

# **AFECCIÓN DE LA PRESENCIA DE CICLISTAS EN CARRETERAS CONVENCIONALES ESTRECHAS. ADAPTACIÓN DE UN MODELO DE MICROSIMULACIÓN**

**Sara Moll Montaner**

Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), Universitat Politècnica de  
València, España

**Griselda López Maldonado**

GIIC, Universitat Politècnica de València, España

**Alfredo García García**

GIIC, Universitat Politècnica de València, España

## **RESUMEN**

La presencia de ciclistas circulando individualmente o en grupo es un fenómeno habitual en las carreteras convencionales españolas. El uso compartido de estas carreteras por bicicletas y vehículos motorizados implica su interacción, pudiendo modificar la seguridad y la funcionalidad de las vías. Este efecto puede ser mayor en carreteras convencionales estrechas, donde las bicicletas deben circular por el carril, y los motorizados realizan una invasión mayor del carril opuesto durante el adelantamiento, implicando maniobras potencialmente peligrosas y una mayor duración del adelantamiento.

La microsimulación del tráfico es una excelente herramienta para analizar la funcionalidad del tráfico y la seguridad en carreteras convencionales, pero los modelos actuales no consideran a los ciclistas en este ámbito, y mucho menos su interacción con los motorizados.

En este estudio, a partir de observaciones del fenómeno, se ha adaptado un modelo, que ya consideraba vehículos motorizados en carreteras convencionales, a la circulación de bicicletas y a la interacción entre estos dos usuarios. El modelo ha sido calibrado y validado con datos reales recogidos mediante bicicletas instrumentadas y observaciones naturalísticas en una carretera convencional estrecha considerando 7 configuraciones distintas de grupos de ciclistas, variando el número de ciclistas y su configuración en línea o paralelo. La calibración se ha realizado en dos pasos, el primero a nivel microscópico con datos de adelantamientos, y el segundo, a nivel macroscópico con datos de medidas de desempeño del tramo. La duración del adelantamiento se ha considerado una variable clave para calibrar la longitud equivalente de cada grupo de ciclistas.

Los resultados confirman la reducción en la funcionalidad causada por la presencia de ciclistas, y apuntan a que se necesitan nuevas medidas de desempeño y/o la reformulación de las existentes, de modo que incorporen el efecto del tráfico ciclista sobre la funcionalidad del tráfico y la seguridad en estas carreteras.

## 1. INTRODUCCIÓN

La circulación de ciclistas por carreteras convencionales es un fenómeno frecuente en la actualidad. La gran mayoría de ciclistas que se observan por carretera son ciclistas deportivos que circulan de manera individual o bien forman parte de un grupo. En 2019 el número de ciclistas y clubes federados en España fue de 74768 y de 3878 respectivamente (Ministerio de Cultura y Deporte, 2020). Al mismo tiempo que ha aumentado el número de ciclistas en las carreteras también lo ha hecho el número de accidentes con ciclistas involucrados. En 2019 se registraron en España 7837 accidentes con ciclistas implicados, aunque la mayor parte se produjo en vías urbanas (72%), en vías interurbanas se registró el 60% de las víctimas mortales. De hecho, en 2019 murieron 48 ciclistas en vías interurbanas, 5 más que en 2018 (Dirección General de Tráfico, 2019). Estos datos apuntan a la necesidad de investigar las interacciones entre ciclistas y vehículos motorizados en estas vías, y a definir medidas que aumenten su seguridad.

Las carreteras convencionales suponen el 90% de la red de carreteras en España (Dirección General de Tráfico, 2019). Estas carreteras han sido diseñadas teniendo en cuenta solamente a los vehículos motorizados, y la mayoría de ellas no dispone de arcenes suficientemente anchos ni de ninguna infraestructura diseñada para la circulación de ciclistas. En la Diputació de València un 68% de las carreteras convencionales disponen de arcén inexistente o impracticable, presentando un ancho de vía menor de 7 m (Ministerio de Fomento, 2019), y muchas de ellas presentan una elevada presencia ciclista. Un estudio realizado por la Universitat de València, junto con las fundaciones Ponle Freno y AXA, a partir de datos de accidentes con ciclistas entre 2008 y 2013 en España facilitados por la Dirección General de Tráfico, concluyó que el 78% de los accidentes se produjeron en carreteras con arcén inexistente o impracticable (Universitat de València, 2016), demostrando que muchas de las carreteras en las que interaccionan vehículos a motor y bicicletas son secundarias, con arcén estrecho o nulo. En este tipo de carreteras el adelantamiento a ciclistas supone una mayor invasión del sentido opuesto y más maniobras iniciadas desde el seguimiento, pudiendo crear situaciones más peligrosas.

En España la circulación de ciclistas y su interacción con los vehículos a motor viene regulada por el Reglamento General de Circulación (Ministerio del Interior, 2003). En este Reglamento se permite la circulación de las bicicletas por el arcén o por el lado derecho de la calzada cuando el arcén es intransitable, y se les permite circular como máximo dos en paralelo si existe suficiente visibilidad. También se regula el adelantamiento a ciclistas exigiendo una distancia mínima de 1,5 metros.

El uso compartido de las carreteras por bicicletas y vehículos motorizados implica su interacción, pudiendo modificar no solamente la seguridad, sino también la funcionalidad del tráfico en estas vías. En España la funcionalidad del tráfico se determina mediante la metodología del Highway Capacity Manual (HCM) (Transportation Research Board, 2016).

El HCM determina el nivel de servicio que ofrece una carretera basándose en tres medidas de desempeño: el porcentaje de tiempo en cola, la velocidad media de recorrido del tramo y la velocidad en flujo libre. Para carreteras estrechas con una intensidad de tráfico motorizado relativamente baja, el porcentaje de tiempo en cola es la principal medida de desempeño que caracteriza la funcionalidad del tráfico. Sin embargo, la metodología descrita en el HCM solamente tiene en cuenta a los vehículos motorizados. En carreteras convencionales la presencia de ciclistas supone un obstáculo para los vehículos a motor, debido a la diferencia de velocidades que existe entre ellos, siendo la posibilidad de adelantamiento esencial para no penalizar la funcionalidad del tráfico. En vías estrechas el adelantamiento requiere la prácticamente total ocupación del sentido opuesto, y en muchos casos obliga a realizar un seguimiento del grupo de ciclistas previo a su adelantamiento. Esto implica que tanto el deseo, como la posibilidad de adelantamiento a bicicletas, sean mayores que entre vehículos motorizados, para una misma carretera. Por tanto, es necesario analizar en detalle la interacción entre bicicletas y vehículos motorizados en estas vías para evaluar el efecto de la presencia de tráfico ciclista tanto en la seguridad como en la funcionalidad del tráfico.

En los últimos años se han realizado numerosos estudios sobre la interacción de bicicletas y vehículos motorizados en entorno interurbano. La mayoría de ellos están enfocados a la seguridad durante el adelantamiento, centrándose en el análisis de la separación lateral y la velocidad durante la maniobra de adelantamiento y el tipo de maniobra realizada, como los realizados por Llorca et al. (2017), Bianchi Piccinini et al. (2018) y Farah et al. (2019).

Recientemente un estudio realizado por Feizi et al (2021) recogió datos de separaciones laterales utilizando una bicicleta instrumentada en distintos tipos de carreteras de Estados Unidos; una de sus conclusiones fue que en carreteras anchas con arcenes las separaciones laterales eran mayores. En España la circulación de grupos de ciclistas es una realidad que debe de tenerse en cuenta. Sin embargo, pocos estudios han considerado la circulación de ciclistas en grupos, solamente García et al. (2019) y López et al. (2020) realizaron un estudio considerando grupos de hasta 3 y 10 ciclistas respectivamente. En el presente estudio se consideran grupos de ciclistas circulando en línea y en paralelo.

A partir de observaciones en campo se pueden obtener medidas que permiten caracterizar la seguridad y la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales. Sin embargo, las observaciones no cubren todo el rango de demandas de tráfico existentes, y no es posible obtener algunas medidas de desempeño mediante observación directa del fenómeno. La microsimulación del tráfico es una herramienta que permite simular escenarios geométricos y de tráfico diferentes a los observados, y obtener medidas de desempeño difícilmente medibles en campo como el tiempo de demora acumulada de los vehículos. En la actualidad existen diferentes programas de simulación del tráfico, pero ninguno de ellos permite simular la interacción entre bicicletas y vehículos a motor en entornos interurbanos. En este estudio se ha utilizado el software de simulación de tráfico Aimsun Next (Aimsun, 2020).

Aimsun Next dispone de un módulo que permite simular adelantamientos entre vehículos motorizados en carreteras convencionales desarrollado por Llorca et al. (2015), y que fue calibrado y validado con observaciones en campo. En este estudio se pretende incorporar a las bicicletas como un nuevo usuario en este modelo, con sus respectivas características, considerando la interacción con los vehículos motorizados y la circulación de grupos en línea y en paralelo.

El adelantamiento a grupos ciclistas presenta algunas particularidades que deben adaptarse al modelo existente para vehículos motorizados. El modelo debe de representar la realidad, considerando las interacciones entre motorizados pero incorporando a las bicicletas, por tanto, los parámetros que rigen las interacciones entre motorizados deben adaptarse sin variar el comportamiento entre ellos.

Las principales limitaciones del modelo actual son la imposibilidad de simular la invasión parcial del carril opuesto durante el adelantamiento y la no consideración de anchos de vía ni de vehículos. Para superar estas limitaciones se ha modificado el modelo, calibrando las longitudes equivalentes de los grupos de bicicletas de manera que las duraciones de los adelantamientos coincidan con las observadas, incorporando así el efecto de invasiones parciales del carril opuesto, y la configuración del grupo de ciclistas.

Se consideran diferentes longitudes para grupos circulando en línea o en paralelo, considerando el diferente ancho de cada grupo de ciclistas.

Este estudio es la continuación de Moll et al. (2021), donde se calibró y validó el modelo considerando ciclistas; sin embargo, solo fueron analizados ciclistas circulando en paralelo. Dado que la presencia de grupos ciclistas en línea también es muy habitual, este estudio se centra en la influencia de esta configuración y en la comparativa de las mismas con el objetivo de analizar la seguridad y la funcionalidad del tráfico en estas vías.

## **2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

El objetivo principal de esta investigación es analizar el efecto que tiene la presencia de tráfico ciclista en la seguridad y la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales mediante el uso de un microsimulador de tráfico, considerando a los grupos de ciclistas circulando en línea y en paralelo. Para ello se desarrollaron dos metodologías de tomas de datos en campo que permitieron obtener los datos necesarios para adaptar, calibrar y validar un modelo de microsimulación de tráfico que incorpore a estos usuarios, su comportamiento y sus interacciones.

Las hipótesis de partida consideradas son las siguientes:

La presencia de ciclistas reduce la velocidad media de recorrido de los vehículos motorizados.

- A mayor número de ciclistas que forman el grupo mayor será su afección sobre la funcionalidad y la seguridad.
- Cuando los ciclistas circulan en línea su afección es mayor que cuando lo hacen en paralelo.
- El uso de microsimulación del tráfico permite obtener medidas de desempeño difícilmente medibles en campo.

### **3. METODOLOGÍA**

Para llevar a cabo este estudio se han diseñado y realizado dos tipos de tomas de datos reales en campo; por una parte, se han instrumentado bicicletas con la finalidad de obtener datos relativos a la maniobra de adelantamiento a nivel microscópico, y por otra, se han realizado tomas de datos en la entrada y salida del tramo de estudio para obtener medidas de desempeño a nivel macroscópico.

Una vez recogidos y analizados todos los datos, tanto a nivel microscópico como macroscópico, se modela el fenómeno en el microsimulador de tráfico, y se calibra y valida con los datos observados en campo, considerando la circulación de los grupos de ciclistas en línea y en paralelo.

Con el modelo de microsimulación se obtendrán las medidas de desempeño consideradas en el HCM y otras que caractericen el efecto de la presencia de ciclistas, y se verificará la validez del modelo para simular carreteras convencionales estrechas con tráfico motorizado y ciclista.

#### **3.1 Tramo de estudio**

El tramo de estudio está situado en el sur de València, en la carretera CV-502, entre los PK1+315 y PK3+500. En este tramo se realizaron diversos aforos y se comprobó una elevada presencia de tráfico ciclista, tanto en días laborables como festivos, ya que se trata de un tramo habitual en los recorridos de los clubes ciclistas. La Fig. 1 muestra la ubicación del tramo y sus características geométricas.



**Fig. 1 - Localización y características del tramo de estudio.**

Se trata de un tramo de carretera convencional sin arcén, con un ancho de carril de 3.5 m, una IMD de 3544 veh/día y un porcentaje de vehículos pesados de 2.07% (Diputació de València, 2020). El tramo de estudio discurre paralelo a la playa, y la pendiente es prácticamente nula en todo el tramo.

La longitud del tramo es de 2185 m, y la velocidad límite es de 70 km/h. Se trata de un tramo homogéneo, sin entradas ni salidas intermedias de vehículos. Para poder modelar el tramo en el simulador de tráfico se ha realizado un estudio determinando las características geométricas del tramo, tales como líneas continuas, velocidades límite y señalización viaria.

Estos datos se han tomado en los dos sentidos de circulación, y son necesarios para incorporar el tramo en el simulador de tráfico correctamente.

### 3.2 Datos a nivel microscópico

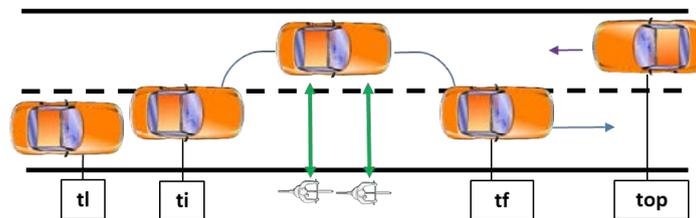
Para modelar correctamente las interacciones entre vehículos motorizados y ciclistas es necesario conocer en detalle la maniobra de adelantamiento, ya que esta es la interacción más importante que se produce entre ellos. Para estudiar esta maniobra se ha diseñado una metodología de toma de datos basada en la circulación, por el tramo de estudio, de bicicletas instrumentadas que permitan registrar datos durante las maniobras de adelantamiento. La instrumentación detallada de las bicicletas puede consultarse en Moll et al. (2021), y puede verse en la Fig. 2.

Los ciclistas recorrieron el tramo en las siete configuraciones de grupo mostradas en la Fig. 2. Los ciclistas que participaron en las pruebas tenían experiencia en el ciclismo de carretera, y circularon libremente manteniendo la configuración del grupo indicada. Para la realización de las pruebas los ciclistas llevaron ropa deportiva adecuada y casco, ya que su uso es obligatorio en carretera.



**Fig. 2 - Bicicleta instrumentada y configuraciones estudiadas.**

En la reducción de los datos registrados con las bicicletas instrumentadas se obtuvo la línea temporal de cada adelantamiento. Se define la duración del adelantamiento como el tiempo desde que el vehículo inicia la maniobra hasta que la termina regresando a su posición natural en el carril de circulación, en la Fig. 3 corresponde con  $t_f - t_i$ . La duración del adelantamiento es la principal variable utilizada para calibrar las maniobras de adelantamiento a nivel microscópico.

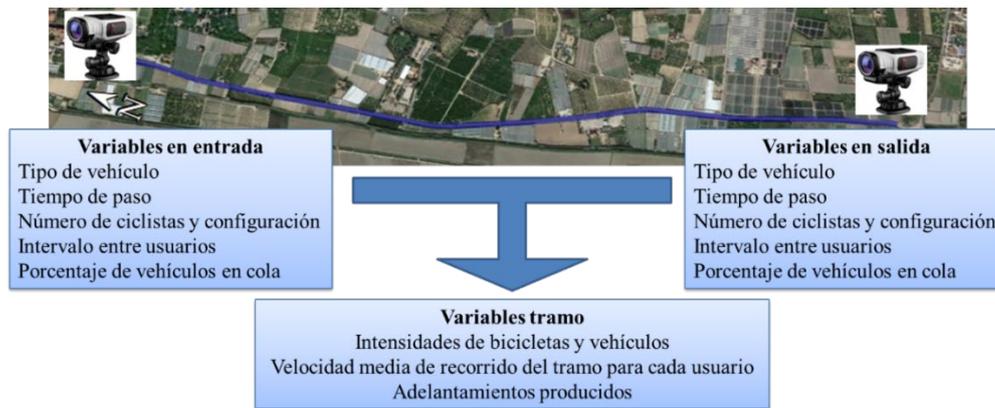


$t_l$ : tiempo de llegada a las bicicletas;  $t_i$ : tiempo de inicio de la maniobra;  $t_f$ : tiempo fin de la maniobra;  $top$ : tiempo en que se observa el opuesto.

**Fig. 3 - Línea temporal de la maniobra de adelantamiento.**

### 3.3 Datos a nivel macroscópico

La metodología de toma de datos a nivel macroscópico o de sección consiste en realizar grabaciones desde una posición estática a la entrada y salida del tramo, con la finalidad de registrar en estos puntos el tiempo de paso de cada usuario y su tipología. En el caso de agrupaciones de ciclistas también se registra el número de ciclistas que componen el grupo y su configuración en línea o en paralelo. Todas estas grabaciones se realizaron con videocámaras de alta definición colocadas de forma estratégica de manera que se consiguieron grabaciones en las que se distingue perfectamente las variables de estudio sin ser advertidas por los usuarios, no afectando así a su comportamiento. La Fig. 4 muestra la metodología utilizada y las variables registradas en estas tomas de datos.



**Fig. 4 - Toma de datos y variables registradas a nivel macroscópico en el tramo de estudio.**

La reducción de datos se realizó mediante el software de procesamiento de vídeos Kinovea, obteniéndose las siguientes variables:

- El tiempo de recorrido del tramo de cada usuario.
- La velocidad media de recorrido de cada usuario.
- Intervalos de tiempo entre usuarios en entrada y salida.
- Porcentaje de usuarios en cola a la entrada y a la salida del tramo. Se considera que un vehículo circula en cola si el intervalo con su predecesor es menor de 3 s, siguiendo el criterio del HCM (Transportation Research Board, 2016).

A partir de estos datos se calcularon las intensidades en periodos de 15 minutos, tanto de bicicletas como de vehículos motorizados. Estas intensidades se calcularon con ventanas deslizantes de 5 minutos, y para cada valor se obtuvo la intensidad horaria equivalente. Para las bicicletas se tuvo en cuenta su agrupamiento, registrando el número de ciclistas que formaban el grupo y su configuración en línea o en paralelo. Estas intensidades horarias equivalentes proporcionaron los escenarios de tráfico necesarios para calibrar y validar el modelo de microsimulación.

### 3.4 Modelo de microsimulación

En este estudio se utilizó el software Aimsun Next, en su versión Aimsun Next 20. Esta versión incorpora una mejora que permite adelantar a vehículos más lentos incluso con línea continua (Aimsun, 2020), esta novedad permite representar la realidad más fielmente, ya que la normativa española permite adelantar a bicicletas en línea continua si existe suficiente visibilidad según el Reglamento General de Circulación (Ministerio del Interior, 2003).

Aimsun Next dispone de un módulo de adelantamiento en carreteras convencionales desarrollado por Llorca et al. (2015). En este estudio se adapta el modelo existente a la circulación de bicicletas y motorizados y a su interacción, y se calibra y valida con datos observados. La metodología de desarrollo del modelo de microsimulación, y la calibración y validación se puede consultar en Moll et al. (2021).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Resultados de la toma de datos a nivel microscópico

Mediante la metodología de toma de datos a nivel microscópico se han recopilado un número elevado de variables relacionadas con la maniobra de adelantamiento entre vehículos a motor y bicicletas. Para calibrar el modelo de microsimulación solamente se utilizaron los datos de las duraciones de la maniobra de adelantamiento a los diferentes grupos de ciclistas que recorrieron el tramo en las configuraciones indicadas.

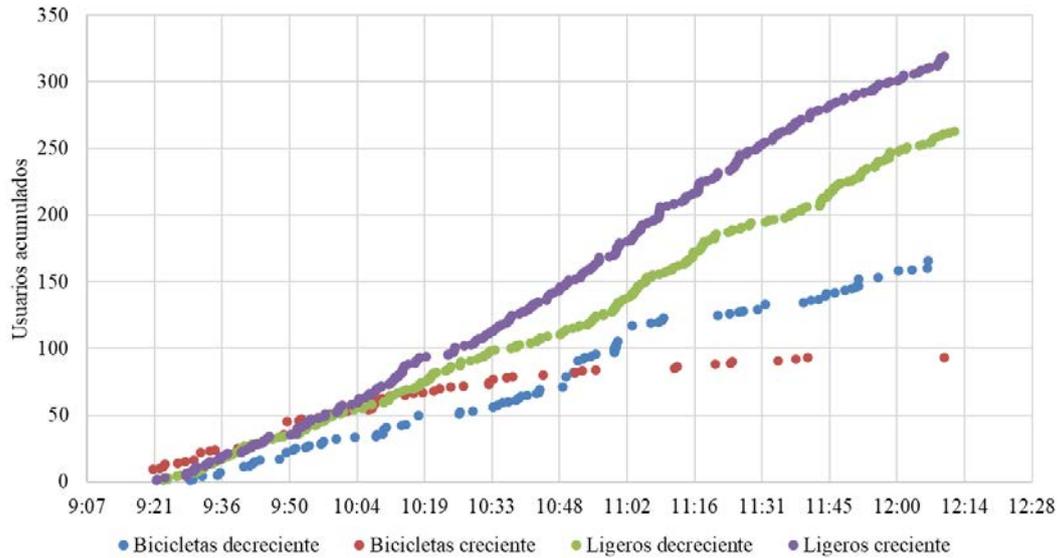
En la Tabla 1 se recogen los datos registrados de velocidades del vehículo adelantante, separaciones laterales y duraciones del adelantamiento a los distintos grupos de ciclistas. Se observa que los resultados de las velocidades del vehículo adelantante durante el adelantamiento fueron similares para todas las configuraciones de ciclistas estudiadas. En cuanto a las separaciones laterales durante el adelantamiento, cuando los ciclistas circularon en línea se registraron separaciones mayores, y en todos los casos, las separaciones laterales medias respetaron la distancia mínima exigida de 1.5 metros.

Configuración	Observaciones		Velocidad (km/h)		Separación (m)		Duración (s)	
	N	%	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.
Individual (1)	37	16%	65.60	15.66	1.88	0.455	5.65	1.65
2 en línea (2L)	41	18%	66.39	19.35	1.78	0.461	6.71	2.11
2 en paralelo (2P)	42	19%	62.48	13.94	1.60	0.458	6.17	1.99
4 en línea (4L)	36	16%	68.46	13.55	1.91	0.42	8.58	2.22
4 en paralelo (4P)	31	14%	63.03	14.84	1.67	0.32	6.84	2.00
10 en línea (10L)	16	7%	62.06	9.72	1.99	0.39	9.44	2.22
10 en paralelo (10P)	22	10%	64.68	12.75	1.83	0.51	7.59	1.97
Total	225	100%	64.85	14.91	1.79	0.45	7.03	2.30

**Tabla 1 - Número de adelantamientos registrados y datos de velocidad del adelantante, separación lateral y duración del adelantamiento según configuración del grupo de ciclistas adelantado.**

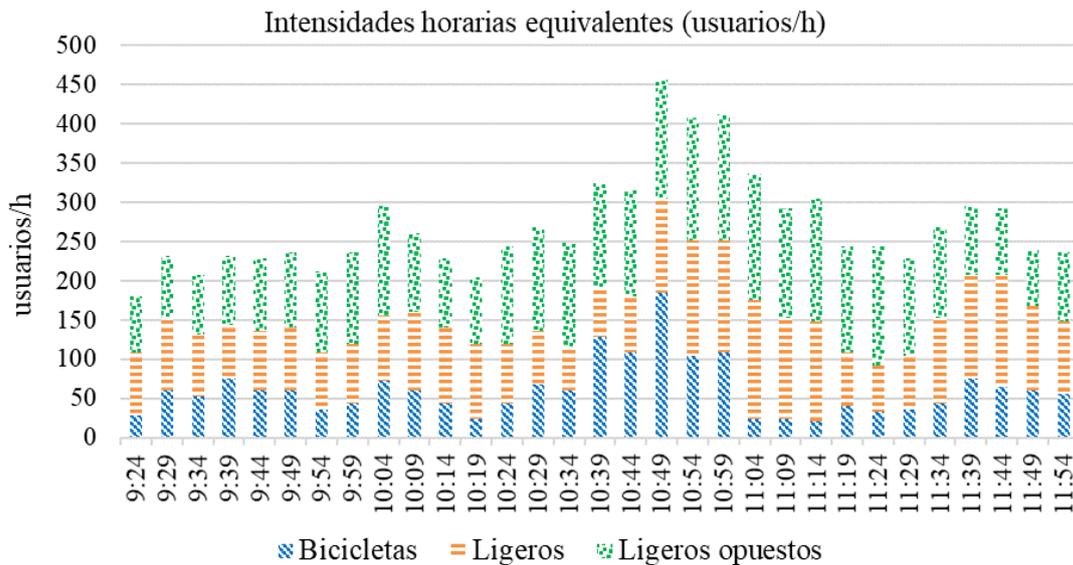
### 4.2 Resultados de la toma de datos a nivel macroscópico

Se tomaron datos a la entrada y salida del tramo un día laborable por la mañana, iniciando a las 9:15 y con una duración poco mayor de 3 horas. Los datos se redujeron y analizaron en los dos sentidos de circulación. En la Fig. 9 se muestran las bicicletas y los vehículos motorizados ligeros acumulados registrados en cada sentido de circulación durante el periodo de toma de datos.



**Fig. 9 - Bicycles and light vehicles accumulated registered during the study period in each direction.**

A partir de estas observaciones se decidió realizar el estudio en el sentido decreciente del tramo, ya que fue el sentido con mayor número de ciclistas observados. Se obtuvieron los escenarios de tráfico horario equivalente, a partir de las observaciones cada 15 minutos (Fig. 10).



**Fig. 10 - Equivalent hourly intensities of users in the decreasing direction.**

A partir de los datos observados en inicio y fin del tramo se obtuvieron las distribuciones de velocidades medias de recorrido de bicicletas y vehículos ligeros. Estos datos de velocidades son necesarios para definir las velocidades de los usuarios en Aimsun, y para calibrar y validar los resultados de las simulaciones.

Los datos de velocidades de bicicletas circulando individualmente y en pelotón se compararon mediante un análisis ANOVA y los resultados indicaron que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las velocidades medias de recorrido de estos dos grupos ( $F=0.09$ ,  $p=0.7591$ ). Por tanto, a la hora de analizar las velocidades medias de recorrido de ciclistas individuales y en grupo, se consideran todos los datos conjuntamente, ya que todos ellos circulan a la misma velocidad.

La distribución de velocidades medias de recorrido de los ciclistas presentó un valor promedio de 29.52 km/h y una desviación de 4.45 km/h. Las velocidades de los ciclistas presentaron poca dispersión debido a que el tramo no presenta prácticamente pendiente, y los ciclistas observados eran semiprofesionales con una forma física desarrollada. Los 263 vehículos ligeros que se registraron presentaron una velocidad media de recorrido con un valor promedio de 62.08 km/h y una desviación de 8.21 km/h.

Se seleccionaron los escenarios para calibrar el modelo en Aimsun Next y para validarlo a partir de los datos de intensidades horarias observadas (Fig. 10). Para calibrar el modelo se utilizaron los escenarios de demanda máxima y mínima de bicicletas, y un tercer escenario de demanda media, con sus correspondientes demandas de ligeros en el mismo sentido de circulación y en sentido opuesto. Una vez calibrado el modelo se validó considerando cuatro escenarios de demanda diferentes a los utilizados en la calibración. Para calibrar y validar el modelo se consideraron los grupos de ciclistas circulando en línea y en paralelo.

Intensidades (usuarios/h)	Calmin	Calmed	Calmax	Val1	Val2	Val3	Val4
Ligeros	128	144	120	76	64	136	108
Ligeros opuestos	156	160	152	136	156	88	84
1	12	36	40	24	16	24	20
2P/2L	4	12	8	16	0	16	0
4P/4L	0	0	4	0	4	4	8
10P/10L	0	4	12	8	0	0	0
Total ciclistas	20	100	192	136	32	72	52

**Tabla 2 - Escenarios de tráfico utilizados para calibración y validación (usuarios/h).**

### 4.3 Resultados del modelo de microsimulación

#### 4.3.1 Calibración del modelo

Se realizaron varios procesos de calibración del modelo, variando en cada uno de ellos los parámetros necesarios. En la Tabla 3 se muestran los resultados de los principales parámetros después del proceso de calibración. Se calibraron las longitudes de los grupos de ciclistas para conseguir las mismas duraciones de los adelantamientos obtenidas en las simulaciones y en las observaciones de campo. El resto de los parámetros del modelo se revisó con detalle, y se intentó variar mínimamente los valores originales para no afectar a la interacción entre motorizados, ya que en el modelo resultante los vehículos motorizados también deben de interactuar entre sí de manera correcta.

Segmento	Diferencia de velocidades para adelantar en línea continua (km/h) = 20 km/h			
	Longitud tramos generación de colas (m) = 350 m			
Usuarios	Longitudes equivalentes (m):	Individual = 4 m;	2P = 6 m; 4P = 10 m;	10P = 16 m
			2L = 11 m; 4L = 28 m;	10L = 35 m
	Velocidad máxima deseada Ligeros = media 78 km/h (Desv. 10 km/h)			
	Velocidad máxima deseada bicicletas = media 30 km/h (Desv. 2 km/h)			
Experimento	Demora entre adelantamientos simultáneos (s) = 0 s			
	Número de adelantamientos simultáneos permitidos = 5			
	Rango máximo en la cola para desear adelantar = 2			
	Umbral de tiempo hasta fin de tramo (s) = 5 s			

**Tabla 3 - Valores de los principales parámetros calibrados.**

El proceso de calibración se inició analizando los datos a nivel microscópico obtenidos de las maniobras de adelantamiento a los diferentes grupos de ciclistas en el simulador.

En esta fase se calibraron las longitudes equivalentes de cada grupo de ciclistas mostradas en la Tabla 3, de manera que no existieran diferencias estadísticamente significativas entre las duraciones de los adelantamientos obtenidas en los escenarios de calibración y las observadas en campo. Los resultados de la prueba ANOVA mostrados en la Tabla 4 muestran que para todos los casos el *p-valor* es mayor de 0.05, por tanto, las medias de los valores simulados y observados de las duraciones no presentaron diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%. Para cada escenario de calibración se comparó una a una las distribuciones de duraciones obtenidas de las simulaciones con las observadas para cada grupo de ciclistas mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S). En total se realizaron 15 pruebas K-S, solamente para un ciclista individual se obtuvieron valores de  $p < 0.05$ , indicando en todos los otros casos que no existía una diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones comparadas con un nivel de confianza del 95%.

Grupos de ciclistas	Calmin			Calmed			Calmax			Resultados ANOVA	
	N	Media	Desv.	N	Media	Desv.	N	Media	Desv.	F	<i>p</i> -valor
1	148	5.88	1.46	192	5.74	1.57	190	5.56	1.54	1.22	0.303
2L	45	6.89	1.82	35	6.34	1.81	41	6.71	2.11	0.51	0.673
2P	45	6.18	1.93	81	6.20	1.64	73	6.06	1.55	0.10	0.961
4L	-	-	-	-	-	-	51	8.31	2.15	0.32	0.571
4P	-	-	-	-	-	-	40	6.65	1.66	0.19	0.665
10L	-	-	-	51	9.25	2.29	86	9.30	2.19	0.04	0.960
10P	-	-	-	69	7.31	1.73	103	7.14	1.62	0.71	0.495

**Tabla 4 - Resultados estadísticos de las duraciones de los adelantamientos (s) según la configuración del grupo de ciclistas.**

En la segunda parte de la calibración se obtuvieron los valores de los parámetros que minimizaban las diferencias entre los valores observados y simulados de las variables a nivel macroscópico. Se calibraron las velocidades medias de recorrido, los intervalos de tiempo entre usuarios y el porcentaje de vehículos en cola a la entrada y salida del tramo para los tres escenarios. Los resultados del proceso de calibración a nivel macroscópico pueden consultarse en Moll et al. (2021).

A la vista de los resultados del proceso de calibración, se considera que el modelo está calibrado y funciona correctamente, tanto a nivel microscópico, observando las maniobras de adelantamiento en detalle, como a nivel macroscópico o de sección.

#### **4.3.2 Validación del modelo**

El modelo se validó en cuatro escenarios de tráfico diferentes a los utilizados en la calibración, y mostrados en la Tabla 2. El proceso de validación se realizó a nivel macroscópico, comparando los resultados de las simulaciones con las observaciones en campo de las velocidades medias de recorrido, y el intervalo de tiempo entre vehículos y los porcentajes de vehículos en cola a la entrada y salida del tramo.

El proceso de validación y los resultados obtenidos se pueden consultar en Moll et al. (2021).

Después de los procesos de calibración y validación, el modelo está listo para ser utilizado para calcular las variables necesarias para analizar la afeción que el tráfico ciclista puede tener sobre la seguridad y la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales estrechas considerando los grupos de ciclistas circulando en línea y en paralelo.

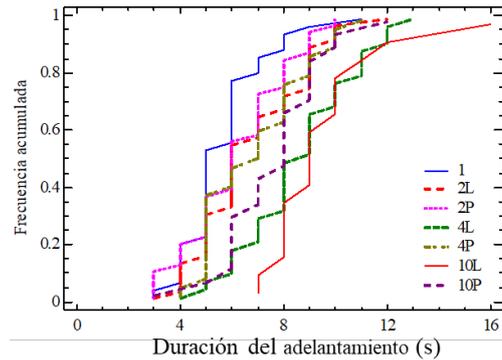
#### **4.4 Análisis de la seguridad y la funcionalidad del tráfico**

En este apartado se analizan los resultados de las simulaciones de los tres escenarios utilizados para calibrar el modelo de microsimulación. Estos tres escenarios han sido simulados considerando a los grupos de ciclistas circulando en línea y en paralelo.

A partir de las observaciones en campo realizadas mediante las bicicletas instrumentadas se obtuvieron las distribuciones de las duraciones del adelantamiento considerando diferentes agrupaciones de ciclistas. En la Fig. 11 se puede observar como la tendencia fue que a mayor número de ciclistas formando el grupo, se registraron mayores duraciones, y para grupos formados por el mismo número de ciclistas se registraron mayores duraciones cuando circulaban en línea que cuando lo hicieron en paralelo. Mayores duraciones del adelantamiento implican mayores tiempos en el carril opuesto, generando un mayor riesgo de exposición a colisión frontal con los vehículos opuestos.

En el tramo de carretera convencional estrecha donde se desarrolló el estudio, la mayoría de los grupos ciclistas observados circulaban en paralelo, esta configuración presentó duraciones menores del adelantamiento y por tanto una menor exposición al riesgo para los conductores. Estas observaciones difieren de la opinión de los conductores que realizaron

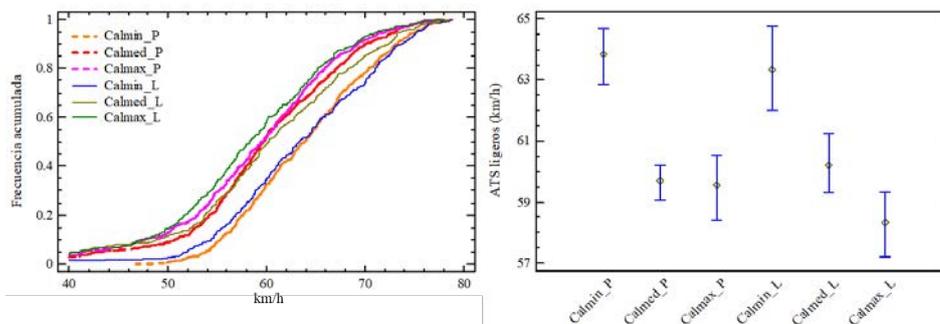
las encuestas del estudio realizado por López et al., 2019, donde la mayoría de los conductores encuestados prefirieron que los ciclistas circulen en línea.



**Fig. 11 - Distribuciones de las duraciones del adelantamiento (s) a los diferentes grupos de ciclistas obtenidas en campo.**

En la Fig. 12 se muestran las distribuciones de velocidades medias de recorrido de los vehículos ligeros resultantes de las simulaciones de los seis escenarios de calibración.

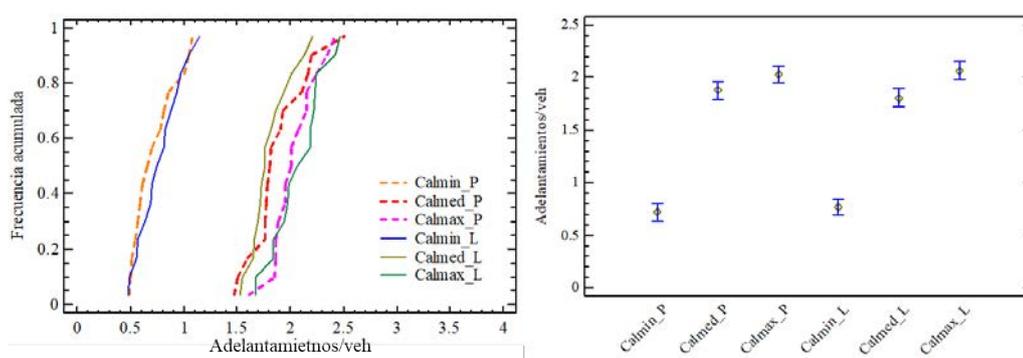
Se observa que la velocidad media de recorrido del tramo se redujo a medida que aumentaba la demanda de ciclistas. Se realizó la prueba de Kruskal-Wallis para comparar las medianas de las distribuciones, ya que los datos no provienen de distribuciones normales, los resultados mostraron que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel de confianza del 95%. Sin embargo, las medianas y las distribuciones de las velocidades considerando los escenarios de demanda máxima y media no mostraron diferencias estadísticamente significativas con una significancia del 5%. Esto indica que, a partir de un cierto nivel de tráfico ciclista cercano a la demanda media observada, el efecto sobre la velocidad media de recorrido de los vehículos ligeros es menor, a medida que aumenta el volumen de ciclistas. Las medianas entre línea y paralelo no presentaron diferencias estadísticamente significativas en la prueba de Bonferroni para los tres escenarios de tráfico.



**Fig. 12 - Distribuciones de las velocidades medias de recorrido de los vehículos ligeros (km/h) (izquierda) y medianas e intervalos del 95% de confianza (derecha) obtenidas en las simulaciones de los escenarios de calibración.**

Otra variable que sirve para caracterizar la seguridad y la funcionalidad del tráfico es el número de adelantamientos realizados por vehículo en el tramo. En la Fig. 13 izquierda se pueden observar las distribuciones del número medio de adelantamientos por vehículo obtenidos de las 15 simulaciones para los seis escenarios simulados. Es evidente que a mayor volumen de ciclistas circulando en el tramo se realizan más maniobras de adelantamiento.

Los resultados de la prueba ANOVA constataron las diferencias entre las medias de los escenarios simulados ( $F=116.65$ ,  $p<0.05$ ). Sin embargo, para los escenarios simulados, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los adelantamientos registrados considerando las configuraciones de los grupos de ciclistas en línea y en paralelo (Fig. 13 derecha).

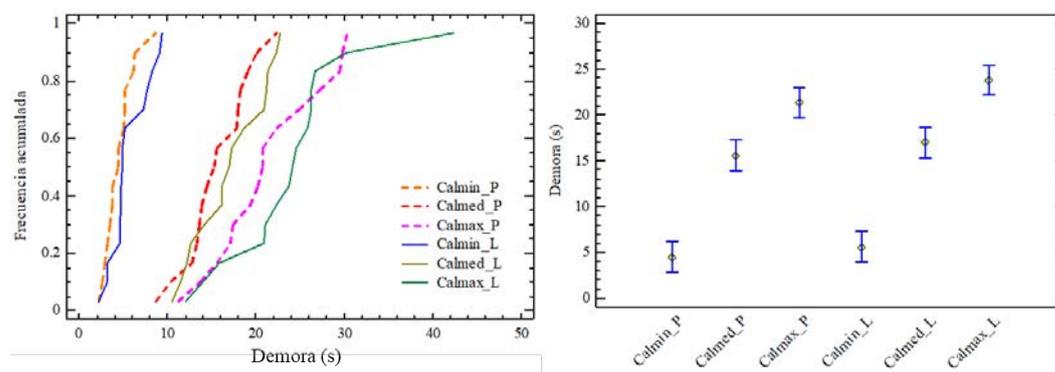


**Fig. 13 - Distribuciones de los adelantamientos realizados por vehículo (izquierda) y media e intervalos LSD de Fisher (derecha) obtenidos en las simulaciones de los escenarios de calibración para los grupos circulando en línea y en paralelo.**

En la Fig. 14 se han representado los valores del tiempo de demora acumulada de los vehículos ligeros obtenidos en las 15 replicaciones de cada escenario de calibración. Se puede observar como el tiempo de demora aumentó al incrementar el tráfico ciclista.

También se observa que, al aumentar la demanda de ciclistas, el tiempo de demora presentó una mayor dispersión. Esta mayor dispersión se debe a que al simular escenarios con una elevada demanda ciclista existen vehículos que se encuentran con más ciclistas y otros con menos, y su tiempo de demora depende del número de ciclistas con los que interactúan. La prueba ANOVA ( $F=63.37$ ,  $p<0.05$ ) indicó que las medias de las seis distribuciones de tiempo de demora presentaron diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 5% de significación. Cuando los grupos circularon en línea, la media del tiempo de demora de los vehículos motorizados no presentó diferencias estadísticamente significativas respecto a la configuración en paralelo, sin embargo, los valores de la demora media y las dispersiones fueron ligeramente mayores para las configuraciones en línea debido a la mayor longitud de los grupos (Fig. 14 derecha). Esta diferencia, a pesar de no ser significativa en los escenarios simulados, va aumentando a medida que aumenta la demanda ciclista, poniendo de manifiesto que la configuración del grupo de ciclistas tiene mayor importancia cuando el tráfico es elevado.

El tiempo de demora acumulada de los vehículos ligeros es una variable difícil de medir en campo, en este estudio se ha obtenido mediante el uso del modelo de microsimulación, poniendo en valor el uso de esta metodología para obtener variables que pueden caracterizar la seguridad y la funcionalidad del tráfico.



**Fig. 14 - Distribuciones de las demoras acumuladas (izquierda) y media e intervalos LSD de Fisher (derecha) obtenidos en las simulaciones de los escenarios de calibración para los grupos circulando en línea y en paralelo.**

Otra medida de desempeño analizada en este estudio fue el porcentaje de vehículos en cola (VC) a la entrada y a la salida del tramo de estudio. Esta variable se calculó en los escenarios considerando la demanda mínima, media y máxima de ciclistas registrados. En la Tabla 7 se pueden observar los valores calculados del porcentaje de vehículos en cola. Para cada escenario, la variación entre el inicio y el final del tramo no es muy significativa, presentando valores muy similares en los dos puntos para los tres escenarios analizados. Si se observa la variación entre escenarios, sí se aprecian más diferencias.

El escenario con demanda mínima de bicicletas presentó valores del porcentaje de vehículos en cola menores, cercanos al 20%, mientras que los escenarios con demandas media y máxima presentaron valores más elevados alrededor del 30%.

Por tanto, la presencia de tráfico ciclista aumentó el valor del porcentaje de vehículos en cola en carreteras convencionales estrechas. Los resultados obtenidos considerando a los grupos de ciclistas circulando en línea y en paralelo fueron muy similares, no presentando diferencias estadísticamente significativas entre las dos configuraciones.

Escenario	Inicio del tramo Fin del tramo	
	VC Sim.	VC Sim.
Calmin	18.80%	19.10%
Calmed	32.40%	28.20%
Calmax	29.40%	28.90%

**Tabla 5 - Resultados estadísticos para el porcentaje de vehículos en cola (VC) en los escenarios de calibración.**

Las diferencias entre las configuraciones en línea y en paralelo de los grupos de ciclistas en los niveles de tráfico analizados no fueron significativas para ninguna de las variables analizadas. Sin embargo, la configuración en la que circulan los grupos tiene más influencia sobre el tiempo de demora a medida que aumenta el volumen de ciclistas en el tramo. Como líneas futuras de investigación se propone simular escenarios de tráfico diseñados aumentando tanto la demanda ciclista como motorizada.

## 5. CONCLUSIONES

La presencia de ciclistas en carreteras convencionales no solamente afecta a la seguridad en estas vías, sino también a la funcionalidad del tráfico. Esta afección es especialmente acusada en carreteras convencionales estrechas, con arcén nulo o impracticable, donde los ciclistas deben de circular por el carril y los vehículos realizan adelantamientos con una mayor invasión del sentido opuesto y una mayor duración.

En este estudio se han tomado datos de campo en un tramo de carretera convencional sin arcén mediante dos metodologías distintas. Por una parte, se han recogido datos a nivel microscópico utilizando bicicletas instrumentadas. Se ha observado que la circulación de ciclistas por el tramo ha aumentado el número de maniobras de adelantamiento necesarias generando un mayor riesgo de colisión frontal con los opuestos y de alcance con las bicicletas. Uno de los principales resultados han sido las duraciones de los adelantamientos a los diferentes grupos de ciclistas considerados en el experimento. Estas duraciones fueron mayores a medida que había más ciclistas en el grupo, y en cuanto a su configuración, para un grupo formado por el mismo número de ciclistas, la duración del adelantamiento fue mayor cuando circulaban en línea que cuando lo hacían en paralelo.

La segunda metodología utilizada consistió en realizar grabaciones naturalísticas en los extremos del tramo de estudio, obteniendo los diferentes escenarios de tráfico utilizados para calibrar y validar el modelo de microsimulación, y para analizar la funcionalidad.

A partir de las observaciones en campo, se ha adaptado, calibrado y validado un modelo de microsimulación del tráfico que permite simular adelantamientos en carreteras convencionales, de manera que se represente el comportamiento de vehículos motorizados, bicicletas, y sus interacciones. Se ha utilizado el programa Aimsun Next 20. En el modelo de microsimulación se han calibrado las longitudes equivalentes de cada grupo de ciclistas para obtener duraciones de los adelantamientos similares a las observadas, representando así la invasión parcial del carril opuesto y la configuración del grupo de ciclistas. El uso de modelos de microsimulación del tráfico, debidamente calibrados y validados, permite estudiar el efecto de los ciclistas sobre determinadas medidas de desempeño que caracterizan la seguridad y la funcionalidad del tráfico. También permite obtener algunas medidas difíciles de registrar en campo, como el tiempo de demora acumulada de los vehículos ligeros.

Se han simulado seis escenarios considerando la demanda de ciclistas mínima, media y máxima observadas y considerando los grupos circulando en línea y en paralelo. Los resultados obtenidos muestran que al aumentar el volumen de ciclistas la velocidad media de recorrido de los vehículos ligeros disminuye, y el número de adelantamientos realizados por vehículo y el tiempo de demora acumulada aumentan.

El aumento de la presencia de ciclistas también aumentó el porcentaje de usuarios en cola en los extremos del tramo. Para los niveles de tráfico analizados en este estudio no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las configuraciones en línea y en paralelo de los grupos de ciclistas para ninguna de las variables analizadas. Sin embargo, al aumentar el volumen de tráfico, tanto ciclista como motorizado, puede que la configuración de los grupos si influya en los resultados, debido a la mayor longitud de los grupos al circular en línea. Este estudio se propone como futura línea de investigación.

La microsimulación del tráfico es una herramienta que puede ser explotada con diferentes fines, pudiendo simular medidas y escenarios obteniendo resultados de una manera rápida y económica. Uno de estos fines es la simulación de escenarios variando la demanda, tanto de motorizados como de ciclistas, y analizar cómo afecta a las diferentes medidas de desempeño esta variación. Por otra parte, se puede estudiar el efecto de medidas tomadas sobre el tráfico o la propia carretera, como reducciones de la velocidad límite o la incorporación de apartaderos que faciliten la maniobra de adelantamiento a los ciclistas. El uso de la microsimulación del tráfico puede ayudar a las Administraciones a integrar a las bicicletas y a los vehículos motorizados en las carreteras de una manera más segura y eficiente.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este estudio forma parte del proyecto de investigación Bike2lane “Mejora de la seguridad y operación de carreteras convencionales con ciclistas” con referencia (TRA 2016-8089-R) subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Este estudio también ha sido realizado gracias a la Agencia Estatal de Investigación “Ayudas para contratos predoctorales para la formación de doctores 2017” (BES-2017-080474).

Las tomas de datos en campo fueron realizadas gracias a la cooperación de la Dirección General de Tráfico y al Àrea de Carreteres de la Diputació de València.

Finalmente, los autores quieren agradecer a Aimsun SLU su colaboración en el desarrollo del estudio.

**REFERENCIAS**

AIMSUN (2020). <https://www.aimsun.com/aimsun-next/new-features/>

BIANCHI PICCININI, G.B.; MORETTO, C.; ZHOU, H. Y ITOH, M. (2018). Influence of oncoming traffic on drivers' overtaking of cyclists. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, 59, pp. 378–388

DIPUTACIÓ DE VALÈNCIA (2020). Área de Carreteras. Servicio de Seguridad Vial y Supervisión. Libro de Aforos. Diputación de Valencia. España.

DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO (2019). Las principales cifras de la Siniestralidad Vial. Dirección General de Tráfico. España.

FARAH, H.; BIANCHI PICCININI, G.; ITOH, M. y DOZZA, M. (2019). Modelling overtaking strategy and lateral distance in car-to-cyclist overtaking on rural roads: A driving simulator experiment. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, 63, pp. 226–239

FEIZI A.; MASTALI M.; VAN HOUTEN R.; KWIGIZILE V. Y OH J. (2021). Effects of bicycle passing distance law on drivers' behavior. *Transportation Research Part A*, 145, pp. 1–16.

GARCÍA, A.; LLORCA, C. y SERRA, J. (2019). Influence of peloton configuration on the interaction between sport cyclists and motor vehicles on two-lane rural roads. *Journal of Transportation Safety & Security* 12(8). pp. 1-15.

LLORCA, C.; ANGEL-DOMENECH, A.; AGUSTIN-GOMEZ, F. Y GARCÍA, A. (2017). Motor vehicles overtaking cyclists on two-lane rural roads: Analysis on speed and lateral clearance. *Safety Science*, 92, pp. 302–310.

LLORCA, C.; MORENO, A.T.; LENORZER, A.; CASAS, J. y GARCÍA, A. (2015). Development of a new microscopic passing maneuver model for two-lane rural roads. *Transp. Res. Part C: Emerg. Technol.* 52, pp. 157–172.

LÓPEZ, G.; MARTÍNEZ, I.; CAMACHO-TORREGROSA, F.J.; GARCÍA, A. (2019). Analysis of cyclist perception and behavior on two-lane rural roads through an online survey. 97th Annual Meeting of the Transportation Research Board 12–16 January 2019. Washington, DC, USA.

LÓPEZ, G.; PÉREZ-ZURIAGA, A.M.; MOLL, S. Y GARCÍA, A. (2020). Analysis of Overtaking Maneuvers to Cycling Groups on Two-Lane Rural Roads using Objective and Subjective Risk. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, 2674, pp. 148–160.

MINISTERIO DE CULTURA Y DEPORTE (2020). Anuario de estadísticas deportivas 2020. Ministerio de Cultura y Deporte. España.

MINISTERIO DE FOMENTO (2019). Anuario estadístico de carreteras 2018. Ministerio de Fomento. España.

MINISTERIO DEL INTERIOR (2003). Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Circulación.

MOLL, S.; LÓPEZ, G. Y GARCÍA, A. (2021). Analysis of the Influence of Sport Cyclists on Narrow Two-Lane Rural Roads Using Instrumented Bicycles and Microsimulation. *Sustainability* 13, no. 3: 1235.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2016). Highway Capacity Manual.

UNIVERSIDAD DE VALENCIA (2016). Estudio: Análisis de la siniestralidad en ciclistas. (2008-2013). Universidad de Valencia. España