan, Y., Easa, S.M., El Halim, A.O.A., 1996. Passing sight distance on two-lane highways: Review and revision. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 30, 453–467. doi:10.1016/0965-8564(95)00032-1
- Hegeman, G., 2008. Assited Overtaking, An Assessment of Overtaking on Two-Lane Rural Roads. PhD Thesis. TU Delft.
- Ibrahim, S.E., Sayed, T., 2011. Developing safety performance functions incorporating reliability-based risk measures. *Accident Analysis and Prevention* 43, 2153–2159. doi:10.1016/j.aap.2011.06.006
- Ismail, K., Sayed, T., 2009. Risk-based framework for accommodating uncertainty in highway geometric design. *Canadian Journal of Civil Engineering* 36, 743–753. doi:10.1139/L08-146
- Khoury, J. El, Hobeika, A., 2007. Incorporating Uncertainty into the Estimation of the Passing Sight Distance Requirements. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 22, 347–357. doi:10.1111/j.1467-8667.2007.00491.x
- Khoury, J. El, Hobeika, A.G., 2012. Integrated Stochastic Approach for Risk and Service Estimation : Passing Sight Distance Application. *Journal of Transportation Engineering* 571–579. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000366.
- Llorca, C., García, A., 2011. Evaluation of Passing Process on Two-Lane Rural Highways in Spain with New Methodology Based on Video Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2262, 42–51. doi:10.3141/2262-05
- Llorca, C., García, A., Moreno, A.T., Pérez-Zuriaga, A.M., 2013a. Influence of age, gender and delay on overtaking dynamics. *IET Intelligent Transport Systems* 7, 174–181. doi:10.1049/iet-its.2012.0147

- Llorca, C., Moreno, A.T., García, A., Pérez-Zuriaga, A.M., 2013b. Daytime and Nighttime Passing Maneuvers on a Two-Lane Rural Road in Spain. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2358, 3–11. doi:10.3141/2358-01
- Llorca, C., Moreno, A.T., Lenorzer, A., Casas, J., Garcia, A., 2014a. Development of a new microscopic passing maneuver model for two-lane rural roads. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. doi:10.1016/j.trc.2014.06.001
- Llorca, C., Moreno, A.T., Sayed, T., García, A., 2014b. Sight Distance Standards Based on Observational Data Risk Evaluation of Passing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2404, 18–26. doi:10.3141/2404-03
- Mahsuli, M., Haukaas, T., 2013. Computer Program for Multimodel Reliability and Optimization Analysis. *Journal of Computing in Civil Engineering* 27, 87–98. doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000204
- Ministerio de Fomento, 1987. Instrucción de Carreteras 8.2 IC: Señalización horizontal.
- Ministerio de Fomento, 2000. Instrucción de Carreteras 3.1 IC: Trazado.
- Molinero, A., Carter, E., Naing, C., Simon, M., Hermintte, T., 2008. Accident causation and pre-accidental driving situations. Part 1. Overview and general statistics, TRACE - Traffic Accident Causation in Europe Report.
- Navin, F., 1990. Safety Factors for Road Design: Can They Be Estimated? *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1280, 181–189.
- Pollatscheck, M.A., Polus, A., 2005. Modelling Impatience of Driver in Passing Manuevers, in: *Transportation and Traffic Theory. Flow, Dynamics and Human Interaction*. 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory. College Park Maryland (US).
- Polus, A., Livneh, M., Frischer, B., 2000. Evaluation of the Passing Process on Two-Lane Rural Highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1701, 53–60.
- Richl, L., Sayed, T., 2006. Evaluating the Safety Risk of Narrow Medians Using Reliability Analysis. *Journal of Transportation Engineering* 132, 366–375. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:5(366)
- S., R., Polus, A., Cohen, M.A., 2013. Models for Estimation of Drivers' Impatience on Two-Lane Rural Highways, in: *92nd Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington DC (US).
- Transportation Research Board, 2010. *Highway Capacity Manual*.
- Wang, Y., Cartmell, M.P., 1998. New model for passing sight distance on two-lane highways. *Journal of Transportation Engineering* 124, 536–544.

IV) Inventario de tramos

Carretera	Inicio	Fin	IMD (veh/día)	%Pesados	Titular	Longitud (km)	Pk inicio	Pk final	Sección transversal (caizada/plat aforma)
CV-405	Torrent (A-7)	Montserrat	14241	6	D	11.0	2.0	13.0	7/10
CV-415	Picassent	CV-405	5388	5	D	9.0	1.0	10.0	6/7
CV-415	CV-405	CV-416	5545	2	D	3.0	10.0	13.0	6/7
CV-415	CV-416	Turis	2703	3	D	9.0	13.0	22.0	6/7
CV-580	CV-590	Chella	7622	5	D	5.0	1.0	6.0	6/8
CV-580	Chella	Bolbaite	4114	7	D	3.0	6.0	9.0	6/9
CV-580	Bolbaite	Navarres	3969	4	D	4.0	9.0	13.0	6/10
CV-315	CV-32	Náquera	7935	4	D	6.0	7.0	13.0	7/11 arcén bici
CV-376	Lliria	CV-364	4437	5	D	7.8	0.0	7.8	6/7
CV-376	CV-364	Pedralba	2435	5	D	4.2	7.8	12.0	6/7
CV-370	Ribarroja	Vilamarxant	7661	4	D	4.0	15.0	19.0	7/10
CV-370	Vilamarxant	Pedralba	2526	4	D	10.0	20.0	30.0	6/7 y 7/8
CV-374	Loriguilla	Ribarroja	7775	5	D	6.0	1.0	7.0	6/7
CV-310	Bétera	Náquera	6416	5	D	10.0	7.0	17.0	7/11
CV-520	A-7	Alfarp	6472	11	D	6.0	1.0	7.0	7/10
CV-525	Alginet	Algemesi	8322	14	D	5.0	0.0	5.0	7/10
CV-509	Sueca	AP-7	5668	4	D	5.0	0.0	5.0	7/10
CV-510	Alzira	Corbera	7881	6	D	6.0	0.0	6.0	7/10
CV-10	Acc nord Cabanes	Acc sud Vilanova	4693	-	C	17.0	45.0	62.0	7/10
CV-10	Acc sud Vilanova	CV-131	3549	-	C	5.3	62.0	67.3	7/10
CV-10	CV-131	CV-132	2873	13	C	14.8	67.3	82.1	7/10
CV-11	N-232	San Rafael	1705	12	C	10.6	0.0	10.6	7/10
CV-11	San Rafael	N-238	3181	4	C	10.2	10.6	20.8	7/10
CV-13	Aeropuerto	N-340	4000	40	C	13.0	3.0	16.0	7/10 + carril lentos
CV-15	CV-10	CV-160	9305	2	C	2.0	0.0	2.0	7/10
CV-15	CV-160	CV-156	6179	7	C	7.3	2.0	9.3	7/10
CV-15	CV-156	CV-170	4985	7	C	4.2	9.3	13.5	7/10
CV-15	CV-170	CV-164	2324	8	C	18.5	13.5	32.0	7/10
CV-15	CV-164	CV-129	1297	11	C	2.2	32.0	34.1	7/10
CV-15	CV-129	CV-166	2455	11	C	8.6	34.1	42.7	7/10

Carretera	Inicio	Fin	IMD (veh/día)	%Pesados	Titular	Longitud (km)	Pk inicio	Pk final	Sección transversal (calzada/plataforma)
CV-21	CV-16	CV-189	4810	15	C	5.8	0.0	5.8	7/10
CV-21	CV-189	CV-20	3809	21	C	8.7	5.8	14.5	7/10
CV-25	CV-35	Marines	10267	2	C	4.9	0.0	4.9	7/10
CV-25	Marines	CV-333	3507	2	C	1.9	4.9	6.8	7/10
CV-25	CV-333	Olocau	2340	-	C	3.9	6.8	10.6	7/10
CV-333	CV-310	CV-331	6842	2	C	1.6	0.0	1.6	7/10
CV-333	CV-331	Porta Coeli	4265	2	C	6.0	1.6	7.5	7/10
CV-333	Porta Coeli	CV-25	2081	-	C	5.3	7.5	12.8	7/10
CV-35	Casinos Oest	Casinos	6949	14	C	2.0	38.0	40.0	7/10
CV-35	Casinos	CV-395	5797	9	C	7.8	40.0	47.8	7/10
CV-35	CV-395	CV-347	3155	9	C	2.5	47.8	50.3	7/10
CV-35	CV-347	Losa	3667	6	C	3.2	50.3	53.4	7/10
CV-35	CV-394	CV-3390	2665	5	C	10.1	53.4	63.5	7/10
CV-35	CV-3390	CV-396	2366	4	C	4.3	63.5	67.8	7/10
CV-35	CV-396	CV-390	2261	-	C	5.4	67.8	73.2	7/10
CV-50	N-332	Tavernes	16164	4	C	1.5	0.0	1.5	7/10
CV-50	Tavernes	CV-600	11010	5	C	5.0	1.5	6.5	7/10
CV-50	CV-600	CV-570	10185	6	C	10.2	6.5	16.6	7/10
CV-50	CV-41	CV-42	12832	4	C	4.6	28.4	33.0	7/10
CV-50	CV-524	CV-5200	5091	-	C	7.4	33.0	40.4	7/10
CV-50	CV5200	CV-405	2544	7	C	10.0	40.4	50.4	7/10
CV-50	CV-405	CV-415	968	-	C	10.9	50.4	61.3	7/10
CV-50	CV-415	CV-424	4798	4	C	5.8	61.3	67.0	7/10
CV-50	CV-424	A-3	5829	4	C	5.6	67.0	72.6	7/10
CV-50	A-3	CV-370	4517	8	C	13.3	72.6	85.9	7/10
CV-41	CV-50	CV-543	12732	4	C	4.2	0.0	4.2	7/10
CV-41	CV-543	CV-560	10395	3	C	4.1	4.2	8.4	7/10
CV-41	CV-560	CV-575	7348	5	C	3.6	8.4	12.0	7/10
CV-41	CV-575	N-340	8237	3	C	7.6	12.0	19.6	7/10
CV-42	CV-525	CV-516	4607	8	C	9.9	5.1	14.9	7/9
CV-42	CV-516	CV-520	6691	6	C	7.4	7.5	14.9	7/9
CV-610	CV-575	CV-612	4552	6	C	7.4	5.6	12.9	7/10
CV-610	CV-612	CV-608	2912	-	C	4.7	12.9	17.6	6/7
CV-610	CV-608	CV-60	2647	4	C	6.6	17.6	24.2	7/10
CV-60	CV-40	L'Olleria	8593	14	C	2.9	0.0	2.9	7/10
CV-60	L'Olleria	N-340	7046	12	C	3.1	2.9	6.0	7/10
CV-60	N-340	Cami Real	6311	13	C	2.4	6.0	8.4	7/10
CV-60	Cami Real	CV-669	8815	10	C	2.5	8.4	10.9	7/10
CV-60	CV-669	CV-617	9493	9	C	5.1	10.9	16.0	7/10
CV-60	CV-617	CV-610	8507	7	C	6.9	16.0	22.9	7/10

Carretera	Inicio	Fin	IMD (veh/día)	%Pesados	Titular	Longitud (km)	Pk inicio	Pk final	Sección transversal (calzada/plataforma)
CV-590	CV-584	CV-585	5215	-	C	3.6	48.7	52.3	7/8
CV-590	CV-585	N-430	6608	4	C	9.2	52.3	61.5	7/8
CV-81	Bocairent	CV-795	4548	10	C	7.1	14.0	21.1	7/10
CV-81	CV-795	CV-807	4490	11	C	12.7	21.1	33.8	7/10
CV-81	CV-807	A-31	5710	7	C	6.9	33.8	40.7	7/10
CV-81	A-31	L.P. Murcia	5024	5	C	16.3	40.7	57.0	7/10
CV-83	Monóver	Camí de la Pedrera	9162	5	C	2.3	4.4	6.7	7/10
CV-83	Camí de la Pedrera	CV-834	5985	4	C	6.3	6.7	13.0	7/10
CV-83	CV-834	CV-836	5555	5	C	12.0	13.0	25.0	7/10
CV-845	N-325	CV-844	4483	6	C	7.3	0.0	7.3	6/7
CV-845	CV-844	CV-873	2271	-	C	8.1	7.3	15.4	6/7
CV-845	CV-873	L.P. Murcia	1254	-	C	3.6	15.4	19.0	6/7
CV-500	CV-502	N-332	8936	2	C	7.5	21.4	28.9	7/10
CV-515	CV-513	N-332	6102	3	C	6.6	4.1	10.8	7/10
CV-185	N-340	CV-18	12991	2	C	4.2	0.0	4.2	7/10
CV-95	CV-930	CV-920	11372	4	C	6.0	0.0	6.0	7/10
CV-95	CV-920	CV-940	8866	4	C	12.8	6.0	18.8	7/10
CV-95	CV-945	CV-940	8272	4	C	5.6	13.3	18.9	7/10
CV-95	CV-940	N-332	7327	3	C	8.0	18.8	26.8	7/10
N-232	Vinaros	San Jorge	6166	12	M	10.0	0.0	10.0	7/10
N-232	San Jorge	Chert	5034	12	M	15.0	10.0	25.0	7/10
N-232	Chert	Port de Querol	2768	12	M	0.0	35.0	35.0	7/10
N-225	A-23	Vall d'Uxo	5925	15	M	13.0	0.0	13.0	7/10
N-225	Vall d'Uxo	A-7	5414	15	M	2.0	13.0	15.0	7/10
N-330	Almansa	Ayora	3715	19	M	19.0	94.0	113.0	7/10
N-330	Ayora	PK 146.5	2200	9	M	32.5	114.0	146.5	7/10
N-330	PK 146.5	N-332	3500	9	M	23.5	146.5	170.0	7/10
N-330	Utiel	Talayuelas	3989	14	M	30.0	190.0	220.0	7/10
N-330	Talayuelas	Landete	1582	14	M	15.0	220.0	235.0	7/10
N-332	Albacete	Mahora	6230	11	M	22.0	358.0	380.0	7/10
N-332	Mahora	Casas Ibañez	3677	11	M	26.0	380.0	406.0	7/10
N-332	Casas Ibañez	Alborea	2929	10	M	6.0	406.0	412.0	7/10
N-332	Alborea	Los Isidros	1300	23	M	28.0	412.0	440.0	7/10
N-332	Los Isidros	Requena	2870	20	M	13.0	440.0	453.0	7/10

Leyenda

Titular: M: Ministerio de Fomento, C: Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente, D: Diputación Provincial de Valencia

V) Zonas de adelantamiento en los tramos del vehículo instrumentalizado

Tramo 1: N-225 entre los PK 0+000 y 15+000

Sentido ascendente			
Zona	PK inicio (m)	PK fin (m)	Longitud de la zona (m)
1	1+132	1+582	450
2	3+097	3+646	549
3	4+889	5+154	265
4	5+481	6+754	1273
5	7+663	8+292	629
6	10+675	11+959	1284
7	12+508	13+110	601
8	14+353	15+000	647
Total			5699

Sentido descendente			
Zona	PK inicio (m)	PK fin (m)	Longitud de la zona (m)
1	1+132	1+582	450
2	3+097	3+646	549
3	4+889	5+154	265
4	5+481	6+754	1273
5	7+663	8+292	629
6	10+675	11+959	1284
7	12+508	13+110	601
8	14+353	15+000	647
Total			5699

Tramo 2: CV-35 entre los PK 40+000 y 50+000

Sentido ascendente			
Zona	PK inicio (m)	PK fin (m)	Longitud de la zona (m)
1	41+680	42+456	776
2	42+802	43+237	435
3	43+417	44+683	1266
4	45+606	47+460	1855
5	48+093	48+667	574
6	49+515	49+989	475
Total			5381

Sentido descendente			
Zona	PK inicio (m)	PK fin (m)	Longitud de la zona (m)
1	41+991	42+802	811
2	43+844	44+978	1133
3	46+001	47+689	1689
4	48+408	49+017	608
Total			4242

Tramo 3: CV-50 entre los PK 76+000 y 86+000

Sentido ascendente			
Zona	PK inicio (m)	PK fin (m)	Longitud de la zona (m)
1	76+554	77+312	757
2	77+928	78+200	272
3	78+521	79+669	1148
4	81+240	81+638	398
5	82+987	83+307	319
6	84+087	84+930	843
Total			3738

Sentido descendente			
Zona	PK inicio (m)	PK fin (m)	Longitud de la zona (m)
1	76+554	77+551	996
2	78+101	78+463	362
3	78+723	79+938	1215
4	80+439	80+706	268
5	81+482	81+919	438
6	82+840	83+556	717
7	84+345	85+005	660
Total			4655

Tramo 4: CV-50 entre los PK 34+000 y 40+000

Sentido ascendente			
Zona	PK inicio (m)	PK fin (m)	Longitud de la zona (m)
3-A1	34+532	34+829	297
3-A2	34+977	36+104	1127
3-A3	36+690	36+954	264
3-A4	37+115	37+386	271
3-A5	37+638	38+395	757
3-A6	38+934	39+486	552
Total			3268

Sentido descendente			
Zona	PK inicio (m)	PK fin (m)	Longitud de la zona (m)
3-D1	34+632	34+977	345
3-D2	35+183	36+166	983
3-D3	36+790	37+073	283
3-D4	37+307	37+535	228
3-D5	37+719	38+485	766
3-D6	39+058	39+586	528
Total			3133

Tramo 5: CV-415 entre los PK 1+000 y 9+500

Sentido ascendente			
Zona	PK inicio (m)	PK fin (m)	Longitud de la zona (m)
1	1+788	2+388	600
2	2+476	3+726	1250
3	4+246	4+593	347
4	5+378	5+869	491
5	6+107	6+242	135
6	6+426	6+628	202
7	6+747	6+865	118
8	7+413	8+641	1228
9	8+796	8+940	144
Total			4516

Sentido descendente			
Zona	PK inicio (m)	PK fin (m)	Longitud de la zona (m)
1	1+954	2+473	519
2	2+587	3+748	1161
3	4+245	4+586	341
4	5+539	5+984	445
5	6+185	6+340	155
6	6+519	6+722	203
7	6+857	6+956	99
8	7+527	8+715	1188
9	8+953	9+124	171
Total			4282

Tramo 6: CV-405 entre los PK 3+500 y 13+500

Sentido ascendente			
Zona	PK inicio (m)	PK fin (m)	Longitud de la zona (m)
1	4+962	5+866	904
2	7+329	7+605	276
3	7+935	8+130	195
4	8+722	9+140	418
5	9+238	9+378	140
6	9+451	9+741	290
7	10+646	10+898	253
8	11+324	12+211	887
9	12+406	12+872	466
Total			3829

Sentido descendente			
Zona	PK inicio (m)	PK fin (m)	Longitud de la zona (m)
1	4+780	4+996	216
2	5+096	5+281	185
3	5+416	6+047	631
4	6+353	6+595	242
5	6+933	7+189	256
6	7+481	7+753	272
7	8+087	8+270	182
8	8+909	9+273	363
9	9+378	9+503	125
10	9+638	9+741	103
11	10+646	11+035	389
12	11+493	12+344	851
13	12+582	12+872	289
Total			4106

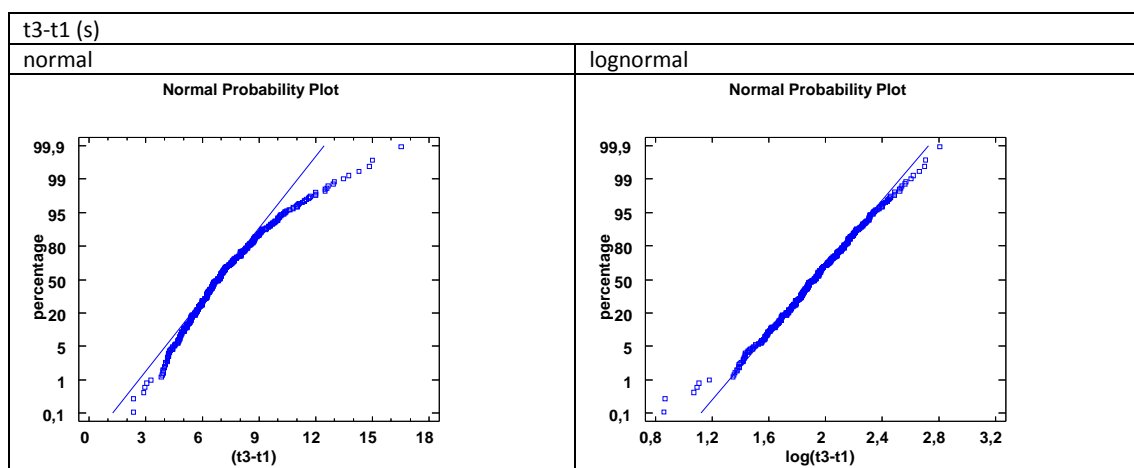
VI) Resumen del análisis estadístico

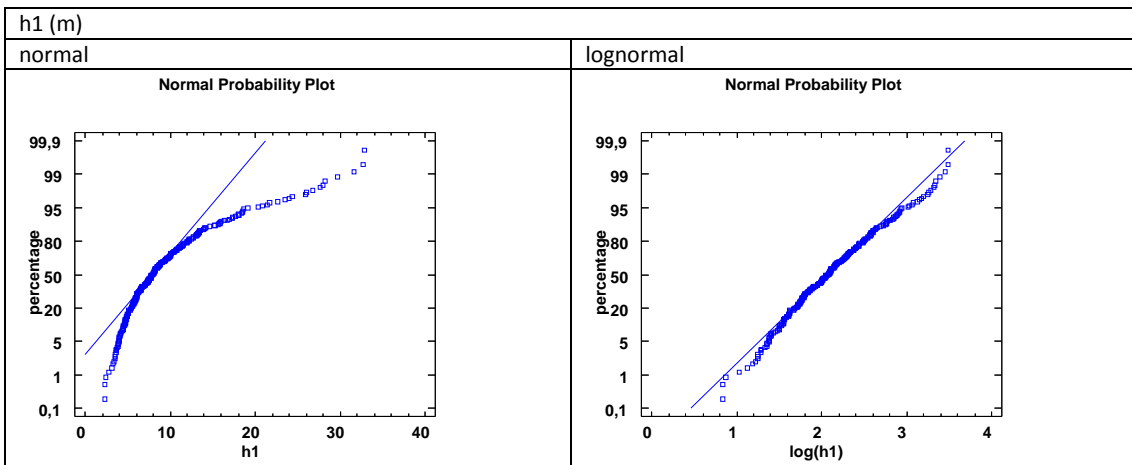
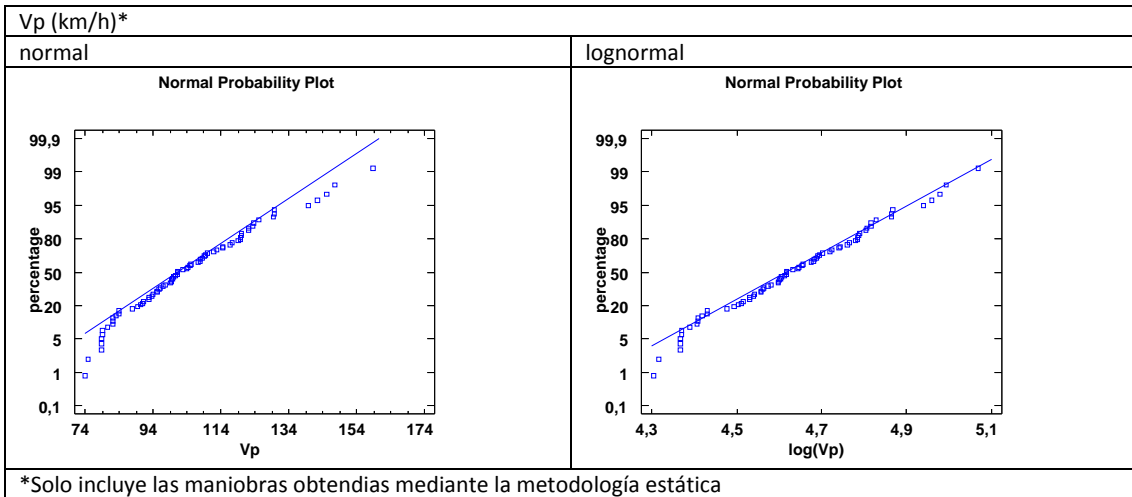
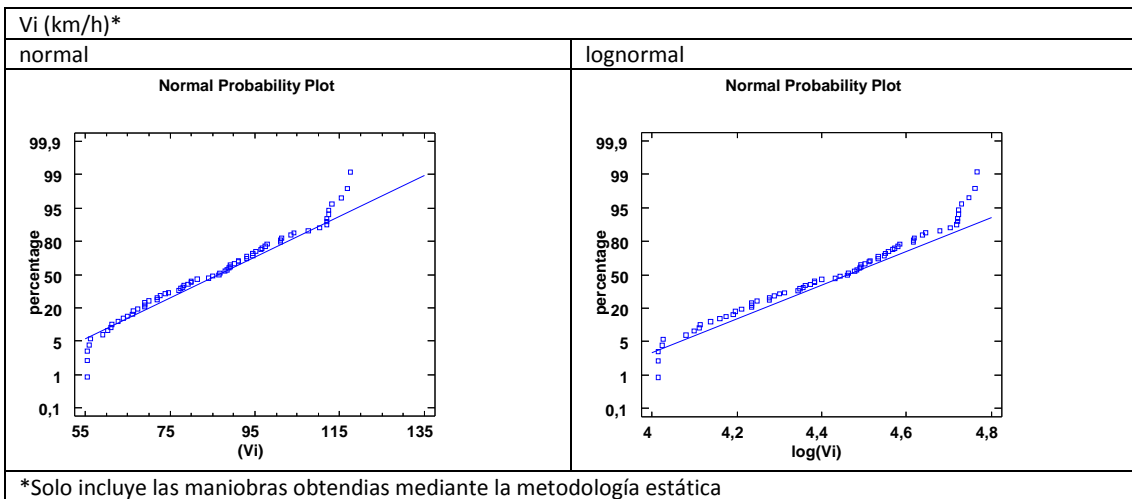
Muestra 1: maniobras simples con vehículo adelantado ligero

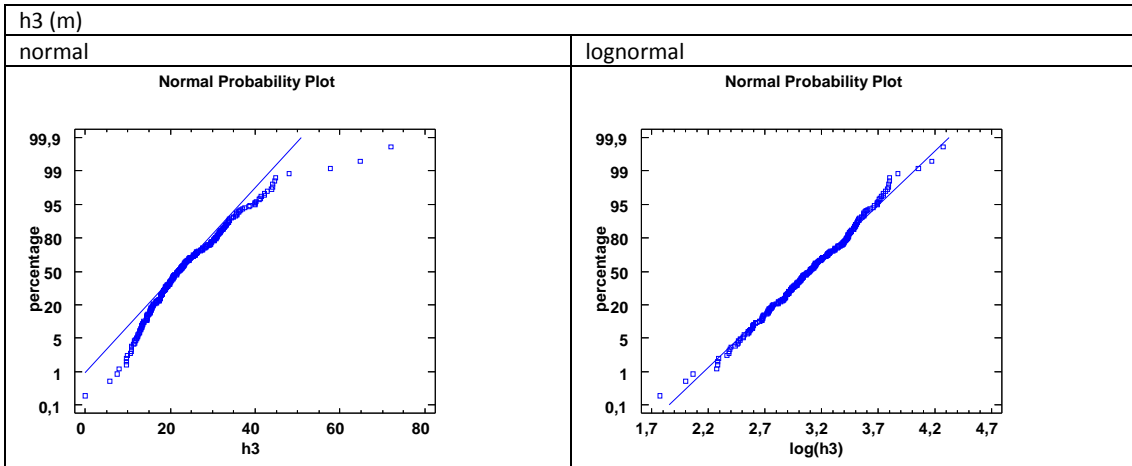
Estadísticos básicos

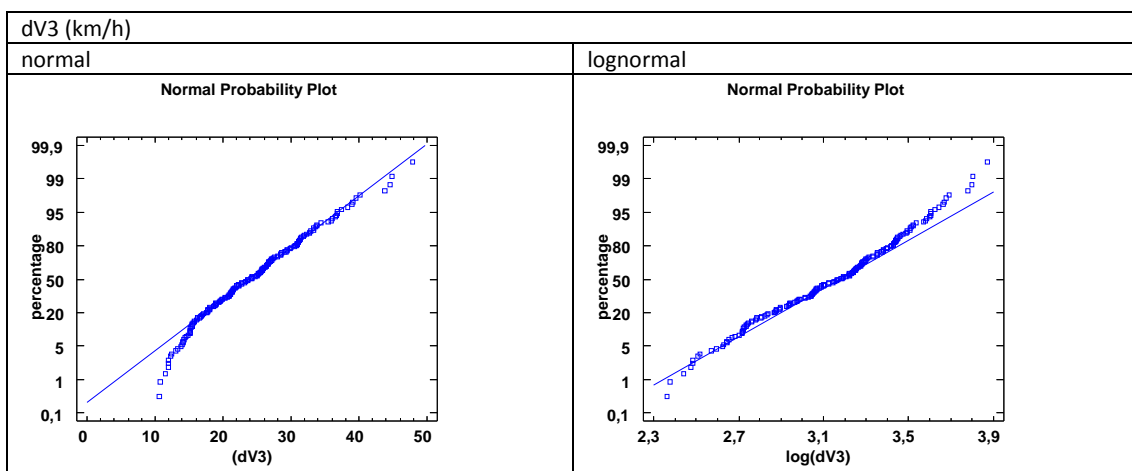
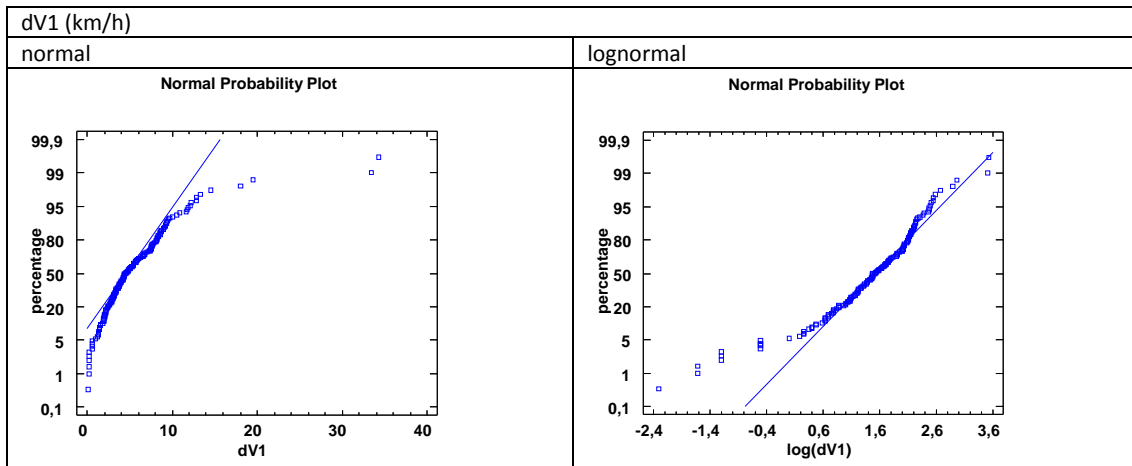
Variable	t3-t1	Vi	Vp	t4-t3	h1	h3	dV1	dV3
Cuenta	559	382	385	297	294,0	295,0	159	176
Media	7,11	69	90	9,55	9,5	23,7	6	24
Mediana	6,84	65	87	7,32	8,0	22,0	5	24
SD	2,00	13	16	7,78	5,7	9,4	5	8
Mínimo	2,36	44	54	0,51	2,3	5,9	0	11
Máximo	16,51	117	159	39,96	32,9	71,9	34	48
Rango	14,15	73	105	39,45	30,6	66,0	34	37
Percentil 15	5,33	59	76	3,44	5,0	15,3	2	16
Percentil 85	8,80	78	102	14,20	13,4	32,5	9	31
Coef. Asimetría	9,270	11,024	9,296	13,356	12,543	8,416	15,586	2,648
Coef. Curtosis	8,656	7,247	8,204	13,399	12,591	10,428	38,325	-0,324

Verificación de normalidad y log-normalidad







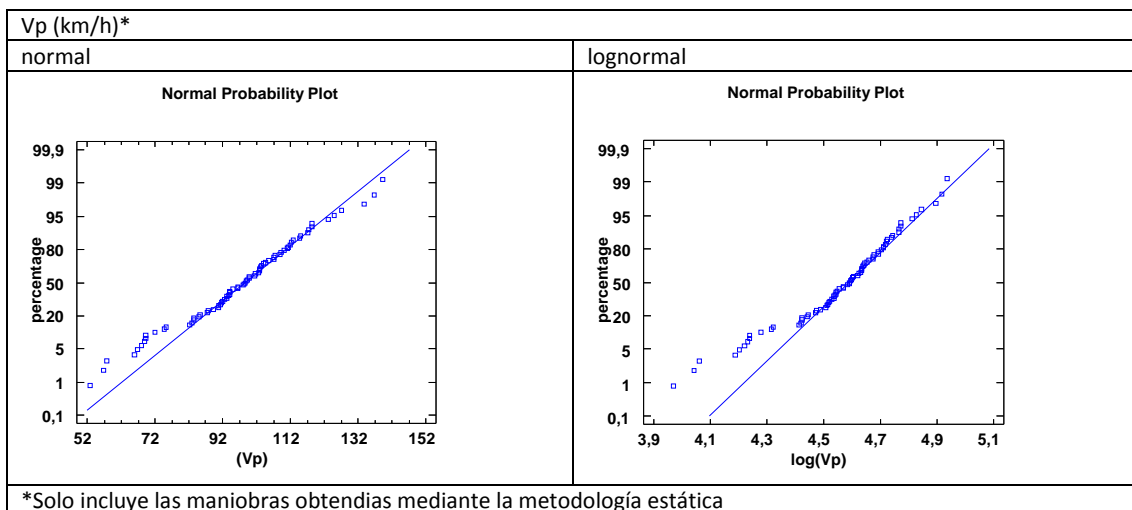
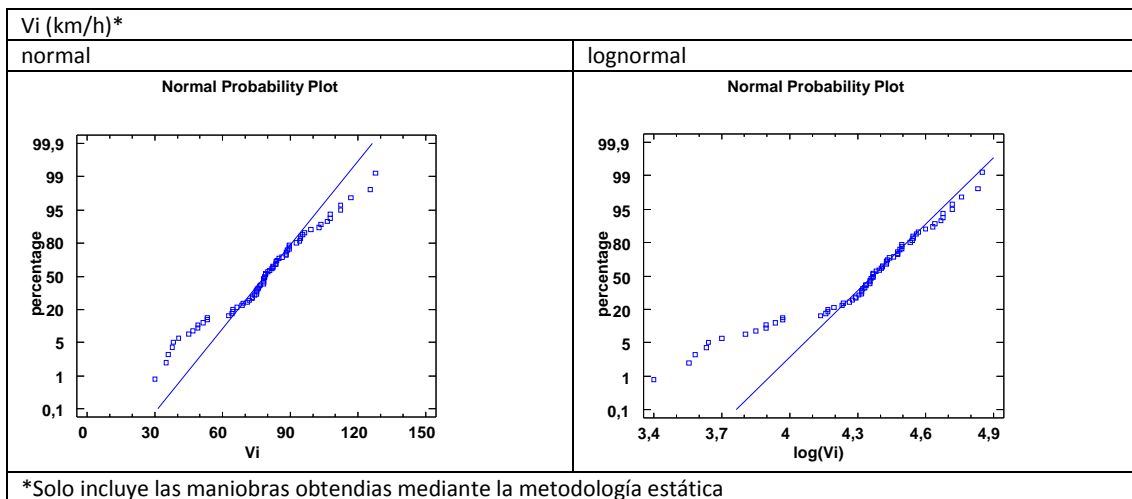
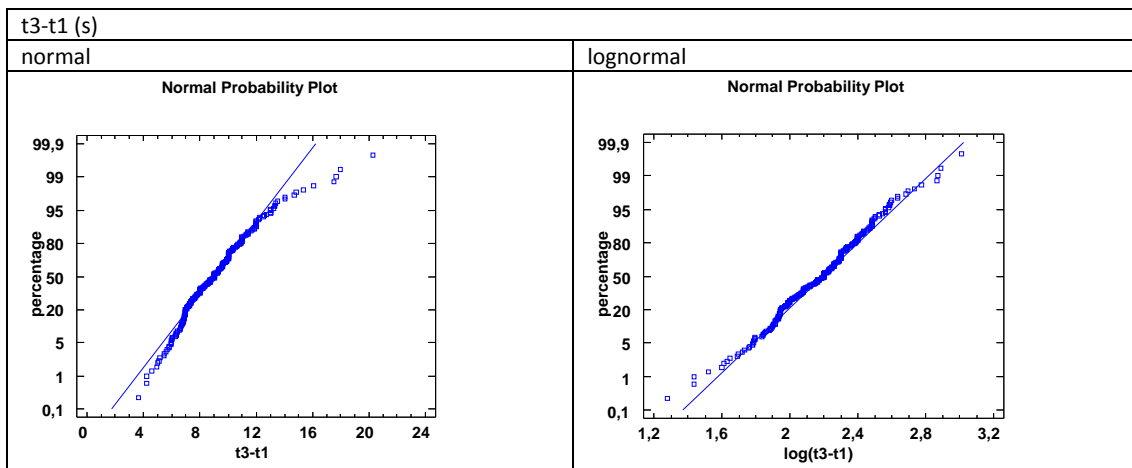


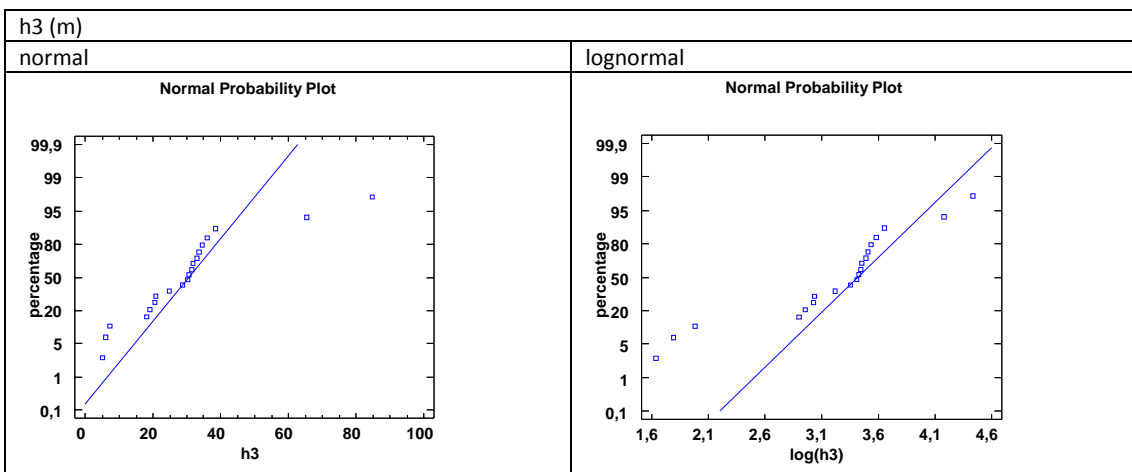
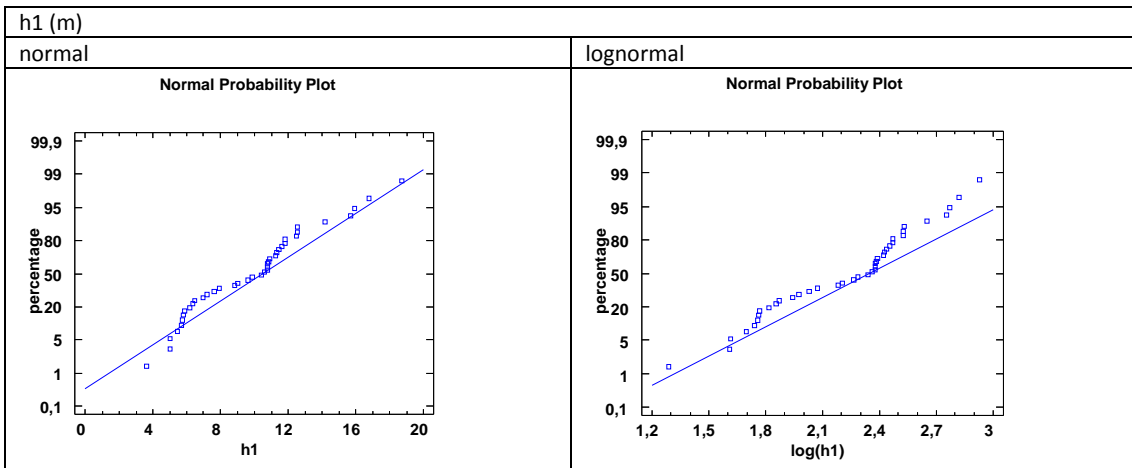
Muestra 2: maniobras simples con vehículos adelantado pesado

Estadísticos básicos

Variable	t3-t1	Vi	Vp	t4-t3	h1	h3
Cuenta	262	123	125	146	40,0	20,0
Media	9,13	74	93	8,16	9,8	30,0
Mediana	9,00	72	94	7,00	10,5	30,5
SD	2,50	18	17	5,79	3,6	18,6
Mínimo	3,60	30	53	-0,40	3,6	5,1
Máximo	20,30	128	139	35,90	18,7	84,8
Rango	16,70	98	86	36,30	15,1	79,6
Percentil 15	6,90	63	75	3,36	5,8	18,2
Percentil 85	11,30	89	109	12,70	12,5	36,0
Coef. Asimetría	6,268	1,739	0,216	9,059	1,076	2,708
Coef. Curtosis	6,738	2,474	0,420	12,449	-0,255	3,145

Verificación de normalidad y log-normalidad





VII) Ecuaciones de los modelos de trayectoria del vehículo adelantante

Modelo 1: velocidad constante

Las ecuaciones básicas de este modelo son:

$$\ddot{y} = 0, \dot{y} = V_{p1}, y = V_{p1}t$$

Conociendo los siguientes datos, se obtienen el único parámetro V_{p1} resolviendo un sistema de ecuaciones sobre-determinado, por métodos numéricos empleando el software MATLAB.

$$\begin{cases} \dot{y}(0) = V_{p1} \\ \dot{y}(t_3) = V_{p3} \\ y(0) = 0 \\ y(t_3) = d_{p13} \end{cases}$$

Modelo 2: aceleración constante

Las ecuaciones básicas de este modelo son:

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= a \\ \dot{y} &= m + at \\ y &= n + mt + \frac{1}{2}at^2 \end{aligned}$$

Las condiciones de contorno del problema son los valores de posición y velocidad en $t=0$ y $t=t_3$:

$$\begin{cases} \dot{y}(0) = V_{p1} \\ y(0) = 0 \end{cases}$$

De donde se obtiene directamente el valor de los parámetros m y n , quedando la solución igual a:

$$y = V_{p1}t + \frac{1}{2}at^2$$

Conociendo los siguientes datos, se obtienen el valor de V_{p1} y de a resolviendo un sistema de ecuaciones sobre-determinado, por métodos numéricos empleando el software MATLAB.

$$\begin{cases} \dot{y}(0) = V_{p1} \\ \dot{y}(t_3) = V_{p3} \\ y(0) = 0 \\ y(t_3) = d_{p13} \end{cases}$$

Modelo 3: aceleración constante en dos etapas

Las ecuaciones del modelo son:

$$\ddot{y} = \begin{cases} a_{12} & \text{si } t < t_2 \\ a_{23} & \text{si } t \geq t_2 \end{cases}$$

Luego:

$$\dot{y} = \begin{cases} m + a_{12}t & \text{si } t < t_2 \\ p + a_{23}t & \text{si } t \geq t_2 \end{cases}$$
$$y = \begin{cases} n + mt + \frac{1}{2}a_{12}t^2 & \text{si } t < t_2 \\ q + pt + \frac{1}{2}a_{23}t^2 & \text{si } t \geq t_2 \end{cases}$$

Las condiciones de contorno del problema son los valores de posición y velocidad en $t=t_1=0$ y la continuidad en t_2 :

$$\begin{cases} \dot{y}(0) = V_{p1} \\ y(0) = 0 \\ y(t_2) \end{cases}$$

De donde se obtiene la expresión de la solución:

$$y = \begin{cases} V_{p1}t + \frac{1}{2}a_{12}t^2 & \text{si } t < t_2 \\ V_{p1}t_2 + \frac{1}{2}a_{12}t_2^2 + (V_{p1} + a_{12}t_2)t + \frac{1}{2}a_{23}t^2 & \text{si } t \geq t_2 \end{cases}$$

Conociendo los siguientes datos, se obtienen el valor de V_{p1} , a_{12} y a_{23} , resolviendo un sistema de ecuaciones sobre-determinado, por métodos numéricos empleando el software MATLAB.

$$\begin{cases} \dot{y}(0) = V_{p1} \\ \dot{y}(t_3) = V_{p3} \\ y(0) = 0 \\ y(t_3) = dp_{13} \end{cases}$$

Modelo 4: aceleración constante hasta velocidad final

Las ecuaciones de este modelo son:

$$\ddot{y} = \begin{cases} a & \text{si } t < t_f \\ 0 & \text{si } t \geq t_f \end{cases}$$
$$\dot{y} = \begin{cases} m + at & \text{si } t < t_f \\ m + at_f & \text{si } t \geq t_f \end{cases}$$

$$y = \begin{cases} n + mt + \frac{1}{2}at^2 & \text{si } t < tf \\ n + mtf + \frac{1}{2}atf^2 + (m + atf)t & \text{si } t \geq tf \end{cases}$$

Las condiciones de contorno del problema son los valores de posición y velocidad en $t=t_1=0$ y la continuidad en tf :

$$\begin{cases} \dot{y}(0) = Vp1 \\ y(0) = 0 \\ y(tf) \end{cases}$$

De donde se obtiene la expresión de la solución:

$$y = \begin{cases} Vp1t + \frac{1}{2}at^2 & \text{si } t < tf \\ Vp1tf + \frac{1}{2}atf^2 + (Vp1 + atf)t & \text{si } t \geq tf \end{cases}$$

Conociendo los siguientes datos, se obtienen el valor de $Vp1$, a y tf resolviendo un sistema de ecuaciones sobre-determinado, por métodos numéricos empleando el software MATLAB.

$$\begin{cases} \dot{y}(0) = Vp1 \\ \dot{y}(t3) = Vp3 \\ y(0) = 0 \\ y(t3) = dp13 \end{cases}$$

Estando tf sujeto a la restricción: $0 \leq tf \leq t3$

Modelo 5: función lineal de la aceleración respecto del tiempo

El modelo supone que la aceleración varía linealmente con la velocidad:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= mt + n \\ \dot{y} &= \frac{1}{2}mt^2 + nt + p \\ y &= \frac{1}{6}mt^3 + \frac{1}{2}nt^2 + pt + q \end{aligned}$$

Las condiciones de contorno del problema son los valores de posición y velocidad en $t=t_1=0$:

$$\begin{cases} \dot{y}(0) = Vp1 \\ y(0) = 0 \end{cases}$$

De donde se obtiene la solución general del modelo:

$$y = \frac{1}{6}mt^3 + \frac{1}{2}nt^2 + Vp1t$$

Conociendo los siguientes datos, se obtienen los parámetros $Vp1$, m y n resolviendo un sistema de ecuaciones sobre-determinado, por métodos numéricos empleando el software MATLAB.

$$\begin{cases} \dot{y}(0) = Vp1 \\ \dot{y}(t3) = Vp3 \\ y(0) = 0 \\ y(t3) = dp13 \end{cases}$$

Modelo 6: función lineal de la aceleración respecto de la velocidad

El modelo supone que la aceleración varía linealmente con la velocidad:

$$\ddot{y} = m\dot{y} + n$$

Es decir, que el modelo se puede expresar por la ecuación diferencial de coeficientes constantes:

$$\ddot{y} - m\dot{y} = n$$

Cuya ecuación asociada es:

$$\lambda^2 - m\lambda = 0$$

Siendo sus raíces: $\lambda = 0$ y $\lambda = m$

Las soluciones a la ecuación son igual a la suma de la solución de la ecuación homogénea y de la solución particular, igual a un polinomio de grado 1.

Por lo tanto, la solución es de la forma:

$$y = A e^{mt} + B + Ct$$

Donde A, B y C son constantes a determinar.

Las condiciones de contorno del problema son los valores de posición y velocidad en $t=0$:

$$\begin{cases} \dot{y}(0) = Vp1 \\ y(0) = 0 \end{cases}$$

De donde se obtiene que la solución general a la ecuación es:

$$y = \frac{n + mVp1}{m^2} e^{mt} - \frac{n}{m} - \frac{n + mVp1}{m^2} t$$

Conociendo los siguientes datos, se obtienen los parámetros $Vp1$, m y n resolviendo un sistema de ecuaciones sobre-determinado, por métodos numéricos empleando el software MATLAB.

$$\begin{cases} \dot{y}(0) = Vp1 \\ \dot{y}(t3) = Vp3 \\ y(0) = 0 \\ y(t3) = dp13 \end{cases}$$

VIII) Resultados del modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento

Vehículo adelantado ligero

Variable	Percentil	Velocidad de diseño (km/h)			
		60	80	100	120
PSD1 (m)	5	265,1	304,6	335,2	368,2
	15	325,7	370,9	410,1	444,2
	50	441,4	496,6	553,7	604,1
	80	562,9	629,9	695,6	757,9
	95	694,7	783,0	874,3	937,8
PSD1' (m)	5	168,3	194,4	218,5	245,4
	15	216,4	250,6	280,1	311,4
	50	313,8	358,4	400,5	440,5
	80	408,1	461,3	513,2	565,2
	95	516,0	581,6	643,6	699,5
PSD2' (m)	5	104,5	119,8	135,3	153,3
	15	148,5	170,4	191,1	214,4
	50	236,2	271,2	303,1	332,8
	80	319,6	362,3	401,5	444,2
	95	412,4	471,1	514,0	569,0
d13p (m)	5	115,9	131,9	148,1	156,1
	15	139,1	155,5	173,3	184,0
	50	189,4	208,8	228,2	246,0
	80	243,0	268,3	292,9	314,9
	95	313,0	343,3	375,8	399,4

Vehículo adelantado pesado

Variable	Percentil	Velocidad de diseño (km/h)			
		60	80	100	120
PSD1 (m)	5	339,5	390,6	431,1	477,0
	15	414,6	474,9	524,7	574,6
	50	561,1	636,1	701,5	766,5
	80	714,3	806,2	885,9	968,9
	95	892,5	1023,3	1119,9	1238,5
PSD1' (m)	5	243,0	279,4	313,7	347,6
	15	303,6	352,6	395,5	432,5
	50	430,9	494,0	545,8	599,7
	80	558,3	642,9	703,7	783,6
	95	723,3	826,6	905,0	1001,7
PSD2' (m)	5	88,2	102,4	110,2	126,8
	15	139,4	164,4	177,7	200,2
	50	238,8	275,5	299,2	333,2
	80	340,8	393,0	430,4	482,9
	95	478,1	552,0	595,5	669,5
d13p (m)	5	154,2	173,1	191,3	211,8
	15	184,1	208,2	229,8	247,9
	50	252,9	283,1	307,7	331,8
	80	328,6	367,0	400,0	430,9
	95	430,5	477,3	523,3	564,5

IX) Resultados del análisis de fiabilidad

Vehículo adelantado ligero

PSD en t1 vs. ASD

ASD (m)	Vd (km/h)						
	60	70	80	90	100	110	120
100	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
150	0,994	0,998	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000
200	0,961	0,979	0,989	0,994	0,997	0,998	0,999
250	0,862	0,908	0,939	0,960	0,974	0,982	0,988
300	0,698	0,769	0,826	0,869	0,902	0,926	0,944
350	0,513	0,593	0,664	0,725	0,776	0,818	0,851
400	0,349	0,423	0,494	0,560	0,620	0,673	0,718
450	0,224	0,284	0,346	0,407	0,466	0,521	0,571
500	0,140	0,184	0,232	0,283	0,335	0,385	0,434
550	0,085	0,116	0,152	0,191	0,233	0,275	0,318
600	0,051	0,072	0,097	0,126	0,158	0,193	0,228
650	0,031	0,045	0,062	0,083	0,107	0,133	0,161
700	0,019	0,028	0,040	0,054	0,071	0,091	0,112
750	0,011	0,017	0,025	0,035	0,048	0,062	0,078
800	0,007	0,011	0,016	0,023	0,032	0,042	0,054
850	0,004	0,007	0,010	0,015	0,021	0,029	0,038
900	0,003	0,004	0,007	0,010	0,014	0,020	0,027
950	0,002	0,003	0,004	0,007	0,010	0,014	0,019
1000	0,001	0,002	0,003	0,005	0,007	0,010	0,013
1050	0,001	0,001	0,002	0,003	0,005	0,007	0,009
1100	0,000	0,001	0,001	0,002	0,003	0,005	0,007
1150	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,005
1200	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004

PSD en t1' vs. ASD

ASD (m)	Vd (km/h)						
	60	70	80	90	100	110	120
100	0,989	0,995	0,998	0,999	0,999	1,000	1,000
150	0,890	0,927	0,951	0,968	0,979	0,986	0,991
200	0,675	0,744	0,801	0,848	0,884	0,912	0,933
250	0,439	0,515	0,585	0,650	0,707	0,755	0,797
300	0,257	0,319	0,382	0,445	0,505	0,561	0,613
350	0,141	0,184	0,231	0,281	0,333	0,384	0,434
400	0,075	0,102	0,134	0,169	0,208	0,248	0,289
450	0,039	0,055	0,075	0,099	0,125	0,154	0,186
500	0,020	0,030	0,042	0,057	0,074	0,094	0,116
550	0,011	0,016	0,023	0,032	0,044	0,057	0,072
600	0,006	0,009	0,013	0,018	0,026	0,034	0,044
650	0,003	0,005	0,007	0,011	0,015	0,021	0,027
700	0,002	0,003	0,004	0,006	0,009	0,012	0,017
750	0,001	0,001	0,002	0,004	0,005	0,007	0,010
800	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,005	0,006
850	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
900	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
950	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1050	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1150	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1200	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

PSD en t2' vs. ASD

ASD (m)	Vd (km/h)						
	60	70	80	90	100	110	120
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
50	0,998	0,999	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000
100	0,867	0,900	0,924	0,942	0,956	0,966	0,974
150	0,559	0,621	0,676	0,724	0,765	0,800	0,829
200	0,297	0,353	0,408	0,461	0,511	0,558	0,600
250	0,144	0,181	0,221	0,263	0,305	0,346	0,387
300	0,067	0,089	0,114	0,141	0,170	0,201	0,233

ASD (m)	Vd (km/h)						
	60	70	80	90	100	110	120
350	0,031	0,043	0,057	0,074	0,092	0,113	0,134
400	0,014	0,021	0,028	0,038	0,049	0,062	0,076
450	0,007	0,010	0,014	0,020	0,026	0,034	0,043
500	0,003	0,005	0,007	0,010	0,014	0,019	0,024
550	0,002	0,002	0,004	0,005	0,008	0,010	0,014
600	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004	0,006	0,008
650	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,004
700	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003
750	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001
800	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
850	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
900	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
950	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1050	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1150	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1200	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

dp13 vs. Longitud de la zona de adelantamiento

Longitud de zona (m)	Vd (km/h)						
	60	70	80	90	100	110	120
100	0,982	0,991	0,995	0,998	0,999	0,999	1,000
150	0,784	0,838	0,880	0,911	0,934	0,951	0,963
200	0,432	0,503	0,569	0,628	0,681	0,726	0,764
250	0,183	0,231	0,281	0,332	0,383	0,431	0,477
300	0,069	0,093	0,120	0,151	0,184	0,218	0,253
350	0,025	0,036	0,049	0,064	0,082	0,103	0,124
400	0,009	0,014	0,020	0,027	0,036	0,047	0,059
450	0,003	0,005	0,008	0,012	0,016	0,022	0,028
500	0,001	0,002	0,003	0,005	0,007	0,010	0,014

Vehículo adelantado pesado

PSD en t1 vs. ASD

ASD (m)	Vd (km/h)						
	60	70	80	90	100	110	120
100	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
150	0,997	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
200	0,980	0,990	0,995	0,998	0,999	0,999	1,000
250	0,928	0,955	0,973	0,984	0,991	0,994	0,997
300	0,825	0,877	0,915	0,942	0,961	0,973	0,982
350	0,686	0,755	0,813	0,858	0,894	0,921	0,941
400	0,535	0,612	0,681	0,741	0,792	0,833	0,867
450	0,398	0,472	0,542	0,608	0,667	0,719	0,764
500	0,286	0,350	0,415	0,479	0,539	0,596	0,647
550	0,200	0,252	0,308	0,365	0,422	0,477	0,529
600	0,138	0,179	0,224	0,272	0,321	0,371	0,421
650	0,094	0,125	0,160	0,199	0,241	0,284	0,328
700	0,064	0,087	0,114	0,144	0,178	0,214	0,252
750	0,043	0,060	0,080	0,104	0,130	0,160	0,191
800	0,029	0,042	0,056	0,074	0,095	0,118	0,144
850	0,020	0,029	0,040	0,053	0,069	0,087	0,108
900	0,014	0,020	0,028	0,038	0,050	0,064	0,081
950	0,009	0,014	0,020	0,027	0,037	0,048	0,060
1000	0,006	0,010	0,014	0,020	0,027	0,035	0,045
1050	0,004	0,007	0,010	0,014	0,019	0,026	0,034
1100	0,003	0,005	0,007	0,010	0,014	0,019	0,025
1150	0,002	0,003	0,005	0,007	0,010	0,014	0,019
1200	0,002	0,002	0,004	0,005	0,008	0,011	0,014

PSD en t1' vs. ASD

ASD (m)	Vd (km/h)						
	60	70	80	90	100	110	120
100	0,994	0,997	0,999	0,999	1,000	1,000	1,000
150	0,940	0,961	0,975	0,984	0,990	0,994	0,996
200	0,800	0,849	0,887	0,917	0,939	0,955	0,967
250	0,616	0,681	0,739	0,788	0,829	0,863	0,890
300	0,440	0,507	0,570	0,628	0,681	0,728	0,769

ASD (m)	Vd (km/h)						
	60	70	80	90	100	110	120
350	0,300	0,358	0,417	0,474	0,529	0,580	0,628
400	0,199	0,245	0,294	0,344	0,394	0,443	0,490
450	0,130	0,165	0,203	0,243	0,285	0,328	0,371
500	0,085	0,110	0,138	0,170	0,203	0,239	0,275
550	0,055	0,073	0,094	0,117	0,143	0,172	0,202
600	0,036	0,048	0,063	0,081	0,101	0,123	0,146
650	0,023	0,032	0,043	0,056	0,071	0,087	0,106
700	0,015	0,022	0,029	0,039	0,049	0,062	0,076
750	0,010	0,014	0,020	0,027	0,035	0,044	0,055
800	0,007	0,010	0,014	0,019	0,025	0,032	0,040
850	0,005	0,007	0,009	0,013	0,017	0,023	0,029
900	0,003	0,005	0,007	0,009	0,012	0,016	0,021
950	0,002	0,003	0,005	0,006	0,009	0,012	0,015
1000	0,001	0,002	0,003	0,005	0,006	0,009	0,011
1050	0,001	0,002	0,002	0,003	0,005	0,006	0,008
1100	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,005	0,006
1150	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,005
1200	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003

PSD en t2' vs. ASD

ASD (m)	Vd (km/h)						
	60	70	80	90	100	110	120
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
50	0,990	0,993	0,995	0,996	0,997	0,997	0,998
100	0,825	0,853	0,876	0,895	0,911	0,924	0,934
150	0,567	0,612	0,653	0,689	0,721	0,750	0,775
200	0,357	0,401	0,444	0,484	0,521	0,556	0,589
250	0,218	0,253	0,289	0,325	0,359	0,393	0,426
300	0,131	0,158	0,185	0,214	0,242	0,271	0,300
350	0,080	0,098	0,118	0,139	0,162	0,185	0,208
400	0,049	0,061	0,076	0,091	0,108	0,125	0,144
450	0,030	0,039	0,049	0,060	0,072	0,085	0,099
500	0,019	0,025	0,031	0,039	0,048	0,058	0,069
550	0,012	0,016	0,021	0,026	0,033	0,040	0,048
600	0,008	0,010	0,014	0,018	0,022	0,027	0,033

ASD (m)	Vd (km/h)						
	60	70	80	90	100	110	120
650	0,005	0,007	0,009	0,012	0,015	0,019	0,023
700	0,003	0,004	0,006	0,008	0,010	0,013	0,016
750	0,002	0,003	0,004	0,006	0,007	0,009	0,012
800	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,007	0,008
850	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006
900	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,003	0,004
950	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003
1000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002
1050	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002
1100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001
1150	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001
1200	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001

dp13 vs. Longitud de la zona de adelantamiento

Longitud de zona (m)	Vd (km/h)						
	60	70	80	90	100	110	120
100	0,988	0,994	0,997	0,998	0,999	1,000	1,000
150	0,865	0,902	0,929	0,950	0,964	0,974	0,982
200	0,588	0,650	0,705	0,754	0,796	0,831	0,860
250	0,323	0,378	0,432	0,485	0,536	0,584	0,627
300	0,158	0,193	0,231	0,272	0,313	0,354	0,395
350	0,073	0,093	0,116	0,141	0,168	0,197	0,227
400	0,034	0,044	0,057	0,071	0,087	0,105	0,125
450	0,015	0,021	0,028	0,036	0,045	0,056	0,067
500	0,007	0,010	0,014	0,018	0,023	0,029	0,036
550	0,003	0,005	0,007	0,009	0,012	0,015	0,020
600	0,002	0,002	0,003	0,005	0,006	0,008	0,011

X) Listado de tramos para el análisis de seguridad vial

CARRETERA	PK de inicio (km)	PK de fin (km)	Longitud (km)	IMD (veh/dia)	Años con datos	Exposición (veh-km)	Aa	Ya	Ma	Ga	La	Aa2	Ya2	Ma2	Ga2	La2	A	Y	M	G	L
CV-10	37,35	62,10	24,75	5418	13	636228945	8	6	0	0	9	0	0	0	0	0	193	108	20	47	111
CV-10	62,10	67,26	5,16	3610	13	88387962	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	17	3	6	17
CV-10	67,26	82,06	14,80	2607	13	183093820	5	3	1	1	4	0	0	0	0	0	65	35	5	15	49
CV-10	82,06	85,50	3,44	1336	13	21802177	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	22	13	2	11	12
CV-10	85,50	90,44	4,94	992	13	23242662	3	2	1	0	2	0	0	0	0	0	13	9	1	4	6
CV-11	0,00	10,60	10,60	1727	13	86866788	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	20	10	1	7	7
CV-11	10,60	20,75	10,15	2967	13	142877389	3	2	0	0	2	0	0	0	0	0	70	46	6	33	53
CV-12	0,00	23,85	23,85	824	13	93207112	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	14	0	10	8
CV-14	0,00	2,35	2,35	1375	13	15333139	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	1
CV-14	2,35	10,77	8,42	1152	13	46016521	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	10	1	4	9
CV-14	10,77	23,65	12,88	835	13	51036966	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	10	2	4	6
CV-14	23,65	31,32	7,67	908	13	33059886	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	7	0	1	9
CV-15	0,00	2,00	2,00	8101	13	76881410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32	10	3	4	14
CV-15	2,00	9,30	7,30	4953	13	171577813	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	52	30	5	10	39
CV-15	34,10	42,70	8,60	1751	13	71462474	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	14	1	5	18
CV-15	42,70	55,85	13,15	1416	13	88366277	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	23	3	11	22
CV-15	63,70	68,30	4,60	995	13	21704751	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	1	7
CV-15	68,30	72,80	4,50	848	13	18110205	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	2	5	3
CV-16	8,65	13,20	4,55	10355	13	223517708	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51	15	1	6	15
CV-20	11,80	13,50	1,70	7663	13	61778469	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	12	0	0	18
CV-20	13,50	20,88	7,38	1994	13	69811243	2	2	0	1	1	0	0	0	0	0	56	32	1	18	45
CV-20	20,88	51,00	30,12	417	13	59630371	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	83	61	5	25	45
CV-20	51,00	65,26	14,25	257	13	17366646	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3
CV-21	0,00	5,78	5,78	7647	13	209716838	5	2	0	2	0	0	0	0	0	0	55	34	7	14	30
CV-21	5,78	14,50	8,72	6569	13	271751307	3	2	1	3	0	1	1	0	1	0	55	26	3	15	24
CV-25	0,00	4,90	4,90	7615	13	177041827	3	2	0	3	7	0	0	0	0	0	67	40	3	32	50

CARRETERA	PK de inicio (km)	PK de fin (km)	Longitud (km)	IMD (veh/dia)	Años con datos	Exposición (veh-km)	Aa	Ya	Ma	Ga	La	Aa2	Ya2	Ma2	Ga2	La2	A	Y	M	G	L
CV-25	4,90	6,78	1,88	3303	13	29463369	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	15	10	0	6	20
CV-25	6,78	10,64	3,86	1672	13	30621033	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	6	0	1	5
CV-25	10,64	15,68	5,04	513	13	12269537	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	7	0	2	7
CV-25	15,68	21,42	5,74	403	13	10978324	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	3	1
CV-25	21,42	35,94	14,52	249	13	17159571	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	14	0	8	13
CV-25	35,94	37,55	1,61	6985	13	53328414	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	6	0	2	4
CV-35	39,66	53,40	13,74	3094	13	201747443	7	4	0	3	4	0	0	0	0	0	104	69	15	47	87
CV-35	67,80	73,20	5,40	1767	13	45271899	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	22	21	4	13	17
CV-35	73,70	86,53	12,83	994	13	60484950	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	11	3	6	9
CV-35	86,53	97,97	11,44	577	13	31305912	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	5	1	1	10
CV-35	97,97	107,60	9,63	280	13	12807148	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	4
CV-41	4,24	0,00	4,24	11934	13	240099307	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CV-41	8,35	4,24	4,11	8859	13	172760274	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CV-41	11,99	8,35	3,64	6503	13	112345385	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CV-42	0,00	1,86	1,86	11541	13	101853330	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	20	0	8	21
CV-42	5,05	14,90	9,85	7192	13	336152280	6	1	0	1	1	0	0	0	0	0	84	40	4	22	46
CV-50	1,50	6,45	4,95	11518	13	270540938	2	2	0	2	1	0	0	0	0	0	55	40	3	20	47
CV-50	6,45	20,80	14,35	10353	13	704917346	10	6	0	0	8	0	0	0	0	0	182	113	7	42	145
CV-50	32,95	40,38	7,43	5020	13	176976433	2	2	1	3	1	0	0	0	0	0	45	33	3	18	42
CV-50	40,38	50,37	9,99	2895	13	137194770	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	33	28	2	13	34
CV-50	50,37	61,25	10,88	1320	13	68157706	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34	21	0	7	26
CV-50	61,25	72,60	11,35	3425	13	184464546	2	2	0	1	1	0	0	0	0	0	51	30	5	14	27
CV-50	72,60	85,90	13,30	4375	13	276080270	5	4	0	4	5	1	1	0	2	0	102	59	5	37	60
CV-60	10,90	16,30	5,40	8219	13	210607263	2	2	0	4	1	0	0	0	0	0	40	18	2	17	23
CV-70	7,20	9,13	1,93	2320	13	21248325	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	4	0	0	7
CV-70	9,13	12,84	3,71	1087	13	19131690	5	1	0	0	1	1	1	0	0	1	12	5	0	4	2

CARRETERA	PK de inicio (km)	PK de fin (km)	Longitud (km)	IMD (veh/dia)	Años con datos	Exposición (veh·km)	Aa	Ya	Ma	Ga	La	Aa2	Ya2	Ma2	Ga2	La2	A	Y	M	G	L
CV-70	12,84	30,98	18,14	1199	13	103203086	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	63	37	3	16	29
CV-70	30,98	43,30	12,32	2315	13	135320211	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	67	46	1	17	40
CV-81	5,65	14,00	8,35	5572	13	220751580	4	3	0	1	5	0	0	0	0	0	95	59	4	14	52
CV-81	14,00	21,10	7,10	5418	13	182521937	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	49	40	5	27	41
CV-81	21,10	33,80	12,70	5686	13	342610639	8	6	0	11	4	1	1	0	3	0	43	27	5	28	21
CV-81	33,80	40,70	6,90	6692	13	219101945	7	3	1	0	3	0	0	0	0	0	52	24	3	11	29
CV-81	40,70	57,00	16,30	5240	13	405261025	10	6	2	4	10	2	2	1	0	3	123	77	11	34	84
CV-83	0,00	4,39	4,39	9658	13	201183054	3	3	0	1	4	0	0	0	0	0	43	29	3	26	32
CV-83	4,39	6,70	2,31	5045	13	55302209	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	10	0	4	10
CV-83	6,70	13,00	6,30	5818	13	173908886	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	52	38	7	25	46
CV-83	13,00	24,95	11,95	5233	13	296734214	4	4	0	1	4	0	0	0	0	0	53	35	10	20	36
CV-83	24,95	29,60	4,65	2676	13	59035447	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	8	0	3	14
CV-91	0,00	3,00	3,00	11124	13	158355615	3	2	1	0	4	1	1	0	0	3	55	39	6	27	58
CV-91	3,00	8,65	5,65	12458	13	333997886	7	3	2	1	2	0	0	0	0	0	136	77	2	19	121
CV-95	0,00	6,00	6,00	13083	13	372473010	7	3	0	4	4	1	1	0	1	1	167	92	4	26	145
CV-95	6,00	18,80	12,80	11044	13	670754368	19	11	0	1	14	0	0	0	0	0	300	166	17	68	264
CV-95	18,80	26,80	8,00	9032	13	342854720	8	4	1	2	6	0	0	0	0	0	248	133	9	43	188
CV-121	0,00	10,95	10,95	282	13	14644092	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	1	2
CV-124	0,00	11,15	11,15	1104	13	58409052	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	1	1	3
CV-124	11,15	27,24	16,09	123	13	9378359	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
CV-124	27,24	34,52	7,28	97	13	3350729	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
CV-125	0,00	11,79	11,79	409	13	22855092	1	1	0	1	5	1	1	0	1	5	3	3	0	4	5
CV-125	11,79	30,07	18,28	151	13	13110873	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	1	0
CV-129	0,00	12,65	12,65	488	13	29264131	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	9	1	5	6
CV-129	12,65	16,80	4,15	575	13	11321242	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	0	2	4
CV-132	0,00	5,13	5,13	2454	13	59746135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	18	5	9	19

CARRETERA	PK de inicio (km)	PK de fin (km)	Longitud (km)	IMD (veh/dia)	Años con datos	Exposición (veh-km)	Aa	Ya	Ma	Ga	La	Aa2	Ya2	Ma2	Ga2	La2	A	Y	M	G	L
CV-133	0,00	13,48	13,48	430	13	27528519	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	9	0	6	8
CV-135	0,00	8,73	8,73	522	13	21635996	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	6	0	1	7
CV-135	8,73	13,58	4,85	728	13	16751876	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	0	0	4
CV-135	13,58	22,10	8,52	3124	13	126279649	6	3	1	4	3	2	1	1	3	2	108	60	6	14	66
CV-141	0,00	4,65	4,65	6445	13	142205789	9	6	0	0	13	2	1	0	0	1	106	66	5	23	98
CV-160	1,32	4,50	3,18	1572	13	23713766	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	6	1	4	4
CV-160	4,50	12,87	8,37	1446	13	57422720	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	29	17	1	7	14
CV-162	0,00	6,07	6,07	1206	13	34722100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	7	2	1	6
CV-162	6,07	9,39	3,32	773	13	12179802	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
CV-164	0,00	2,68	2,68	1155	13	14683760	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	0
CV-165	0,00	13,65	13,65	1280	13	82909622	3	2	0	0	3	1	1	0	0	2	23	14	0	5	16
CV-165	13,65	22,60	8,95	488	13	20704662	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	0	2	2
CV-165	22,60	45,51	22,91	134	13	14574591	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	9	6	2	1	3
CV-166	0,00	4,15	4,15	961	13	18931346	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	4	1	0	7
CV-166	4,15	13,00	8,85	196	13	8233907	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	1	1
CV-170	0,00	11,20	11,20	1108	13	58859024	2	1	0	0	3	0	0	0	0	0	21	15	2	7	20
CV-170	24,75	48,83	24,08	157	13	17899883	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	3	3	1	0	2
CV-173	0,00	6,09	6,09	202	13	5832758	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
CV-183	0,00	2,60	2,60	6072	13	74915958	4	3	0	0	4	0	0	0	0	0	29	16	2	6	15
CV-185	0,00	4,21	4,21	12213	13	243980067	8	5	2	3	3	2	2	2	0	3	58	40	2	11	49
CV-190	0,00	6,48	6,48	4922	13	151339687	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	101	52	4	30	42
CV-190	6,48	16,77	10,29	2389	13	116652945	4	2	0	1	2	3	1	0	0	2	64	36	2	17	35
CV-190	16,77	33,13	16,36	449	13	34849090	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	9	0	2	14
CV-190	33,13	49,09	15,96	151	13	11464387	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	1	3
CV-190	49,09	64,15	15,06	154	13	10971812	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	5	0	4	1
CV-191	0,00	6,13	6,13	4783	13	139113454	1	1	0	0	2	0	0	0	0	0	34	18	3	5	13

CARRETERA	PK de inicio (km)	PK de fin (km)	Longitud (km)	IMD (veh/dia)	Años con datos	Exposición (veh·km)	Aa	Ya	Ma	Ga	La	Aa2	Ya2	Ma2	Ga2	La2	A	Y	M	G	L
CV-194	0,00	8,65	8,65	838	13	34379295	1	1	0	0	2	0	0	0	0	0	5	3	0	2	2
CV-194	8,65	27,72	19,06	203	13	18383987	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4	0	3	2
CV-195	0,00	5,63	5,63	1676	13	44779415	2	2	1	0	2	0	0	0	0	0	36	22	1	7	19
CV-195	5,63	23,60	17,97	745	13	63491604	3	3	0	2	2	0	0	0	0	0	79	52	4	15	41
CV-195	23,60	40,98	17,38	169	13	13895048	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	9	1	4	6
CV-196	0,00	12,54	12,54	117	13	6972719	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CV-199	0,00	1,50	1,50	133	13	948270	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
CV-205	0,00	17,19	17,19	635	13	51819857	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	19	0	9	26
CV-215	0,00	10,74	10,74	254	13	12944170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	21	0	6	27
CV-216	0,00	2,40	2,40	558	13	6353628	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	5	0	2	4
CV-219	0,00	2,32	2,32	586	13	6445842	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CV-219	2,32	13,55	11,23	88	13	4709694	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	1	2
CV-222	0,00	7,00	7,00	6361	13	211293390	6	2	0	0	2	0	0	0	0	0	96	44	5	16	50
CV-222	7,00	9,32	2,32	10506	13	115649170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34	15	0	7	16
CV-223	0,00	10,75	10,75	3598	13	183545178	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	56	35	3	13	39
CV-223	10,75	27,60	16,85	438	13	35025674	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	10	0	2	10
CV-223	27,60	32,69	5,09	3376	13	81464649	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32	17	1	2	19
CV-230	0,68	9,25	8,57	1065	13	43326621	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	18	0	11	19
CV-230	9,25	22,29	13,04	2348	13	145282030	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47	42	3	13	44
CV-230	22,29	27,35	5,06	4868	13	116888454	3	3	0	1	2	0	0	0	0	0	49	33	0	9	31
CV-235	11,96	22,16	10,21	119	13	5754855	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	23	1	8	16
CV-235	22,16	26,72	4,56	158	13	3427912	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	9	0	1	9
CV-245	0,00	6,00	6,00	258	13	7340880	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	2	0	4
CV-245	6,00	18,00	12,00	689	13	39227280	1	1	0	0	2	0	0	0	0	0	54	47	6	14	38
CV-300	2,80	0,00	2,80	12208	13	162192422	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CV-306	0,00	0,15	0,15	8807	13	6268328	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

CARRETERA	PK de inicio (km)	PK de fin (km)	Longitud (km)	IMD (veh/dia)	Años con datos	Exposición (veh-km)	Aa	Ya	Ma	Ga	La	Aa2	Ya2	Ma2	Ga2	La2	A	Y	M	G	L
CV-390	21,50	39,70	18,20	275	13	23788583	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	16	1	2	21
CV-390	39,70	46,00	6,30	1151	13	34399658	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	8	0	2	6
CV-403	2,06	4,05	1,99	14839	13	140043958	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	11	0	6	8
CV-500	6,47	18,50	12,03	12049	13	687767671	10	6	0	2	7	0	0	0	0	0	345	159	9	67	198
CV-500	18,50	21,40	2,90	9120	13	125450369	2	2	0	2	1	0	0	0	0	0	73	48	2	15	57
CV-500	21,40	28,86	7,46	7335	13	259628515	7	6	1	5	9	2	2	1	3	2	132	89	8	43	101
CV-512	0,00	1,60	1,60	8696	13	66022952	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	6	0	1	9
CV-585	0,00	6,60	6,60	3425	13	107246271	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46	29	2	14	23
CV-590	0,00	28,80	28,80	156	13	21381408	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	5
CV-610	12,93	17,61	4,68	3526	13	78305596	2	2	0	1	2	2	2	0	1	2	48	29	3	8	32
CV-610	17,61	24,24	6,63	3114	13	97952060	4	3	0	2	2	0	0	0	0	0	51	29	1	13	25
CV-650	0,00	5,36	5,36	7394	13	188041342	6	3	1	0	3	1	1	0	0	2	41	26	2	6	32
CV-700	0,00	15,20	15,20	1308	13	94327096	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	32	14	1	6	14
CV-700	15,20	22,40	7,20	2759	13	94232246	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	23	0	15	29
CV-700	22,40	56,40	34,00	486	13	78369150	3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	77	44	1	21	42
CV-700	56,40	67,30	10,90	6079	13	314399965	9	8	1	4	8	1	1	0	0	1	92	62	8	16	75
CV-705	3,54	8,53	4,99	2085	13	49346873	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	11	5	0	4	4
CV-705	8,53	13,28	4,75	286	13	6454751	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	1	1
CV-705	13,28	19,72	6,44	231	13	7064806	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	7	0	1	10
CV-706	0,00	4,50	4,50	980	13	20920523	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1	0	1	1
CV-715	0,00	8,56	8,56	5486	13	222819710	10	6	1	2	8	1	1	0	0	2	101	62	10	32	62
CV-715	8,56	23,70	15,14	2750	13	197522923	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	80	48	2	16	56
CV-715	23,70	51,70	28,00	425	13	56516600	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	51	32	3	12	27
CV-715	51,70	55,60	3,90	8801	13	162823722	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	59	41	1	10	50
CV-720	0,00	10,80	10,80	345	13	17703522	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	14	1	5	14
CV-720	10,80	23,08	12,28	207	13	12047172	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	3	0	1	4

CARRETERA	PK de inicio (km)	PK de fin (km)	Longitud (km)	IMD (veh/dia)	Años con datos	Exposición (veh-km)	Aa	Ya	Ma	Ga	La	Aa2	Ya2	Ma2	Ga2	La2	A	Y	M	G	L
CV-720	23,08	38,40	15,32	556	13	40395163	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	7	0	2	5
CV-720	38,40	50,80	12,40	2336	13	137420907	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	53	30	1	11	40
CV-724	0,00	5,30	5,30	7141	13	179593177	4	3	0	0	3	0	0	0	0	0	63	42	0	12	41
CV-724	5,30	7,40	2,10	4248	13	42330729	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	24	17	1	5	27
CV-734	0,00	6,84	6,84	12260	13	397910605	8	6	0	3	9	1	1	0	1	1	96	66	6	27	86
CV-736	0,00	7,00	7,00	5107	13	169641780	2	2	0	1	1	1	1	0	1	0	102	62	1	20	81
CV-755	0,00	12,40	12,40	1216	13	71556060	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	12	0	5	15
CV-755	12,40	21,80	9,40	2763	13	123241520	3	2	0	0	5	0	0	0	0	0	44	25	4	6	33
CV-763	0,00	4,60	4,60	10217	13	223001422	9	8	0	2	8	0	0	0	0	0	96	70	3	17	79
CV-773	0,00	7,80	7,80	3889	13	143944320	4	2	0	0	2	1	0	0	0	0	110	74	4	36	67
CV-790	4,50	7,30	2,80	3198	13	42483518	3	3	0	2	1	2	2	0	1	1	19	7	0	3	5
CV-799	0,94	6,90	5,96	5130	13	145077426	5	5	0	2	9	0	0	0	0	0	38	26	2	18	25
CV-799	6,90	12,50	5,60	4190	13	111346900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	17	0	7	21
CV-801	0,00	5,00	5,00	533	13	12636300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	0	5	5
CV-805	0,00	13,80	13,80	3292	13	215563452	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	67	32	1	10	41
CV-806	0,00	7,90	7,90	6018	13	225599273	5	4	1	2	3	2	1	0	0	1	57	26	4	9	33
CV-809	0,00	5,30	5,30	3442	13	86549530	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	16	3	8	12
CV-815	0,00	1,85	1,85	7413	13	65073167	1	1	0	2	2	0	0	0	0	0	15	6	0	5	4
CV-815	1,85	5,92	4,06	3887	13	74958631	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	6	1	1	9
CV-820	0,00	8,58	8,58	6284	13	255844232	14	8	0	2	9	1	1	0	0	1	144	108	4	39	129
CV-820	8,58	14,50	5,92	4285	13	120380329	4	2	0	3	2	0	0	0	0	0	42	26	2	14	25
CV-820	14,50	19,60	5,10	3257	13	78812187	3	2	1	1	2	1	1	1	1	0	49	27	1	10	30
CV-821	6,60	9,90	3,30	9033	13	141437208	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	81	52	1	22	43
CV-825	6,00	10,30	4,30	1954	13	39873148	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	11	1	9	6
CV-827	0,00	11,00	11,00	362	13	18918680	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	19	17	1	13	6
CV-830	0,00	9,50	9,50	1010	13	45549080	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	11	8	2	7	10

CARRETERA	PK de inicio (km)	PK de fin (km)	Longitud (km)	IMD (veh/dia)	Años con datos	Exposición (veh·km)	Aa	Ya	Ma	Ga	La	Aa2	Ya2	Ma2	Ga2	La2	A	Y	M	G	L
CV-830	9,50	18,40	8,90	2858	13	120700697	3	2	0	0	5	0	0	0	0	0	46	34	4	15	33
CV-835	0,00	9,30	9,30	5002	13	220730757	5	2	0	2	1	1	0	0	0	0	92	62	1	34	66
CV-840	0,00	10,90	10,90	3990	13	206356838	5	4	0	0	6	1	1	0	0	2	94	65	2	44	72
CV-840	10,90	26,90	16,00	2958	13	224557324	5	3	0	1	2	1	1	0	1	0	66	50	3	27	34
CV-855	0,00	10,50	10,50	8104	13	403765373	11	6	0	4	4	1	1	0	0	1	185	120	8	51	139
CV-865	0,00	8,80	8,80	13688	13	571565764	10	9	1	10	6	1	1	0	2	3	277	189	18	85	239
CV-870	3,90	12,30	8,40	5479	13	218394246	8	5	0	3	8	0	0	0	0	0	73	40	4	25	54
CV-895	0,00	6,70	6,70	7315	13	232547486	4	3	0	2	1	0	0	0	0	0	108	69	4	17	105
CV-900	0,00	2,70	2,70	8927	13	114372203	10	7	1	4	10	0	0	0	0	0	71	47	4	15	61
CV-900	2,70	6,13	3,43	8034	13	130716789	3	3	0	2	1	1	1	0	1	0	82	53	2	10	65
CV-900	6,13	10,19	4,06	9920	13	191055791	3	2	0	0	3	0	0	0	0	0	72	46	1	13	51
CV-900	10,19	12,35	2,16	7634	13	78245546	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	11	0	1	19
CV-900	12,35	13,25	0,90	5089	13	21733232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	5	0	1	6
CV-911	0,00	3,10	3,10	8856	13	130268464	10	9	0	7	5	2	2	0	2	0	74	49	5	17	53
CV-911	3,10	5,20	2,10	8364	13	83347677	3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	12	7	0	2	5
CV-913	0,00	6,20	6,20	6580	13	193577020	7	2	0	0	2	0	0	0	0	0	125	79	3	24	84
CV-913	6,20	8,20	2,00	5768	13	54711680	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	13	10	0	6	9
CV-925	0,00	2,60	2,60	2198	13	27120522	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	19	13	1	3	14
CV-925	2,60	9,00	6,40	1440	13	43739264	2	2	0	1	2	0	0	0	0	0	28	20	0	7	25
CV-925	9,00	13,00	4,00	1923	13	36494160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	9	0	4	6
CV-940	0,00	5,50	5,50	5889	13	153694200	5	4	0	2	2	1	1	0	1	0	53	32	3	14	31
CV-940	5,50	11,90	6,40	3194	13	96997728	4	1	0	4	2	2	1	0	4	2	60	34	2	15	49

Leyenda

A: accidente.

Y: accidente con víctimas.

M: muerte.

G: herido grave.

L: herido leve.

Sufijo "a": asociado al adelantamiento.

Sufijo "a2": asociado al adelantamiento, sin tener en cuenta los accidentes sucedidos en intersecciones o accesos.

XI) Listado de zonas de adelantamiento para el análisis de seguridad vial

Carretera	PK (km)	Zona	Longitud (m)	IMD (veh/dia)	Accesos?	Curva?	Sección	pa	pf	paxpf	pam	pfm	pamxpfm	Y	Ya	Ya2
CV-10	85-90	1	409	992	1	0	0	172,6	234,0	52,5	0,3081	0,4366	0,0256	1	0	0
CV-10	85-90	2	577	992	1	0	0	214,8	257,9	56,8	0,3304	0,3967	0,0277	0	0	0
CV-10	85-90	3	280	992	1	0	0	66,2	208,7	42,3	0,2199	0,7000	0,0207	2	0	0
CV-10	85-90	4	230	992	0	0	0	63,6	219,4	43,2	0,2119	0,7314	0,0211	2	0	0
CV-10	85-90	5	240	992	1	0	0	66,2	208,8	42,6	0,2206	0,6961	0,0208	0	0	0
CV-10	85-90	6	240	992	0	0	0	56,5	209,6	40,5	0,2045	0,7665	0,0197	0	0	0
CV-10	85-90	7	1300	992	1	1	0	318,3	811,2	169,7	0,2449	0,6238	0,0828	4	2	1
CV-725	0-5	1	900	16714	0	1	1	213,0	710,5	158,2	0,2307	0,5844	0,0772	8	4	4
CV-725	0-5	2	750	16714	0	1	1	138,5	779,0	134,8	0,1731	0,9737	0,0658	3	0	0
CV-41	0-19	1	410	11934	1	0	0	120,4	272,7	61,7	0,2675	0,6060	0,0301	2	1	1
CV-41	0-19	2	380	11934	1	0	0	110,0	269,1	60,2	0,2588	0,6331	0,0294	16	2	1
CV-41	0-19	3	1200	11934	0	0	1	649,7	312,4	82,4	0,4984	0,2411	0,0402	15	0	0
CV-41	0-19	4	595	11934	0	0	1	211,1	307,7	70,4	0,3247	0,4734	0,0343	0	0	0
CV-41	0-19	5	745	11934	0	0	1	367,4	293,7	69,9	0,4205	0,3332	0,0341	2	0	0
CV-41	0-19	6	260	11934	1	0	1	53,5	234,1	42,8	0,1913	0,8608	0,0209	0	0	0
CV-41	0-19	7	440	11934	1	0	1	141,0	246,7	59,4	0,2977	0,5167	0,0290	1	0	0
CV-41	0-19	8	410	11934	1	0	1	129,1	246,3	59,0	0,2869	0,5474	0,0288	1	0	0
CV-41	0-19	9	140	11934	1	0	1	38,4	179,2	33,8	0,1920	0,8962	0,0165	2	0	0
CV-41	0-19	10	840	11934	1	0	1	359,3	276,3	67,6	0,4236	0,3229	0,0330	24	1	1
CV-41	0-19	11	390	11934	1	0	1	124,2	194,2	49,1	0,3040	0,5047	0,0239	15	1	1

Carretera	PK (km)	Zona	Longitud (m)	IMD (veh/dia)	Accesos?	Curva?	Sección	pa	pf	paxpf	pam	pfm	pamxpfm	Y	Ya	Ya2
CV-41	0-19	12	330	11934	1	0	1	116,0	214,2	52,0	0,2900	0,5355	0,0254	4	0	0
CV-41	0-19	13	185	11934	1	0	1	78,3	186,4	44,3	0,2646	0,6078	0,0216	6	0	0
CV-41	0-19	14	560	11934	1	0	1	186,9	236,0	59,4	0,3360	0,4374	0,0290	9	1	0
CV-865	0-8	1	485	13688	1	0	1	176,3	188,2	51,6	0,3517	0,3775	0,0252	14	2	2
CV-865	0-8	2	630	13688	1	0	1	290,6	208,9	57,1	0,4152	0,2985	0,0279	13	1	1
CV-865	0-8	3	240	13688	1	0	1	117,9	174,4	46,1	0,3075	0,4843	0,0225	8	1	1
CV-865	0-8	4	280	13688	1	0	1	99,5	190,8	48,2	0,2844	0,5452	0,0235	1	0	0
CV-865	0-8	5	425	13688	1	0	1	167,9	208,9	55,1	0,3358	0,4179	0,0269	6	0	0
CV-865	0-8	6	300	13688	1	0	1	104,2	174,5	45,8	0,2976	0,4987	0,0223	7	1	1
CV-865	0-8	7	385	13688	1	0	1	145,8	197,0	52,2	0,3241	0,4377	0,0255	6	0	0
CV-865	0-8	8	470	13688	1	0	1	183,9	168,4	48,2	0,3678	0,3368	0,0235	9	1	1
CV-865	0-8	9	310	13688	1	0	1	106,6	166,6	44,7	0,3045	0,4759	0,0218	6	0	0
CV-865	0-8	10	320	13688	1	0	1	109,0	158,6	43,5	0,3115	0,4532	0,0212	8	0	0
CV-865	0-8	11	420	13688	1	0	1	157,0	166,3	47,1	0,3488	0,3696	0,0230	12	1	0
CV-865	0-8	12	250	13688	1	0	1	83,9	166,6	42,6	0,2798	0,5554	0,0208	4	0	0
CV-865	0-8	13	250	13688	1	0	1	67,8	146,7	37,1	0,2693	0,5949	0,0181	2	0	0
CV-135	15-22	1	425	3123	0	0	0	83,8	422,5	78,6	0,1862	0,9388	0,0383	4	0	0
CV-135	15-22	2	142	3123	1	0	0	49,6	215,0	41,0	0,1958	0,8703	0,0200	3	1	1
CV-135	15-22	3	180	3123	1	0	0	100,9	263,8	57,8	0,2493	0,6699	0,0282	1	0	0
CV-135	15-22	4	220	3123	1	0	0	46,1	190,8	37,9	0,2036	0,8524	0,0185	1	0	0

Carretera	PK (km)	Zona	Longitud (m)	IMD (veh/dia)	Accesos?	Curva?	Sección	pa	pf	paxpf	pam	pfm	pamxpfm	Y	Ya	Ya2
CV-135	15-22	5	475	3123	1	0	0	111,5	271,0	58,5	0,2521	0,6720	0,0286	4	0	0
CV-135	15-22	6	1075	3123	1	0	0	578,3	314,2	73,7	0,5029	0,2732	0,0359	15	1	0
CV-95	1-7	1	250	11044	1	0	1	138,6	167,2	37,5	0,3206	0,4084	0,0183	8	1	0
CV-95	1-7	2	510	11044	1	0	1	190,9	248,2	55,1	0,3181	0,4130	0,0269	4	0	0
CV-95	1-7	3	200	11044	1	0	1	65,3	173,5	37,1	0,2346	0,6435	0,0181	4	0	0
CV-95	1-7	4	350	11044	1	0	1	86,1	245,2	49,6	0,2298	0,6532	0,0242	1	0	0
CV-95	1-7	5	385	11044	1	0	1	107,8	277,4	55,5	0,2395	0,6164	0,0271	19	2	1
CV-95	1-7	6	110	11044	1	0	1	61,7	151,1	32,5	0,2306	0,6753	0,0159	3	0	0
CV-95	1-7	7	330	11044	1	0	1	111,7	267,1	54,3	0,2460	0,6006	0,0265	12	1	1
CV-95	1-7	8	578	11044	1	0	1	290,6	271,5	59,0	0,3680	0,3585	0,0288	7	3	2
CV-95	1-7	9	376	11044	1	0	1	115,0	254,1	53,4	0,2555	0,5646	0,0261	2	1	0
CV-95	1-7	10	418	11044	1	0	1	105,1	214,9	47,4	0,2622	0,5381	0,0231	5	1	1
CV-95	1-7	11	285	11044	1	0	1	73,9	217,1	43,9	0,2252	0,6772	0,0214	3	0	0
CV-95	1-7	12	361	11044	1	0	1	148,1	237,8	51,6	0,2856	0,5033	0,0252	11	0	0
CV-95	1-7	13	550	11044	1	0	1	184,2	171,7	42,9	0,3441	0,3405	0,0209	5	0	0
CV-95	1-7	14	285	11044	1	0	1	120,6	166,5	40,8	0,2977	0,4267	0,0199	6	0	0
CV-95	1-7	15	320	11044	1	0	1	67,3	242,7	46,0	0,2058	0,7518	0,0225	5	2	2
CV-95	1-7	16	430	11044	1	0	1	117,7	314,0	60,1	0,2353	0,6280	0,0293	3	0	0
CV-95	1-7	17	685	9032	1	0	1	276,8	198,7	48,3	0,3922	0,2889	0,0236	6	0	0
CV-35	73-78	1	350	997	1	0	1	96,1	282,1	54,6	0,2255	0,6660	0,0267	0	0	0

Carretera	PK (km)	Zona	Longitud (m)	IMD (veh/dia)	Accesos?	Curva?	Sección	pa	pf	paxpf	pam	pfm	pamxpfm	Y	Ya	Ya2
CV-35	73-78	2	175	997	1	0	1	55,6	247,7	42,7	0,1815	0,8407	0,0208	0	0	0
CV-35	73-78	3	320	997	1	0	1	79,7	268,6	51,2	0,2125	0,7172	0,0250	0	0	0
CV-35	73-78	4	370	997	1	0	1	94,5	286,7	55,1	0,2226	0,6741	0,0269	0	0	0
CV-35	73-78	5	650	997	1	0	1	242,5	294,3	61,5	0,3340	0,4068	0,0300	0	0	0
CV-35	73-78	6	320	997	1	0	1	73,6	255,2	48,9	0,2103	0,7290	0,0238	0	0	0
CV-35	73-78	7	170	997	1	0	1	32,5	186,8	30,0	0,1623	0,9341	0,0146	0	0	0
CV-50	76-85	1	757	5797	1	1	1	238,9	482,8	114,2	0,2812	0,5036	0,0557	4	0	0
CV-50	76-85	2	272	5797	1	1	1	69,4	316,2	62,5	0,1978	0,8865	0,0305	4	0	0
CV-50	76-85	3	1148	5797	1	1	1	408,1	517,5	136,8	0,3335	0,1332	0,0667	6	1	1
CV-50	76-85	4	268	5797	1	0	1	51,9	292,1	50,6	0,1731	0,9737	0,0247	0	0	0
CV-50	76-85	5	398	5797	1	1	1	108,0	362,7	76,8	0,2261	0,6561	0,0375	3	1	1
CV-50	76-85	6	319	5797	1	1	1	99,7	500,3	88,4	0,1742	0,8718	0,0431	2	0	0
CV-50	76-85	7	843	5797	0	0	1	309,8	298,5	70,2	0,3884	0,0227	0,0342	6	1	1
CV-50	34-40	8	297	4517	1	0	1	99,7	221,8	54,4	0,2635	0,4830	0,0265	3	1	1
CV-50	34-40	9	1127	4517	1	0	1	642,8	187,9	53,1	0,5674	0,0020	0,0259	9	1	1
CV-50	34-40	10	264	4517	1	1	1	68,5	266,9	54,6	0,2081	0,8457	0,0266	10	0	0
CV-50	34-40	11	271	4517	1	1	1	47,5	296,3	46,9	0,1585	0,9876	0,0229	4	0	0
CV-50	34-40	12	757	4517	1	0	1	371,3	192,6	54,4	0,4641	0,0128	0,0265	4	0	0
CV-50	34-40	13	552	4517	1	0	1	199,2	267,6	65,8	0,3320	0,0904	0,0321	2	0	0

Leyenda

pa: integral de la probabilidad de aceptación en toda la zona.

pf: integral de la probabilidad de no cumplimiento en toda la zona.

paxpf: integral del producto de la probabilidad de aceptación y la probabilidad de no cumplimiento en toda la zona.

pam: promedio de la probabilidad de aceptación.

pfm: promedio de la probabilidad de no cumplimiento.

pamxpfm: promedio del producto de la probabilidad de aceptación y la probabilidad de no cumplimiento.

Y: número de accidentes con víctimas.

Ya: número de accidentes con víctimas, asociados al adelantamiento.

Ya2: número de accidentes con víctimas, asociados al adelantamiento, excluyendo los relacionados con intersecciones o accesos.

En Accesos y Curva un "0" corresponde a "no" y un "1" corresponde a "sí".

En Sección un "0" corresponde a "sin arcén" y un "1" corresponde a "con arcén"