



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS**

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

**ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN ENTRE VEHÍCULOS
MOTORIZADOS Y CICLISTAS MEDIANTE MICROSIMULACIÓN.
PROPUESTAS DE MEJORAS DE LA CV-50 DEL PK 76+550 AL
PK 83+500 (Valencia).**

Máster Universitario en Transporte, Territorio y Urbanismo

Autor: Reyes Latorre, Katherine Elizabeth

Tutora: Prof. López Maldonado, Griselda

Cotutor: Prof. Camacho Torregrosa, Francisco Javier

Curso:2018/2019

Valencia, junio de 2019





Resumen

En los últimos años la presencia de ciclistas en las carreteras convencionales de España ha aumentado debido principalmente a actividades relacionadas con el ocio y el deporte. Este hecho supone un problema vial que causó en el año 2017 más de 8000 accidentes de tráfico con presencia de bicicletas, de los cuales 78 fueron accidentes fatales y el 63% fue en vías interurbanas. Esta fatalidad se debe a la ausencia de elementos de protección y la diferencia de velocidad relativa entre estos dos modos.

Por tanto, el uso conjunto de la carretera por estos usuarios puede traducirse en una posible reducción de la funcionalidad del tráfico generada por la diferencia de velocidades de estos usuarios. Los pocos estudios relativos al ciclismo de carretera ponen de manifiesto la necesidad de investigación en este ámbito.

El principal objetivo de esta investigación es estudiar el impacto en la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales debido a la presencia ciclista mediante microsimulación.

Para ello, se llevarán a cabo diferentes observaciones naturalísticas (sin intervención apreciable de los investigadores) y semi-naturalísticas (fijando algunos parámetros previamente) para obtener datos reales de las interacciones entre vehículos a motor y ciclistas. Se desarrollará un modelo de simulación microscópica del tráfico que incluya a las bicicletas y su interacción con los vehículos a motor. Este modelo se alimentará de las observaciones anteriores, tanto del comportamiento de la bicicleta, como del comportamiento del vehículo que circula en sus proximidades y de sus interacciones.

Este modelo será calibrado y validado para la CV-50 desde el PK 76+550 al PK 83+500. El modelo calibrado permitirá replicar la realidad de una forma fiable, permitiendo analizar la funcionalidad de las carreteras considerando las medidas de desempeño propuestas por el HCM (2016) y complementándolas con las diferentes características que entrega el modelo.

Se comenzará realizando dos escenarios, uno con presencia de tráfico a motor y ciclistas y uno solo con vehículos a motor bajo diferentes combinaciones de demanda vehicular. Estos dos escenarios se crearán para estimar el impacto de la presencia de ciclistas en carreteras convencionales y comparar los tiempos de viaje, porcentaje de vehículos en cola, velocidades, emisiones de CO², número de adelantamientos, entre otros. En estos resultados se observó que la presencia de ciclistas sí afecta en la funcionalidad de la carretera considerando necesaria la creación de una propuesta para disminuir este impacto.

La propuesta se trata de un apartadero que permite que en ciertos puntos de la carretera se realicen adelantamientos a ciclistas sin invasión del carril opuesto y sin provocar una disminución en las velocidades de estos dos modos. Esta solución generó notables mejoras en la funcionalidad del tramo de estudio.

Palabras Claves: Microsimulación, ciclista, funcionalidad, carreteras convencionales, apartaderos.



Resum

En els últims anys la presència de ciclistes a les carreteres convencionals d'Espanya ha augmentat degut principalment a activitats relacionades amb l'oci i l'esport. Aquest fet suposa un problema viari que va causar a l'any 2017 més de 8000 accidents de trànsit amb presència de bicicletes, dels quals 78 van ser accidents fatals i el 63% va ser en vies interurbanes. Aquesta fatalitat es deu a l'absència d'elements de protecció i a la diferència de velocitat relativa entre aquests dos modes.

Per tant, l'ús conjunt de la carretera per aquests usuaris pot traduir-se en una possible reducció de la funcionalitat del trànsit generada per la diferència de velocitats d'aquests usuaris. Els pocs estudis relatius al ciclisme de carretera posen de manifest la necessitat de recerca en aquest àmbit.

El principal objectiu d'aquesta investigació és estudiar l'impacte en la funcionalitat del trànsit en carreteres convencionals a causa de la presència ciclista mitjançant microsimulació.

Per a això, es duran a terme diferents observacions naturalístiques (sense intervenció apreciable dels investigadors) i semi-naturalístiques (fixant alguns paràmetres prèviament) per obtenir dades reals de les interaccions entre vehicles de motor i ciclistes. Es desenvoluparà un model de simulació microscòpica del trànsit que incloga les bicicletes i la seva interacció amb els vehicles a motor. Aquest model s'alimentarà de les observacions anteriors, tant del comportament de la bicicleta, com del comportament del vehicle que circula en les seves proximitats i de les seves interaccions.

Aquest model serà calibrat i validat per a la CV-50 des del PK 76 + 550 al PK 83 + 500. El model calibrat permetrà replicar la realitat d'una manera fiable, permetent analitzar la funcionalitat de les carreteres considerant les mesures d'acompliment proposades pel HCM (2016) i complementant-les amb les diferents característiques que lliura el model.

Es començarà realitzant dos escenaris, un amb presència de trànsit a motor i ciclistes i un de sol amb vehicles a motor sota diferents combinacions de demanda vehicular. Aquests dos escenaris es crearan per estimar l'impacte de la presència de ciclistes en carreteres convencionals i comparar els temps de viatge, percentatge de vehicles en cua, velocitats, emissions de CO₂, nombre d'avançaments, entre d'altres. En aquests resultats es va observar que la presència de ciclistes sí afecta a la funcionalitat de la carretera considerant necessària la creació d'una proposta per disminuir aquest impacte.

La proposta es tracta d'un apartador que permet que en certs punts de la carretera es realitzen avançaments a ciclistes sense invasió del carril oposat i sense provocar una disminució en les velocitats d'aquests dos modes. Aquesta solució va generar notables millores en la funcionalitat del tram d'estudi.

Paraules clau: Microsimulació, ciclistes, funcionalitat, carreteres convencionals, apartador.



Abstract

In the last years the presence of cyclists on two-lane highways in Spain has increased, mainly because of activities related to leisure and sports. This fact generates a road problem that caused in 2017 more than 8000 traffic accidents with bicycles involved, of which 78 were fatal accidents and 63% were on interurban roads. This fatality is due to absence of elements protection and the relative speed difference between these two modes.

Therefore, the shared use of road by these means of transport could generate a possible reduction in the functionality of the traffic generated by the difference in speeds of these users. There are few studies related to road cycling, so is really needed keep researching in this field.

The main objective of this research is to study the impact on traffic functionality on conventional roads due to the presence of cyclists using microsimulation.

For this, different observations will be carried out. Naturalistic (without appreciable researchers' intervention) and semi-naturalistic observations (adjusting some parameters previously) to obtain real data of the interactions between motor vehicles and cyclists. A model of microscopic traffic simulation that includes bicycles and their interaction with motor vehicles has been developed. The model's data was taken from the previous observations, using both the bicycle and vehicle behavior and how they travel along the road and their interactions.

This model was calibrated and validated for the CV-50 route from PK 76+550 to PK 83+500. The calibrated model will allow replicate the reality in a reliable way and It will also allow analyze the functionality of the roads considering the performance measures proposed by the HCM (2016) and complementing them with the different characteristics that the model delivers.

the research begins with two scenarios, the first one with both motor vehicles and cyclists' traffic and the second scenario only with motor vehicles but using different combinations of vehicular demand. These two scenarios were created to estimate the impact of the presence of cyclists on conventional roads and compare travel times, percentage of vehicles in queue, speeds, CO2 emissions, number of overtaking, among others. In these results it was observed that the presence of cyclists does affect the functionality of the road considering that it is necessary to develop a proposal to reduce this impact.

The proposal considers a turnout for cyclist that allows in some specifics points on the road to overtake them without invading the opposite lane and It also avoid that decrease the speeds of these two modes. This solution generated notable improvements in the functionality of the study section.

Keywords: Microsimulation, cyclists, functionality, two-lane highways, turnout.



Índice

| | |
|--|-----------|
| Resumen | 2 |
| Resum | 3 |
| Abstract | 4 |
| 1. Antecedentes | 17 |
| 2. Introducción | 18 |
| 2.1. El ciclismo en España | 20 |
| 2.2. Siniestralidad de ciclistas | 23 |
| 2.3. Actuaciones relacionadas con el ciclismo en España | 30 |
| 2.3.1. Actuaciones relacionadas con usuarios vulnerables en las administraciones públicas. | 31 |
| 3. Marco Teórico | 35 |
| 3.1. Regulación Legal..... | 35 |
| 3.1.1. Regulación de los vehículos | 36 |
| 3.1.2. Legislación sobre el uso de casco | 37 |
| 3.1.3. Normas de tráfico para los ciclistas. | 38 |
| 3.2. Análisis de capacidad y funcionalidad de la vía. | 42 |
| 3.2.1. Análisis de capacidad en tramos de carreteras convencionales según el HCM 2016 | 43 |
| 3.2.2. Análisis de funcionalidad en tramos de carreteras convencionales según el HCM 2016 | 44 |
| 3.3. Maniobra de adelantamiento vehicular..... | 48 |
| 3.3.1. Descripción de la maniobra de adelantamiento | 48 |
| 3.3.2. Modelos de distancias de visibilidad de adelantamiento..... | 51 |
| 3.4. Estudios referenciales sobre la presencia de bicicletas en carreteras convencionales..... | 54 |
| 3.4.1. Presencia de ciclista en entornos interurbanos | 55 |
| 3.4.2. Fuerzas aerodinámicas que experimenta el ciclista | 60 |
| 3.4.3. Metodologías empleadas para la toma de datos | 60 |
| 3.5. Modelos de simulación | 62 |
| 3.5.1. Clasificación de los modelos de simulación..... | 63 |
| 3.5.2. Elección del microsimulador | 65 |
| 3.5.3. Microsimulador Aimsun..... | 66 |
| 3.5.4. Métodos para modelar el comportamiento de ciclistas | 78 |
| 3.5.5. Modelación tráfico mixto. | 84 |



| | |
|--|------------|
| 3.6. Recomendaciones para el diseño de carreteras convencionales con presencia de ciclista | 85 |
| 3.6.1. Tipología de accidentes con ciclistas en vías interurbanas | 85 |
| 3.6.2. Recomendaciones para el diseño y explotación de carreteras convencionales | 86 |
| 4. Objetivos e hipótesis | 90 |
| 4.1. Objetivos | 90 |
| 4.2. Hipótesis..... | 91 |
| 5. Metodología | 92 |
| 5.1. Elección de zona de estudio..... | 94 |
| 5.2. Observaciones de campo..... | 95 |
| 5.2.1. Estudio Naturalístico..... | 96 |
| 5.2.2. Estudio Semi-naturalístico..... | 97 |
| 5.2.3. Información bruta obtenida..... | 99 |
| 5.2.4. Preprocesamiento de la base de datos | 103 |
| 5.2.5. Generación de la base de datos | 105 |
| 5.3. Diseño del tramo de estudio en Aimsun..... | 110 |
| 5.3.1. Características geométricas y operacionales | 110 |
| 5.3.2. Pre-modelo de microsimulación..... | 119 |
| 5.4. Calibración del modelo de microsimulación | 122 |
| 5.4.1. Modelo de adelantamientos en carreteras convencionales | 124 |
| 5.4.2. Metodología de calibración etapa I | 125 |
| 5.4.3. Metodología de calibración etapa II | 126 |
| 5.5. Validación del modelo de microsimulación..... | 137 |
| 5.6. Escenarios modelados | 138 |
| 5.6.1. Escenario Base..... | 138 |
| 5.6.2. Escenarios Base sin bicicletas..... | 142 |
| 5.6.3. Consideraciones generales de los escenarios..... | 142 |
| 5.6.4. Variables a analizar | 143 |
| 6. Análisis de resultados | 145 |
| 6.1. Calibración del modelo de microsimulación | 145 |
| 6.1.1. Calibración etapa I..... | 145 |
| 6.1.2. Calibración etapa II..... | 148 |
| 6.2. Validación del modelo de microsimulación..... | 165 |
| 6.2.1. Validación configuración individual | 166 |
| 6.2.2. Validación configuración dos en paralelo..... | 166 |



| | |
|--|------------|
| 6.2.3. Validación configuración dos en línea | 167 |
| 6.2.4. Validación configuración 1+2 | 168 |
| 6.2.5. Validación configuración 2+1 | 169 |
| 6.2.6. Validación configuración cuatro en paralelo | 170 |
| 6.2.7. Validación configuración cuatro en línea | 171 |
| 6.2.8. Validación configuración diez en línea..... | 172 |
| 6.2.9. Validación configuración diez en paralelo..... | 173 |
| 6.3. Escenarios modelados | 175 |
| 6.3.1. Escenario base con presencia ciclista | 175 |
| 6.4. Escenario base sin presencia de ciclistas | 181 |
| 6.5. Medidas de desempeño | 184 |
| 6.6. Conclusiones del análisis de los resultados | 187 |
| 6.6.1. Resultados de la calibración del modelo..... | 187 |
| 6.6.2. Resultados de la validación del modelo..... | 190 |
| 6.6.3. Conclusiones de los escenarios modelados | 191 |
| 7. Aplicación práctica | 194 |
| 7.1. Ubicación de apartaderos | 197 |
| 7.2. Demanda del escenario base..... | 200 |
| 7.3. Análisis de la propuesta | 201 |
| 8. Discusión y análisis aplicación práctica..... | 202 |
| 9. Conclusiones..... | 208 |
| 10. Recomendaciones | 212 |
| 11. Futuras líneas de investigación..... | 213 |
| 12. Agradecimientos | 214 |
| 13. Dedicatoria | 214 |
| 14. Referencias..... | 215 |
| 15. Anejos | 223 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 1 Personas que practicaron deporte semanalmente según modalidades más frecuentes (Ministerio de Educación Cultura y Deporte, 2018). | 20 |
| Fig. 2 Crecimiento histórico de las licencias federativas de ciclismo en España(Consejo Superior de Deporte, 2016, 2017)..... | 22 |
| Fig. 3 Accidentes con víctimas con implicación de ciclista respecto al total de accidentes con víctimas con ciclista implicados de la Red (Corb, 2017)..... | 26 |
| Fig. 4 Evolución de las Víctimas ciclistas (Corb, 2017). | 27 |
| Fig. 5 Estacionalidad mensual (izquierda) y semanal (derecha) (Corb, 2017). | 27 |
| Fig. 6 Distribución accidentabilidad según número ciclistas circulando (Corb, 2017). | 28 |
| Fig. 7 Tipos de ciclo rutas (Picazo & Jover, 2001). | 32 |
| Fig. 8 Mejoras desde 1995 de la Diputación de Valencia (Corb, 2017)..... | 33 |
| Fig. 9 Señalización de puerto de montaña de la Diputación de Valencia (Corb, 2017). | 33 |
| Fig. 10 Rutas Ciclistas Comunidad Valenciana (Dirección General de Tráfico, 2017a). | 33 |
| Fig. 11 Cartelería específica de limitación de velocidad (Corb, 2017)..... | 34 |
| Fig. 12 Accesorios obligatorios y recomendados para la circulación de bicicletas (Dirección General de Tráfico, 2015)..... | 37 |
| Fig. 13 Normativa sobre uso de Casco en países de la UE (European Cyclists' Federation, 2018). | 37 |
| Fig. 14 Edad mínima para montar bicicleta por vías públicas (European Cyclists' Federation, 2018). | 39 |
| Fig. 15 Tipos de Carreteras Convencionales según HCM (Camacho, Esparza, & Soriano, 2017)..... | 44 |
| Fig. 16 Representación Niveles de Servicios HCM. | 45 |
| Fig. 17 Relación nivel de servicio con la velocidad, capacidad e intensidad(Camacho et al., 2017). | 45 |
| Fig. 18 Procedimiento para la determinación del nivel de servicio por tipo de carretera (Camacho et al., 2017). | 46 |
| Fig. 19 Criterios para la determinación del nivel de servicio (HCM, 2016). | 47 |
| Fig. 20 Esquema de la maniobra de adelantamiento y vehículos implicados (Llorca, 2015). | 49 |
| Fig. 21 Distancia de visibilidad de adelantamiento..... | 50 |
| Fig. 22 Esquema de la maniobra y definición de variables en los modelos de (Glennon, 1988), (Harwood & Glennon, 1989) y (Hassan, Easa, & Abd El Halim, 1996). | 52 |
| Fig. 23 Concepto de posición crítica (Llorca, 2015). | 52 |
| Fig. 24 Esquema de la maniobra y definición de variables en el modelo de la AASHTO (AASHTO, 2004)..... | 53 |
| Fig. 25 Disposición de separadores y chaleco reflectante (Watts, 1979). | 55 |
| Fig. 26 Bicicleta Instrumental utilizada (Chapman & Noyce, 2012). | 56 |
| Fig. 27 Bicicletas instrumentadas utilizadas (Dozza & Werneke, 2014). | 57 |
| Fig. 28 Bicicletas instrumentadas utilizadas (Dozza, Schindler, Bianchi-Piccinini, & Karlsson, 2016). | 57 |



| | |
|---|-----|
| Fig. 29 Microsimulador seleccionado. | 65 |
| Fig. 30 Velocidad máxima que un vehículo (n) puede acelerar (Transport Simulation Systems, 2014). | 67 |
| Fig. 31 Velocidad máxima que un vehículo (n) con limitación de vehículos antecesor (Transport Simulation Systems, 2014). | 67 |
| Fig. 32 Velocidad definitiva del vehículo n durante el intervalo (t, t+T) (Transport Simulation Systems, 2014). | 67 |
| Fig. 33 Límite de velocidad (Transport Simulation Systems, 2014). | 68 |
| Fig. 34 Velocidad máxima deseada por vehículo n (Transport Simulation Systems, 2014). | 68 |
| Fig. 35 Aceleración del vehículo (Transport Simulation Systems, 2014). | 69 |
| Fig. 36 Zona de cambio de pista (Transport Simulation Systems, 2014). | 70 |
| Fig. 37 Distancia del modelo de cambio de pista (Transport Simulation Systems, 2014). | 70 |
| Fig. 38 Zonas en el modelo de cambio de pistas para acceso (Transport Simulation Systems, 2014). | 71 |
| Fig. 39 Zonas en el modelo de cambio de pistas para salidas (Transport Simulation Systems, 2014). | 71 |
| Fig. 40 Modelo gráfico del movimiento lateral (Falkenberg et al., 2003). | 80 |
| Fig. 41 Comparación de las consideraciones en Vissim y realidad (Quispe Chayña, 2016). | 80 |
| Fig. 42 Diagrama de fuerzas de reacción y percepción (Liang, Ph, Xie, Ph, & Jia, 2018). | 82 |
| Fig. 43 Tipología accidentes con ciclistas en vías interurbanas (Carrera Hueso, 2014). | 86 |
| Fig. 44 Relación entre ancho de semiplataforma y máximo % de vehículos pesados para $F_{85} < 13,2$ N (Ferrer Pérez, 2017). | 86 |
| Fig. 45 Niveles de riesgo en función de la F_{85} (Ferrer Pérez, 2017). | 88 |
| Fig. 46 Accidentes previsibles para un periodo de 10 años en base al rango de exposición (Ferrer Pérez, 2017). | 88 |
| Fig. 47 Recomendaciones de diseño de arcones bici (Carrera Hueso, 2014). | 89 |
| Fig. 48 Descripción del flujo de trabajo de la investigación. | 93 |
| Fig. 49 Ubicación de segmentos de carreteras seleccionados para analizar (López & Moll, 2018). | 94 |
| Fig. 50 Ubicación Tramo Cheste – Villamarxant. | 95 |
| Fig. 51 Tipos de observaciones realizadas (López & Moll, 2018). | 96 |
| Fig. 52 Ubicación de la observación y materiales utilizados (Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), 2019). | 97 |
| Fig. 53 Bicicletas instrumentadas (Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), 2019). | 97 |
| Fig. 54 Configuraciones de pelotón de cuatro ciclistas (Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), 2019). | 98 |
| Fig. 55 Configuraciones de pelotón de diez ciclistas (Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), 2019). | 99 |
| Fig. 56 Pelotón de 4 ciclistas circulando en 4F (Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), 2019). | 99 |
| Fig. 57 Proceso de obtención de datos del estudio naturalístico. | 100 |



| | |
|---|-----|
| Fig. 58 Procesamiento estudio semi-naturalístico. | 101 |
| Fig. 59 Tiempos observados para las diferentes fases del adelantamiento (Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), 2019). | 103 |
| Fig. 60 Preprocesamiento observaciones naturalístico. | 103 |
| Fig. 61 Primera validación de la base de datos. | 104 |
| Fig. 62 Segunda validación de la base de datos. | 104 |
| Fig. 63 Tercera validación de datos según características del adelantamiento.... | 105 |
| Fig. 64 Configuraciones de ciclistas observadas. | 107 |
| Fig. 65 Base de datos obtenida producto el procesamiento de las bicicletas instrumentadas. | 110 |
| Fig. 66 Ortografía área del tramo de estudio (“Centro de Descargas del CNIG (IGN)”, 2019). | 111 |
| Fig. 67 Características de la sección transversal del tramo de estudio. | 111 |
| Fig. 68 Elevaciones tramo de estudio utilizando programa ArcGIS (Balseca, 2019). | 112 |
| Fig. 69 Perfil de elevaciones tramo de estudio. | 113 |
| Fig. 70 Recomendaciones de Limitaciones de velocidad tramo de estudio sentido Norte - Sur. | 114 |
| Fig. 71 Demarcación horizontal tramo de estudio. | 115 |
| Fig. 72 Perfil de visibilidad sentido PK 76+550 a PK 83+500. | 116 |
| Fig. 73 Perfil de visibilidad sentido PK 83+500 a PK 76+550. | 116 |
| Fig. 74 Perfil de visibilidad y demarcación horizontal por sentido. | 117 |
| Fig. 75 Creación del modelo de microsimulación. | 119 |
| Fig. 76 Introducción del trazado en planta. | 120 |
| Fig. 77 Ingreso de características generales del tramo de estudio. | 120 |
| Fig. 78 Pendientes longitudinales del tramo de estudio. | 121 |
| Fig. 79 Creación de carreteras de un carril por sentido mediante sección espejo. | 121 |
| Fig. 80 Modelo de microsimulación de la CV-50 entre el PK 76+550 a PK 83+500. | 122 |
| Fig. 81 Metodología de calibración microsimulador Aimsun. | 123 |
| Fig. 82 Modelo de adelantamiento en carreteras convencionales. | 124 |
| Fig. 83 Parámetros microsimulador (Carlos Llorca, 2015). | 126 |
| Fig. 84 Parámetro estadísticos para comparar valores observados y simulados (Imad, Tarek, Nasser, & Eyad, 2009). | 127 |
| Fig. 85 Formula estimación del tamaño muestral de una muestra conocida. | 127 |
| Fig. 86 Obtención de tiempos de inicio y fin de adelantamiento. | 130 |
| Fig. 87 Representación de un pelotón de 10 ciclista circulando en línea (azul), vehículo a motor (rojo). | 133 |
| Fig. 88 Porcentaje de adelantamientos que invaden el carril contrario durante la maniobra de adelantamiento. | 133 |
| Fig. 89 Creación de las configuraciones ciclistas con datos de partida. | 135 |
| Fig. 90 Resultados obtenidos durante la calibración de los pelotones ciclistas. | 135 |
| Fig. 91 Obtención de las velocidades de adelantamiento mediante microsimulación. | 136 |
| Fig. 92 Demanda vehicular ingresada en AIMSUN. | 139 |
| Fig. 93 Ingreso de pelotones ciclistas en el escenario base. | 140 |



| | |
|---|-----|
| Fig. 94 Frecuencia de paso de ciclistas individuales | 140 |
| Fig. 95 Demanda de ciclistas ingresada en AIMSUN | 141 |
| Fig. 96 Escenario base creado con las demandas ingresadas | 141 |
| Fig. 97 Ubicación de detectores en el tramo de estudio..... | 144 |
| Fig. 98 Parámetros considerados en el microsimulador para los vehículos ligeros. | 147 |
| Fig. 99 Parámetros utilizados para aplicar el modelo de adelantamiento desarrollado por Llorca. | 148 |
| Fig. 100 Diagrama de intensidad – velocidad y de intensidad-densidad variando la demanda de vehículos. | 180 |
| Fig. 101 Número de adelantamientos por cada vehículo variando demanda de vehículos. | 180 |
| Fig. 102 niveles de servicio y porcentaje en cola variando la demanda de vehículos. | 181 |
| Fig. 103 niveles de servicio y porcentaje en cola variando la demanda de vehículos considerando o no la presencia de ciclistas. | 183 |
| Fig. 104 Estimación de ATS para diferentes metodologías sin presencia de ciclistas. | 185 |
| Fig. 105 Estimación de ATS para diferentes metodologías con presencia de ciclistas. | 185 |
| Fig. 106 Estimación de porcentaje de tiempo en cola para diferentes metodologías con presencia de ciclistas..... | 186 |
| Fig. 107 Longitudes calibradas para las diferencias configuraciones ciclistas | 189 |
| Fig. 108 Velocidades medias calibradas para las diferencias configuraciones ciclistas | 189 |
| Fig. 109 niveles de servicio y porcentaje en cola variando la demanda de vehículos considerando o no la presencia de ciclistas. | 191 |
| Fig. 110 Diagrama de intensidad – velocidad variando de intensidad y la presencia de ciclista..... | 192 |
| Fig. 111 Diagrama de intensidad – densidad variando de intensidad y la presencia de ciclista..... | 192 |
| Fig. 112 Número de adelantamientos por vehículos variando de intensidad y la presencia de ciclista. | 193 |
| Fig. 113 Señalización recomendada para apartadero ciclista | 196 |
| Fig. 114 Diseño geométrico de los apartaderos ciclistas (Ministerio de Fomento, 2016a) | 197 |
| Fig. 115 Comparación del porcentaje de tiempo en cola..... | 197 |
| Fig. 116 Comparación de velocidad media de circulación entre detectores consecutivos..... | 198 |
| Fig. 117 Comparación del porcentaje de vehículos en cola entre detectores consecutivos..... | 198 |
| Fig. 118 Sección transversal disponible para la creación del apartadero I (Google earth)..... | 199 |
| Fig. 119 Sección transversal disponible para la creación del apartadero II (Google earth)..... | 199 |
| Fig. 120 Creación de los apartaderos en el microsimulador..... | 201 |
| Fig. 121 Escenario base y con propuesta en el microsimulador. | 201 |



| | | |
|----------|--|-----|
| Fig. 122 | Modificación del recorrido de los pelotones por el tramo de estudio | 202 |
| Fig. 123 | Modelación del escenario base y con propuesta..... | 203 |
| Fig. 124 | Velocidad puntal del tramo en diferentes puntos kilómetros y escenarios | 205 |
| Fig. 125 | Porcentaje de vehículos en cola en diferentes puntos kilómetros y escenarios | 205 |
| Fig. 126 | Densidad (veh/km) en diferentes puntos kilómetros y escenarios..... | 206 |
| Fig. 127 | Variación de la velocidad media de circulación variando la intensidad de tráfico en diferente escenarios | 206 |
| Fig. 128 | Variación del número de adelantamientos variando la intensidad de tráfico en diferente escenarios. | 207 |
| Fig. 129 | Variación porcentaje de vehículos en cola variando la intensidad de tráfico en diferente escenarios. | 207 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1 Evolución de los fallecidos por tipo de vehículo en España,2008-2017 (Dirección General de Tráfico, 2017b)..... | 24 |
| Tabla 2 Accidentes de Tráfico con víctimas con bicicletas implicadas en España 2017 (Dirección General de Tráfico, 2017b)..... | 24 |
| Tabla 3 Fallecidos y heridos según sexo en bicicletas en España 2017 (Dirección General de Tráfico, 2017b)..... | 25 |
| Tabla 4 Fallecidos y heridos según grupo de edad en bicicletas en España 2017 (Dirección General de Tráfico, 2017b)..... | 25 |
| Tabla 5 Evolución de fallecidos en bicicletas en vías urbanas e interurbanas en España 2017 (Dirección General de Tráfico, 2017b). | 26 |
| Tabla 6 Evolución de heridos hospitalizados en bicicletas en vías urbanas e interurbanas. España 2017 (Dirección General de Tráfico, 2017b)..... | 26 |
| Tabla 7 Longitud (km) de la red de vías interurbanas distribuidas por titularidad y tipo de vía (Dirección General de Tráfico, 2017b)..... | 29 |
| Tabla 8 Longitud de Red de la Comunidad Valencia. | 31 |
| Tabla 9 Nivel de servicio de una nueva carretera convencional (Ministerio de Fomento, 2016a). | 43 |
| Tabla 10 Tipos de carreteras según HCM 2016 (HCM, 2016). | 44 |
| Tabla 11 Nivel de servicio para bicicletas en carreteras convencionales. (HCM, 2016)..... | 47 |
| Tabla 12 Modelos de Microsimulación (Lind et al., 1999)..... | 65 |
| Tabla 13 Parámetros evaluados por Aimsun (Transport Simulation Systems, 2014). | 78 |
| Tabla 14 Características de tramos de estudio Bike2lane (López & Moll, 2018)..... | 94 |
| Tabla 15 Días y horas de mediciones puntuales en el tramo de estudio..... | 100 |
| Tabla 16 Días y horas de mediciones de observaciones semi-naturalístico. | 101 |
| Tabla 17 Horas totales de mediciones de observaciones semi-naturalístico. | 102 |
| Tabla 18 Aforos ciclistas realizados en el tramo de estudio. | 105 |
| Tabla 19 Aforos vehicular realizados en el tramo de estudio. | 106 |
| Tabla 20 Intensidad del cuarto de hora más cargado..... | 106 |
| Tabla 21 Intensidad horaria punta de ciclistas y vehículos a motor. | 107 |
| Tabla 22 Configuraciones de los pelotones ciclistas observadas..... | 108 |
| Tabla 23 Configuraciones más semejantes a las observadas en campo. | 108 |
| Tabla 24 Configuraciones equivalentes para los cuartos de hora más cargados.. | 109 |
| Tabla 25 Maniobras de adelantamientos realizadas en el tramo de estudio. | 109 |
| Tabla 26 Sección transversal del tramo de estudio..... | 112 |
| Tabla 27 Elevaciones de los subtramos de estudio. | 113 |
| Tabla 28 Limitaciones de velocidad del tramo de estudio por sentido de circulación. | 114 |
| Tabla 29 Demarcación horizontal tramo de estudio. | 115 |
| Tabla 30 Distancias de visibilidad mínimas para aplicación de demarcación longitudinal (Ministerio de Fomento, 2016a)..... | 118 |
| Tabla 31 Propuesta de marcas viales sentido Villamarxant – Cheste..... | 118 |
| Tabla 32 Propuesta de marcas viales sentido Cheste - Villamarxant..... | 118 |
| Tabla 33 Configuraciones de pelotón observadas. | 128 |



| | |
|--|-----|
| Tabla 34 Tiempo de viaje de las diferentes configuraciones según sentido..... | 129 |
| Tabla 35 Velocidades de los ciclistas según la configuración del pelotón..... | 130 |
| Tabla 36 Tiempos de adelantamientos por tipo de configuración. | 131 |
| Tabla 37 Fundamentos para estimar la longitud del pelotón. | 131 |
| Tabla 38 Longitud dinámicas de los pelotones..... | 132 |
| Tabla 39 Características operacionales de los pelotones a calibrar..... | 134 |
| Tabla 40 Demanda de vehículos a motor según día de modelación. | 134 |
| Tabla 41 Demanda del escenario base de simulación. | 139 |
| Tabla 42 configuraciones de los ciclistas a modelar en el escenario base..... | 139 |
| Tabla 43 Variaciones de la demanda vehicular..... | 142 |
| Tabla 44 Valores por defecto de la aceleración máxima. | 145 |
| Tabla 45 Valores por defecto de la velocidad máxima (Carlos Llorca, 2015)..... | 146 |
| Tabla 46 Factor de aceptación de la velocidad por tipo de vehículo (Carlos Llorca, 2015). | 146 |
| Tabla 47 Margen de seguridad para el adelantamiento (Monteroso, 2015). | 146 |
| Tabla 48 Calibración del tiempo de viaje del ciclista individual. | 149 |
| Tabla 49 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de viaje ciclista individual..... | 149 |
| Tabla 50 Calibración del tiempo de viaje del ciclista dos en paralelo (2F) | 150 |
| Tabla 51 Prueba de Kruskal-Wallis de calibración dos en paralelo..... | 150 |
| Tabla 52 Calibración del tiempo de viaje y adelantamiento de la configuración 1+2 | 151 |
| Tabla 53 Resultado del ajuste del tiempo de adelantamiento de la configuración 1+2 | 152 |
| Tabla 54 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de viaje de la configuración 1 +2 | 152 |
| Tabla 55 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de adelantamiento configuración 1 +2 | 153 |
| Tabla 56 Calibración del tiempo de viaje y adelantamiento de la configuración 2+1 | 153 |
| Tabla 57 Resultado del ajuste del tiempo de adelantamiento de la configuración 2+1 | 154 |
| Tabla 58 Prueba de Kruskal-Wallis de calibración del tiempo de viaje de la configuración 2+1 | 154 |
| Tabla 59 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de adelantamiento configuración 2+1 | 155 |
| Tabla 60 Calibración del tiempo de viaje y adelantamiento de la configuración 2L | 155 |
| Tabla 61 Resultado del ajuste del tiempo de adelantamiento de la configuración 2L | 156 |
| Tabla 62 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de viaje de la configuración 2L | 157 |
| Tabla 63 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de adelantamiento configuración 2L | 157 |
| Tabla 64 Calibración del tiempo de viaje y adelantamiento de la configuración 4L | 158 |
| Tabla 65 Resultado del ajuste del tiempo de adelantamiento de la configuración 4L | 158 |



| | |
|--|-----|
| Tabla 66 Prueba de Kruskal-Wallis de calibración del tiempo de viaje de la configuración 4L | 159 |
| Tabla 67 Calibración del tiempo de viaje y adelantamiento de la configuración 4F | 159 |
| Tabla 68 Resultado del ajuste del tiempo de adelantamiento de la configuración 4F | 160 |
| Tabla 69 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de viaje de la configuración 4F | 160 |
| Tabla 70 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de adelantamiento configuración 4F | 161 |
| Tabla 71 Calibración del tiempo de viaje y adelantamiento de la configuración 10F | 161 |
| Tabla 72 Resultado del ajuste del tiempo de adelantamiento de la configuración 10F | 162 |
| Tabla 73 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de viaje de la configuración 10F | 163 |
| Tabla 74 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de adelantamiento configuración 10F | 163 |
| Tabla 75 Calibración del tiempo de viaje y adelantamiento de la configuración 10L | 164 |
| Tabla 76 Resultado del ajuste del tiempo de adelantamiento de la configuración 10L | 164 |
| Tabla 77 Prueba de Kruskal-Wallis de calibración del tiempo de viaje de la configuración 10L | 165 |
| Tabla 78 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de adelantamiento configuración 10L | 165 |
| Tabla 79 Validación tiempo de viaje de ciclista individual | 166 |
| Tabla 80 Validación tiempo de viaje de ciclista dos en paralelo | 167 |
| Tabla 81 Validación tiempo de viaje de pelotón 2L | 167 |
| Tabla 82 Validación del tiempo de adelantamiento del configuración 2L | 168 |
| Tabla 83 Validación tiempo de viaje de pelotón 1+2 | 168 |
| Tabla 84 Validación del tiempo de adelantamiento del configuración 1+2 | 169 |
| Tabla 85 Validación tiempo de viaje de pelotón 2+1 | 170 |
| Tabla 86 Validación del tiempo de adelantamiento del configuración 2+1 | 170 |
| Tabla 87 Validación tiempo de viaje de pelotón 4F | 171 |
| Tabla 88 Validación del tiempo de adelantamiento del configuración 4F | 171 |
| Tabla 89 Validación tiempo de viaje de pelotón 4L | 172 |
| Tabla 90 Validación del tiempo de adelantamiento del configuración 4L | 172 |
| Tabla 91 Validación tiempo de viaje de pelotón 10L | 173 |
| Tabla 92 Validación del tiempo de adelantamiento del configuración 4L | 173 |
| Tabla 93 Validación tiempo de viaje de pelotón 10F | 174 |
| Tabla 94 Validación del tiempo de adelantamiento del configuración 4F | 174 |
| Tabla 95 Resultados globales del E1-0: Escenario base con presencia de bicicletas. | 175 |
| Tabla 96 Velocidades puntuales medias según detector para el escenario E1-0. | 176 |
| Tabla 97. Vehículos en cola y libre en los diferentes detectores para el escenario E1-0. | 176 |



| | |
|--|-----|
| Tabla 98 Porcentaje total de los vehículos en cola..... | 177 |
| Tabla 99. Niveles de servicio del HCM 2010..... | 177 |
| Tabla 100. Niveles de servicio del escenario base E1-0. | 177 |
| Tabla 101. Resultados globales del escenario base con ciclistas variando la demanda de vehículos. | 178 |
| Tabla 102. Resultados de los detectores para el escenario base con presencia de ciclista variando la demanda de vehículo a motor. | 179 |
| Tabla 103 Resultados globales del escenario base (E2) sin ciclistas variando la demanda de vehículos. | 181 |
| Tabla 104 Resultados de los detectores para variando la demanda de vehículos para el escenario (E2) sin presencia de ciclistas..... | 182 |
| Tabla 105 Parámetros calibrados según configuración ciclista. | 187 |
| Tabla 106 resultados estadísticos del tiempo de viaje de las diferentes configuraciones. | 188 |
| Tabla 107 resultados estadísticos del tiempo de adelantamiento de las diferentes configuraciones. | 188 |
| Tabla 108 resultados del tiempo de viaje validado según configuración..... | 190 |
| Tabla 109 resultados del tiempo de adelantamiento validado según configuración..... | 191 |
| Tabla 110 Longitudes de apartaderos recomendadas (Harwood & Hoban (1987), Harwood & St. John (1985))..... | 196 |
| Tabla 111 Variación del largo del apartadero..... | 200 |
| Tabla 112 Hora más cargada a modelar..... | 200 |
| Tabla 113 Resultados globales de la aplicación de la propuesta..... | 203 |
| Tabla 114 Resultados de los detectores en el escenario base E1-2 y con propuesta E3-2..... | 204 |



1. Antecedentes

El presente trabajo de fin de máster presentado por la alumna Katherinne Reyes Latorre “Estudio de la interacción entre vehículos motorizados y ciclistas mediante microsimulación. Propuestas de mejoras de la CV-50 de PK 76 + 550 al PK 83 + 500, Valencia”. Para la obtener el título de Máster Universitario en Transporte, Territorio y Urbanismo”.

Este proyecto estará dirigido por la profesora Griselda López Maldonado, Profesora Ayudante Doctor del Departamento de Ingeniería e Infraestructuras de los Transporte de la Universidad Politécnica de Valencia como tutora, y Francisco Javier Camacho Torregrosa Profesor Contratado Doctor del Departamento de Ingeniería e Infraestructuras de los Transporte de la Universidad Politécnica de Valencia como cotutor.

Este trabajo final de Máster (TFM) es el resultado de la colaboración del autor del proyecto Bike2lane - Mejora de la Seguridad y Operación de Carretera Convencionales con Ciclistas, con referencia TRA2016-80897-R, en su objetivo específico del “Análisis del comportamiento de los ciclistas y de los conductores de vehículos motorizados bajo la presencia de los primeros, así como la interacción entre ellos en carreteras convencionales con diferentes configuraciones” y tarea T4.1 “Análisis conflictos bicicleta-vehículo”. Este proyecto se está llevando a cabo gracias a la financiación obtenida en la convocatoria 2016 del Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016, del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.

Este trabajo ha sido realizado en colaboración directa con el Grupo de Investigación de Ingeniería de Carreteras (GIIC), perteneciente al Instituto del Transporte y Territorio.



2. Introducción

En los últimos años la presencia de ciclista en las carreteras convencionales de España ha aumentado debido principalmente a actividades relacionadas con el ocio y el deporte donde el recorrido en bicicleta probablemente sea un objetivo en sí mismo. El aumento del número de ciclistas se puede verificar con el número de licencias federativas de ciclismo de los últimos años del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

Por otro lado, el parque automovilístico ha crecido en más de un millón de unidades en el último decenio, contando todas las categorías. En 2017 se observa un incremento de 780.423 unidades en el total del parque vehicular respecto al año anterior. El mayor aumento se produce en los turismos en términos porcentuales en un 3% (Dirección General de Tráfico, 2017b). Este crecimiento se traduce en un incremento de viajes por las carreteras generando diferentes externalidades negativas asociadas al transporte (congestión vehicular, contaminación atmosférica, mayores tiempos de viajes y mayores probabilidades de accidentes).

El aumento de estas actividades se está transformado en un problema grave de seguridad ya que la interacción vehículo a motor y bicicleta no estaba considerada en los diseños de las carreteras convencionales y muchas veces deben compartir la calzada. De hecho, según (Dirección General de Tráfico, 2017b) los usuarios de la bicicleta se vieron implicados en 8.065 accidentes con víctimas que en términos porcentuales el 28% se produjo en vías interurbanas y 72% en vías urbanas además ocurrieron 78 accidentes fatales de los cuales 29 accidentes fueron en vías urbanas. Por lo tanto, aunque existe un mayor uso de bicicletas en entornos urbanos, la probabilidad de un accidente grave es menor en vías urbanas.

La mayor velocidad de los vehículos de motor, específicamente la mayor velocidad relativa entre los vehículos de motor y las bicicletas durante las maniobras de adelantamiento es la principal causa de la alta gravedad de los accidentes, así como las diferencias de tamaños y la poca protección que tiene los ciclistas. La maniobra de adelantamiento es especialmente desafiante cuando los ciclistas montan pelotones (más de un ciclista circulando) ya que estos van modificando su formación, tamaño y velocidad relativa a lo largo de su recorrido, aunque los países establecen una separación lateral mínima que no depende de la velocidad o del tipo de vehículo.

Investigaciones previas reportaron esta mayor severidad (Boufous et al., 2012) encontrando que, aunque solo el 4,9% de los accidentes de bicicleta en la región de Victoria (Australia) se produjeron en caminos rurales, su gravedad fue mayor (el 46,5% de los accidentes implicaron lesiones graves, en comparación con el 33,3% de los accidentes urbanos). Estas investigaciones concluyeron que la causa de este resultado fue la mayor velocidad de los vehículos motorizados (Tin tin et al., 2013) reportaron un menor riesgo en caminos rurales en comparación con las calles urbanas, aunque no analizaron la gravedad de los choques. En particular, (Carter & Council, 2007) encontraron que la frecuencia de choques de bicicletas, choques por longitud de carretera y choques por vehículo km fue significativamente mayor en carreteras convencionales.



Además son muy pocos los estudios que analizan la seguridad en carreteras convencionales en comparación con los estudios realizados en vías urbanas (García et al., 2015). Esta situación posiblemente sea debido a que la circulación ciclista por carretera no está tan extendida en otros países como en España, principalmente por su clima y orografía.

Esta investigación se enfocará en el análisis e interacción entre los vehículos a motor en carreteras convencionales en entornos interurbanos.

Para llevar a cabo la investigación se utilizarán las tomas de datos en campos realizadas por el proyecto Bike2lane - Mejora de la Seguridad y Operación de Carretera Convencionales con Ciclistas. Mediante estas tomas de datos se obtuvo información de la demanda de ciclistas y de vehículos, y por otro lado la interacción entre ellos (adelantamientos, conflictos, riesgos, etc.) y el comportamiento propio del ciclista.

Una vez procesada esta información, se procederá a replicar la carretera convencional seleccionada mediante un modelo de microsimulación para reproducir el comportamiento de los conductores y pelotones logrando determinar las características y peculiaridades de estas interacciones y para luego lograr proponer mejoras lo más fielmente posible.

El contenido de este trabajo de fin de máster (TFM) seguirá el siguiente esquema:

1. Planteamiento del problema, aportando una serie de datos que lo justifican;
2. Recopilación del marco teórico sobre la materia;
3. Objetivos perseguidos con la investigación e hipótesis de partida que se plantearon;
4. Metodología experimental, donde se explica cómo se realizó la toma de datos de campo, las características de las carreteras de convencionales donde se realizaron las observaciones, cómo se realizó la reducción de datos para obtener las variables principales del estudio;
5. Creación de un modelo de microsimulación que represente la interacción entre vehículos a motor y ciclistas, este modelo será calibrado y validado para el tramo de estudio con las observaciones;
6. Desarrollo de diferentes escenarios para logra evaluar la funcionalidad de las carreteras convencionales con diferentes repartos de vehículos a motor y ciclistas;
7. Análisis de resultados;
8. Propuestas de mejora y criterios técnicos obtenidos con el estudio, que pueden utilizarse en un futuro para tener en cuenta a los ciclistas en el diseño de carreteras de convencionales que cuenten con características similares a las estudiada;
9. Conclusiones y recomendaciones de la investigación;
10. Futuras líneas de investigación.



2.1. El ciclismo en España

El uso de la bicicleta en España tiene un componente especialmente recreativo según varias encuestas y estadística, la encuesta del CIS menciona que en los hogares españoles hay más bicicletas que balones (RACE, 2009). Así mismo, según el Anuario de Estadísticas deportivas del 2018, entre las modalidades deportivas más practicadas en términos semanales destacan al ciclismo como la tercera actividad detrás de la gimnasia y carrera a pie. En la siguiente figura se observa el aumento asociado al ciclismo entre el año 2010 y 2015 (Ministerio de Educación Cultura y Deporte, 2018).

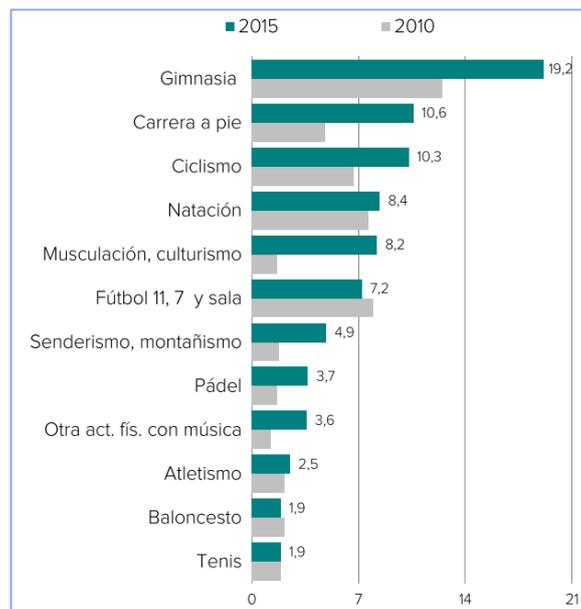


Fig. 1 Personas que practicaron deporte semanalmente según modalidades más frecuentes (Ministerio de Educación Cultura y Deporte, 2018).

En este contexto, El Real Automóvil Club de España desde ahora RACE realizó un estudio de la situación actual del colectivo ciclista en España para conocer las necesidades y problemas del colectivo ciclista. Mencionando que la carretera es un escenario de riesgo añadido frente a la zona urbana, lo que coincide con el uso recreativo de la bicicleta en España (RACE, 2009). Se concluyeron los siguientes puntos:

- El 73 % de los ciclistas utiliza, por norma general, las carreteras como infraestructura para hacer uso de la bicicleta frente a otro tipo de opciones como puedan ser los carriles bici, vías verdes u otros. De entre ellas, las vías que más frecuentan el colectivo ciclista son carreteras con arcén menor de 1,5 m y carreteras sin arcén (58 % concretamente);
- Las vías más frecuentadas por los ciclistas son vías con 1 carril por sentido de la marcha con un porcentaje de uso del 36%, seguido por las carreteras de 2 carriles por sentido frecuentada por el 22%, frente al 23% de los usuarios que hacen uso de vías de un solo sentido;



- En relación con la percepción de los ciclistas frente al tráfico, el 67% reconoció que circulaba por vías de tráfico moderado o medio (entre 26 y 100 veh/h), frente al 15% que reconoció circular por vías con una intensidad de vehículos elevada, más de 100 vehículos a la hora;
- La circulación de ciclistas en grupo aparece como una opción mayoritaria en los resultados analizados (el 64% circula en grupo vs. el 36% que circula en solitario). La composición mayoritaria de los grupos oscila entre 2 y 10 ciclistas (66% de los encuestados), así mismo componen grupos de más de 10 ciclistas un 25% de la muestra.

Por otra parte, para conocer la evolución de la opinión, los hábitos y el uso de la bicicleta se realiza el informe “Barómetro de la Bicicleta en España” que considera las características sociodemográficas, la relación con la bicicleta, los tipos de usuarios, percepción, pero sin hacer una clara diferencia entre el ciclismo urbano e interurbano. Las conclusiones del año 2017 son las siguientes (GESOP, 2017):

- Seis de cada diez Españoles tiene bicicleta para uso personal y la mitad la usa con alguna frecuencia y siete de cada diez usuarios utiliza la bicicleta alguna vez para hacer deporte y ocho de diez para pasear;
- Un 39,9% de los entrevistados dice circular siempre o casi siempre por la calzada compartiendo el espacio con los vehículos a motor, frente a 33,6% que lo hace a veces y un 25,9% que no lo hace nunca o casi nunca. Un 0,6% no se posiciona;
- Un 29,8% de los ciclistas que circulan por carretera considera que cuando le adelanta un vehículo a motor éste nunca o casi nunca modera la velocidad cuando se acerca al ciclista y otro 40,5% dice que los conductores sólo moderan la velocidad a veces. Un 26,8% considera que en general sí reducen siempre la velocidad;
- En relación con la distancia lateral de seguridad obligatoria en los adelantamientos a ciclistas, el 34,8% dice que en general no se respeta nunca o casi nunca, mientras un 44,5% considera que se respeta a veces y un 18,7% que se respeta siempre o casi siempre;
- Un 40,5% de los entrevistados cree que el principal inconveniente de la bicicleta es el riesgo de ser atropellado (23,2%) y el exceso de circulación y tráfico (17,3%);
- En referencia a la circulación de bicicletas por carreteras interurbanas, el 87,5% de los entrevistados cree que se necesitan espacios adecuados de conexión interurbana para circular en bicicleta, y el 77,5% estaría de acuerdo en habilitar carreteras comarcales o locales donde los ciclistas tuvieran prioridad respecto al resto de vehículos.

A partir de estos estudios se puede verificar el incremento del uso de la bicicleta a modo global, es decir, no se puede distinguir entre ciclismo urbano e interurbano, es por ello que el libro Blanco sobre la protección de ciclistas de la Comunidad Valenciana a la hora de analizar la realidad ciclista y los riesgos a los que se ven sometidos considera que es fundamental tener en cuenta la versatilidad de este tipo de vehículos hace que los perfiles de los usuarios sean muy variados. En carretera,



podemos distinguir principalmente dos tipos de usuarios (Generalitat Valenciana, 2017):

- **Usuarios esporádicos:** son los niños y jóvenes en medios rurales y los cicloturistas, en especial de fines de semana y festivos. Son ciclistas que utilizan todo tipo de vías para circular: caminos agrícolas, carreteras secundarias, vías específicas para bicicletas, calzadas y aceras urbanas, etc... No suelen ser usuarios de carretera. Por ello, por su falta de hábito y conocimiento de los comportamientos que se deben seguir, su incursión esporádica en la carretera produce un mayor riesgo de accidente;
- **Usuarios Deportivos:** los ciclistas deportivos, tanto aficionados (federados o no) como profesionales constituyen la gran mayoría de usuarios en las carreteras, especialmente las locales, aunque circulan indiscriminadamente por todas.

Una forma de conocer el crecimiento de usuarios deportivos federados de forma concreta y verídica es a través de las licencias federativas de ciclismo de España en los últimos 10 años. Se observa un aumento desde el año 2008 hasta el 2015 para luego mantenerse cerca de las 75.000 licencias ciclistas federadas representando en promedio un 1,84% del total de las licencias federadas.

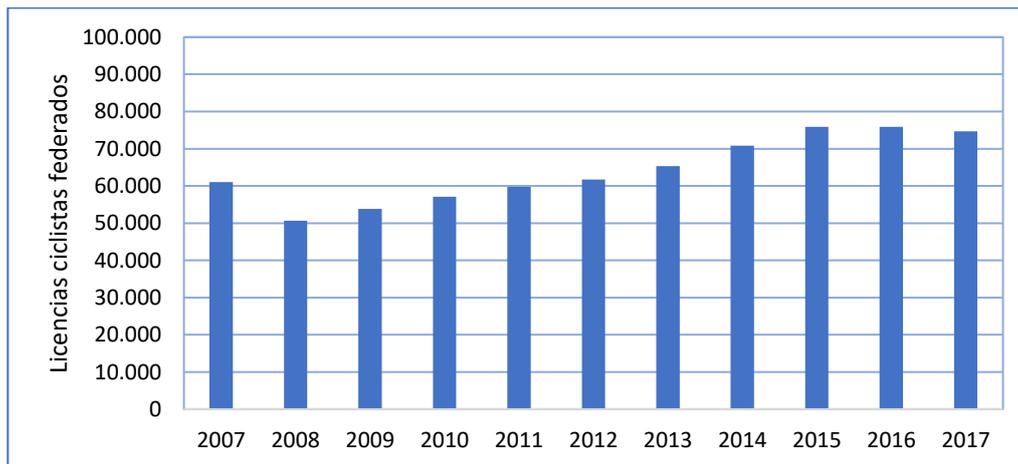


Fig. 2 Crecimiento histórico de las licencias federativas de ciclismo en España(Consejo Superior de Deporte, 2016, 2017).

No todos los usuarios de la bicicleta en carretera son federados, es por esto por lo que una forma de estimar la cantidad de usuarios total (federados más aficionados) es que utilizaremos la plataforma Strava para obtener un valor aproximado y conocer como ha incrementado la cantidad de usuarios en las carreteras.

Strava es una aplicación móvil de referencia entre los ciclistas. Cada año preparan un informe con los números estadísticos de su actividad durante los últimos 12 meses. Considerando los datos de ciclismo en general en España, se recorrieron 635 millones de kilómetros y se realizaron 12,8 millones de actividades ciclistas utilizando Strava, además los ciclistas españoles realizan salidas en bicicleta de 47,5 km de media, en 3 horas y 10 minutos (Strava, 2017). Mediante todas estas investigaciones podemos afirmar el real incremento de ciclistas en España y no solo en zonas urbanas.



2.2. Siniestralidad de ciclistas

La siniestralidad vial es uno de los problemas más importantes de nuestra sociedad, causando miles de víctimas cada año. Según el Informe Mundial sobre Seguridad Vial 2015 elaborado por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2015), aproximadamente 1,25 millones de personas fallecen por accidentes de tráfico y entre 20 y 50 millones resultan heridas en todo el mundo anualmente. De todas las víctimas mortales, el 49% son usuarios vulnerables, distribuidos entre peatones (22%), ciclistas (4%) y motoristas (23%). En el marco específico de la Unión Europea, Las muertes en bicicletas representaron el 7,8% del número total de muertes en accidentes de tráfico en 2015 en los países de la UE. En estos países, 2.043 personas que andaban en bicicleta murieron en accidentes de tráfico en 2015 y la tendencia va en ligero aumento. (European Commission, 2018). Según datos de la DGT las cuatro provincias más afectadas de España son Barcelona, Alicante, Valencia y Madrid.

Un concepto importante a la hora de hablar de siniestralidad es el de “usuarios vulnerables”, donde la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2015) define que son todos aquellos usuarios de la vía que, en caso de accidente, “carecen de un escudo protector” (peatones, ciclistas, motoristas, niños, mayores y personas con discapacidad), por lo que los impactos son absorbidos directamente por el cuerpo de la víctima, son de menor masa y estabilidad frente a un vehículo a motor y producto de atropellos a velocidades mayores de 60 km/h tienden a ser accidentes mortales.

A esa vulnerabilidad natural, se le une el importante repunte en la lesividad vivido en la última década, que alcanza un 12,4% y que, en los últimos cuatro años, ha alcanzado cotas alarmantes. De hecho, los usuarios vulnerables lesionados en accidente de tráfico se han incrementado desde 2012 en un 49% en el caso de los ciclistas. Además, el repunte general de la siniestralidad que se vive en España en los últimos años parece haber afectado especialmente a estos usuarios. De hecho, desde 2012, la mortalidad de estos colectivos (peatones, ciclistas y motoristas) se ha incrementado en un 6% y suponen ya casi el 50% de los fallecidos en accidentes de circulación en España, 6,5 puntos más que en 2007, una muerte silenciosa de la que las campañas de concienciación no suelen hacerse eco, volcadas casi siempre en los conductores de coche y en sus accidentes (Fundación Línea Directa, 2018).

Por otro lado, las conclusiones del Barómetro de la Bicicleta en España del año 2017 sobre siniestralidad son las siguientes (GESOP, 2017):

- Un 14,3% de los ciclistas ha sufrido algún accidente circulando en bicicleta en los últimos 5 años. De ellos, los hombres y los más jóvenes son los que más sufren accidentes en bicicleta (en consonancia con el hecho que también son los que más la usan);
- La gran mayoría de los accidentes se producen por caídas (67,4%), pero un 25,3% es debido al atropello del ciclista y un 5,4% a que el ciclista atropella a un peatón;
- En referencia al lugar donde se ha producido el accidente, un 39,4% ha sido en ciudades o zonas urbanizadas, el 18,6% por carretera y el 40,7% por



caminos de montaña.

De hecho, según las principales cifras de Siniestralidad Vial 2017 redactados por la Dirección General de Tráfico (Dirección General de Tráfico, 2017b). En vías interurbanas, ha habido un 2% más de accidentes, un 2% más de fallecidos, un 6% menos de heridos hospitalizados y un 2% más de heridos no hospitalizados. Por su parte, en las vías urbanas el número de accidentes se ha reducido un 1%, el de fallecidos en un 2% y el de heridos no hospitalizados ha aumentado un 2%, mientras que los heridos hospitalizados han disminuido en un 2%.

El número de fallecidos también ha evolucionado de manera diferente según el medio de desplazamiento. En concreto, hay aumentos en ciclistas con 11 fallecidos más (de 67 a 78), 6% más; en motociclistas, con un 5% más; en ocupantes de turismos, con un 6% más; y en ocupantes de vehículos de mercancía, con un 8% más. Por el contrario, hay reducción en los ocupantes de autobuses fallecidos, 18 menos (de 21 a 3), y en los de ciclomotor, con 5 fallecidos menos (de 54 a 49).

| Tipo de vehículo | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | Variación(1) 2017/2016 | Variación Interanual 2008-2017 |
|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Bicicleta | 54 | 56 | 67 | 49 | 72 | 69 | 75 | 58 | 67 | 78 | 11 | 24 |
| Ciclomotor | 183 | 156 | 100 | 74 | 66 | 54 | 53 | 56 | 54 | 49 | -5 | -14% |
| Motocicleta | 495 | 438 | 386 | 348 | 302 | 301 | 287 | 329 | 343 | 359 | 4% | -4% |
| Turismo | 1.501 | 1.263 | 1.197 | 977 | 872 | 715 | 722 | 693 | 754 | 799 | 6% | -7% |
| Veh. mercancías | 263 | 239 | 185 | 172 | 147 | 111 | 160 | 152 | 143 | 155 | 8% | -6% |
| Autobús | 27 | 21 | 4 | 3 | 3 | 11 | 26 | 2 | 21 | 3 | -18 | -24 |
| Otros vehículos | 75 | 71 | 68 | 57 | 65 | 41 | 29 | 32 | 39 | 36 | -3 | -39 |
| Peatones | 502 | 470 | 471 | 380 | 376 | 378 | 336 | 367 | 389 | 351 | -11% | -4% |
| Total fallecidos | 3.100 | 2.714 | 2.478 | 2.060 | 1.903 | 1.680 | 1.688 | 1.689 | 1.810 | 1.830 | 1% | -6% |

1Las diferencias se han calculado en % cuando el número de efectivos es mayor de 100 y en valores absolutos cuando el número es inferior a 100.

Tabla 1 Evolución de los fallecidos por tipo de vehículo en España, 2008-2017 (Dirección General de Tráfico, 2017b).

Enfocándonos en los usuarios de la bicicleta en el año 2017, se vieron implicados en 8.065 accidentes en los que fallecieron 78 ciclistas, 694 resultaron heridos hospitalizados y 7.035 fueron heridos no hospitalizados. Los accidentes se produjeron mayoritariamente en vías urbanas (72%), donde también se produjo la mayoría de los heridos no hospitalizados ciclistas, el 71%. Sin embargo, el número mayor de ciclistas fallecidos se produjo en vías interurbanas, 49 fallecieron en este tipo de vía, frente a los 29 en urbana.

| Tipo de vía | Accidentes con víctimas | | Fallecidos | Heridos hospitalizados | | Heridos no hospitalizados | |
|-------------------|-------------------------|-------------|------------|------------------------|-------------|---------------------------|-------------|
| | Número | % | Número | Número | % | Número | % |
| Vías interurbanas | 2.257 | 28% | 49 | 338 | 49% | 2.074 | 29% |
| Vías urbanas | 5.808 | 72% | 29 | 356 | 51% | 5.001 | 71% |
| Total | 8.065 | 100% | 78 | 694 | 100% | 7.075 | 100% |

*No se muestra la distribución porcentual, por ser el número total inferior a 100.

Tabla 2 Accidentes de Tráfico con víctimas con bicicletas implicadas en España 2017 (Dirección General de Tráfico, 2017b).

Los hombres son los que han sufrido mayoritariamente las consecuencias de los accidentes de tráfico en bicicleta: 73 de los 78 fallecidos en bicicleta eran hombres,



como lo eran el 87% de los heridos hospitalizados y el 82% de los heridos no hospitalizados.

| Sexo | Fallecidos [*] | Heridos hospitalizados | | Heridos no hospitalizados | |
|-----------------|-------------------------|------------------------|-------------|---------------------------|-------------|
| | Número | Número | % | Número | % |
| Hombres | 73 | 601 | 87% | 5.799 | 82% |
| Mujeres | 5 | 89 | 13% | 1.203 | 17% |
| Sin especificar | | 4 | 1% | 73 | 1% |
| Total | 78 | 694 | 100% | 7.075 | 100% |

Tabla 3 Fallecidos y heridos según sexo en bicicletas en España 2017 (Dirección General de Tráfico, 2017b).

En el año 2017, el grupo de edad de 65 a 74 años es el que presenta la cifra más elevada de fallecidos en bicicleta (17), seguido del de 75 y más (13) y 45 a 64 (12). En el caso de los heridos hospitalizados, los grupos de edad donde hubo una cantidad mayor de este tipo de heridos fueron el de 45 a 54 años (22%) y el de 35 a 44 años (20%).

| Grupo de edad | Fallecidos [*] | Heridos hospitalizados | | Heridos no hospitalizados | |
|-----------------|-------------------------|------------------------|-------------|---------------------------|-------------|
| | Número | Número | % | Número | % |
| 0-14 | 4 | 27 | 4% | 357 | 5% |
| 15-24 | 3 | 92 | 13% | 1.159 | 16% |
| 25-34 | 7 | 76 | 11% | 1.202 | 17% |
| 35-44 | 9 | 142 | 20% | 1.493 | 21% |
| 45-54 | 12 | 154 | 22% | 1.146 | 16% |
| 55-64 | 12 | 95 | 14% | 753 | 11% |
| 65-74 | 17 | 63 | 9% | 388 | 5% |
| 75 y más | 13 | 30 | 4% | 133 | 2% |
| Sin especificar | 1 | 15 | 2% | 444 | 6% |
| Total | 78 | 694 | 100% | 7.075 | 100% |

Tabla 4 Fallecidos y heridos según grupo de edad en bicicletas en España 2017 (Dirección General de Tráfico, 2017b).

La evolución de fallecidos y heridos separados por vías urbanas e interurbanas es de 11 ciclistas fallecidos más que en 2016; distribuidos de la siguiente forma: 9 ciclistas más en vías interurbanas y 2 más en vías urbanas. En cuanto a los ciclistas que resultaron heridos hospitalizados ha habido una disminución del 5% en ambas vías y los heridos no hospitalizados han tenido un aumento del 7% (Dirección General de Tráfico, 2017b). El factor concurrente más habitual en los accidentes de los ciclistas ha sido la distracción (89,3%) mientras que el tipo de accidente más frecuente en el que se ven implicados es la colisión frontal/frontolateral (40,9%) (83,6%) (Martí-Belda Bertolín, 2016).

Además, existen factores externos que afectan a la accidentabilidad como es la luminosidad de la vía, limpieza de la calzada, visibilidad, meteorología adversa, las vías señaladas innecesariamente o sin señalizar y los factores relacionados con el propio conductor como es la presencia de alcohol, drogas, inexperiencia y



principalmente las distracciones. A continuación, se presencia la evolución de los fallecidos y heridos hospitalizados en bicicletas separados por vías interurbanas y urbanas.

| Tipo de vía | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | Variación 2017/2016 |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| Vías interurbanas | 43 | 43 | 49 | 37 | 53 | 45 | 54 | 48 | 40 | 49 | 9 |
| Vías urbanas | 11 | 13 | 18 | 12 | 19 | 24 | 21 | 10 | 27 | 29 | 2 |
| Total | 54 | 56 | 67 | 49 | 72 | 69 | 75 | 58 | 67 | 78 | 11 |

Tabla 5 Evolución de fallecidos en bicicletas en vías urbanas e interurbanas en España 2017 (Dirección General de Tráfico, 2017b).

| Tipo de vía | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | Variación 2017/2016 | Variación Interanual 2008-2017 |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------------|--------------------------------|
| Vías interurbanas | 235 | 268 | 258 | 304 | 304 | 297 | 312 | 322 | 356 | 338 | -5% | 4% |
| Vías urbanas | 205 | 221 | 209 | 285 | 268 | 349 | 358 | 330 | 380 | 356 | -6% | 6% |
| Total | 440 | 489 | 467 | 589 | 572 | 646 | 670 | 652 | 736 | 694 | -6% | 5% |

Tabla 6 Evolución de heridos hospitalizados en bicicletas en vías urbanas e interurbanas. España 2017 (Dirección General de Tráfico, 2017b).

Como puede apreciarse, aunque el número de heridos hospitalizados ha disminuido, el número de accidentes con víctimas y fallecidos no hace más que aumentar año a año.

Considerando la siniestralidad en la Diputación de Valencia se observa en la siguiente figura los accidentes con víctimas con ciclistas implicados desde el 2009 hasta el 2015. Comparando a escala nacional en zona interurbana, según los datos de la DGT, y en la Red de Carreteras de la Diputación de Valencia.



Fig. 3 Accidentes con víctimas con implicación de ciclista respecto al total de accidentes con víctimas con ciclista implicados de la Red (Corb, 2017).

La estabilización de estas cifras y aún más el disminuir a cero las víctimas con implicaciones de ciclista requiere de medidas a corto rápidas y de medio plazo en



toda la red de España priorizando las más afectadas como es el caso de la Diputación de Valencia donde la cantidad de ciclista sigue aumentando cada año.

En cuanto a la gravedad de las víctimas ciclistas, ha aumentado considerablemente el número de heridos leves en ambas áreas de influencia. Mientras que el número de heridos graves y muertos se mantiene, más o menos estable, en su orden de magnitud indicando que es necesario estudiar e implantar medidas para solucionar las principales causas de los accidentes, ver la siguiente figura.

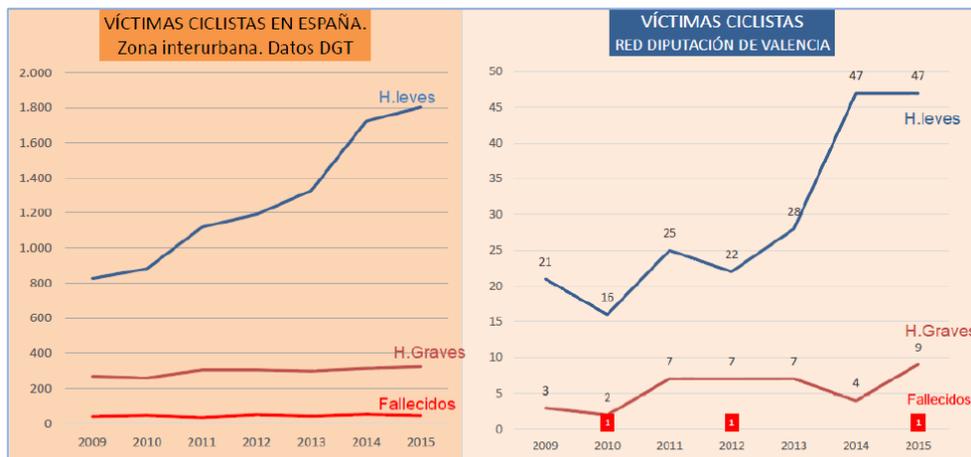


Fig. 4 Evolución de las Víctimas ciclistas (Corb, 2017).

Las horas más peligrosas para la ocurrencia de accidentes con ciclistas implicados son entre las 12 y las 15 horas. Mientras que la franja horaria entre las 7 y las 11 es la que acumula mayor número de fallecidos. Además, Según Martí-Belda Bertolín, los meses que registran mayores índices de accidentalidad son aquellos que tienen mejores condiciones climatológicas, en concreto, el mes de Julio. En cambio, el mes de diciembre es considerado el mes con menor porcentaje de ciclistas que resultan víctimas de accidente. Respecto a la lesividad, agosto es el mes más letal y el que más heridos graves registra, quizás debido al ser el mes con mayor demanda ciclista. En cuanto a la distribución semanal el fin de semana es donde hay mayor afluencia de ciclistas y donde se acumulan el mayor porcentaje de heridos graves y muertos pero los jueves y miércoles son los días con mayor accidentalidad.

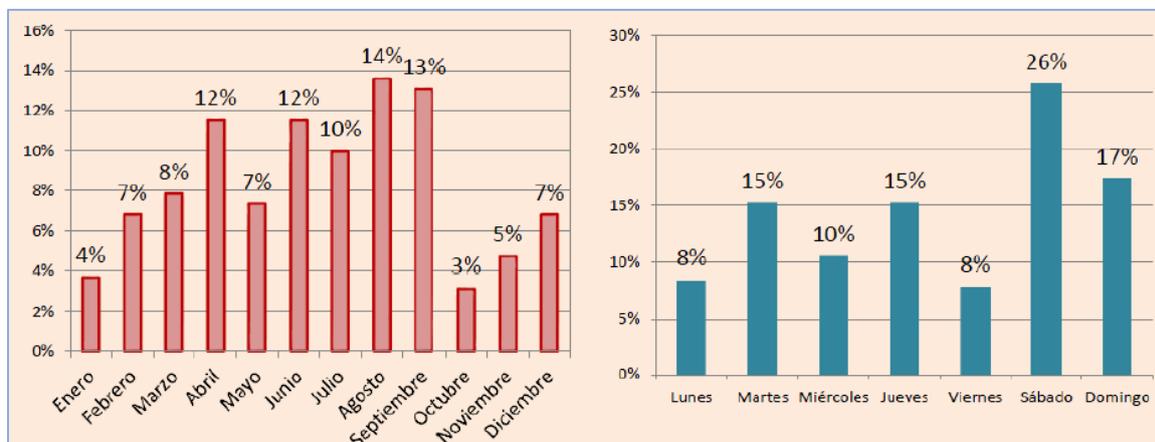


Fig. 5 Estacionalidad mensual (izquierda) y semanal (derecha) (Corb, 2017).



Corb además observo la distribución de los accidentes según los vehículos implicados en los accidentes, es decir, si los hubo presencia de otro vehículo. Concluyo que el mayor porcentaje de los accidentes ocurren cuando el ciclista está solo.

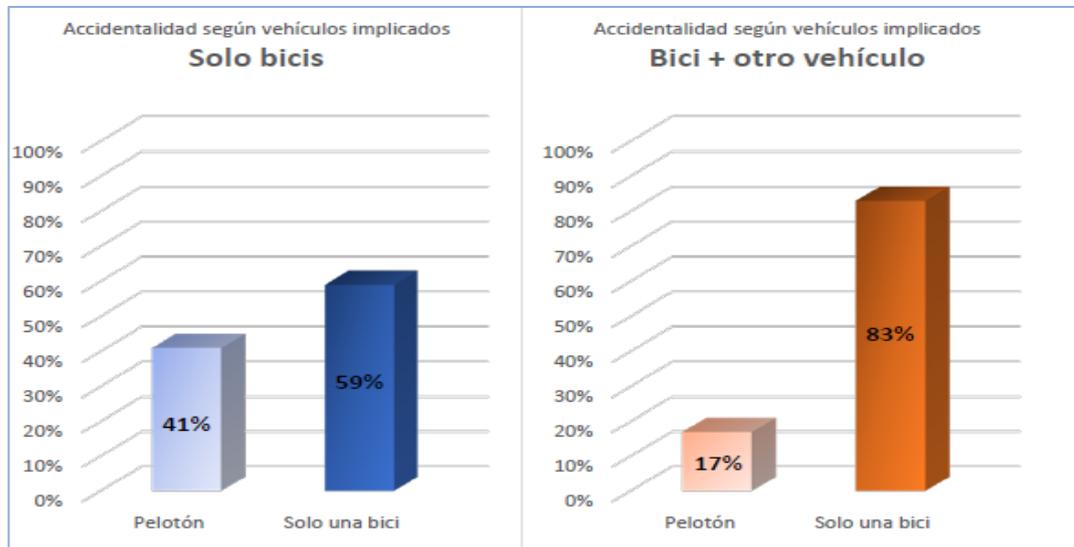


Fig. 6 Distribución accidentalidad según número ciclistas circulando (Corb, 2017).

Esta información concuerda con un estudio realizado por la Escuela de ciclismo Angelino Soler y la Universidad Politécnica de Valencia que menciona que el hecho de rodar en grupo es el factor que explica que la accidentalidad no aumente los fines de semana. Normalmente, en días laborables el ciclista deportivo rueda en solitario, o como mucho en grupos de tres o cuatro unidades, ya que no hay clubes que organicen excursiones en esos días, debido a los distintos compromisos laborales de los socios (Escuela de ciclismo Angelino Soler, 2001).

Además, podemos mencionar un estudio sobre el análisis de la accidentalidad ciclista en la red de carreteras de la Diputación de Valencia realizada por (TYPESA, 2015) redactado para la Seguridad Vial del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, donde se resumen todos los factores de accidentalidad:

- La mayoría de los accidentes se producen entre una bicicleta y otro vehículo, en entorno interurbano, en intersecciones, principalmente en glorietas. No obstante, el riesgo en tramo periurbano es cinco veces mayor;
- En un tercio de los accidentes existen carriles bici y en la mitad de ellos el ciclista usaba el carril bici. Este tipo de accidente se da mayoritariamente en entorno urbano y periurbano;
- Los accidentes son mayoritariamente colisiones frontolaterales en el caso de que existan otros vehículos implicados y colisiones con objetos en el caso de accidentes sólo con ciclistas implicados;
- En el caso de las glorietas, mayoritariamente se producen colisiones frontolaterales entre un ciclista que circula por el anillo y otro vehículo que se incorpora al mismo sin cederle el paso al ciclista;
- Es muy significativo el porcentaje de ciclistas accidentados al cruzar los ramales de las glorietas por el carril bici (25%);



- La causa principal es la inherente al conductor, y en concreto la distracción. También es significativa la infracción a la norma en el caso de accidentes con otros vehículos. Las causas achacables a la vía están presentes en el 12% de accidentes sólo con ciclistas;
- Los accidentes se producen casi siempre de día, siendo las 11 de la mañana la hora en que se acumulan más accidentes, aunque hay un pequeño repunte a las 20 h (en torno a un 8%). Se producen accidentes todos los días de la semana, con un pequeño repunte los sábados, que resulta más significativo en el caso de accidentes sólo con ciclistas (en torno a un tercio de los accidentes de este tipo se producen en sábado). Julio es el mes más problemático;
- El ciclista accidentado es mayoritariamente un varón de mediana edad que circula solo, con un desplazamiento previsto de menos de 50 km por ocio.

No obstante, desde el punto de vista de la seguridad vial, este análisis de la siniestralidad y su comparación con los de años anteriores no deja de ser más que un dato estadístico de evolución y que, aunque puede reflejar la efectividad de determinadas políticas o actuaciones sobre seguridad vial, no suministra información sobre posibles causas, circunstancias de contorno o comportamientos de riesgo que permitan avanzar en la evaluación de las circunstancias de riesgo y en la adopción de medidas preventivas. Por otra parte, este análisis no deja de constituir una visión parcial del problema dado que sólo nos permite centrarnos en aquellos casos concretos en los que finalmente se ha producido un accidente (Ferrer Pérez, 2017).

Por lo tanto, a la vista del análisis de siniestralidad realizado, se comprueba el aumento de los accidentes con presencia de ciclista y la disminución de los accidentes de vehículos a motor esto se puede deber a que toda la infraestructura actual y las mejoras están enfocadas a este tipo de movilidad.

Otro punto importante para considerar es que la Red de Carreteras del Estado de España tenía 26.395 km en 2016, de los cuales el 45% eran de gran capacidad (autopistas, autovías y carreteras de doble calzada). Por el contrario, del conjunto de todas las redes, el 89,7% corresponde a restos de vías que es donde se encuentran las carreteras convencionales (Dirección General de Tráfico, 2017b).

| Tipo de vía | Estado | CCAA | Diputaciones y Cabildos | Total |
|---------------------------|---------------|---------------|-------------------------|----------------|
| Autopista de peaje | 2.539 | 329 | 171 | 3.039 |
| Autovía y autopista libre | 8.910 | 2.907 | 587 | 12.405 |
| Carretera doble calzada | 508 | 766 | 391 | 1.665 |
| Resto de vías | 14.438 | 67.289 | 66.648 | 148.374 |
| Total | 26.395 | 71.291 | 67.797 | 165.483 |

Tabla 7 Longitud (km) de la red de vías interurbanas distribuidas por titularidad y tipo de vía (Dirección General de Tráfico, 2017b).

Por ello el alcance de este trabajo de fin de Máster se enmarcará en carreteras convencionales debido a la gran presencia de ellas en España combinado a que la practica ciclista en carretera ha aumentado considerablemente en los últimos años



generando un aumento en la siniestralidad, por lo que la combinación de estos dos criterios serán el enfoque principal por analizar y es donde se deben enfocar las estrategias para disminuir la siniestralidad. Para respaldar esta acotación del trabajo se menciona que (Dirección General de Tráfico, 2017b):

- Carreteras convencionales: con 1.013 fallecidos, representan el 55% de todos los fallecidos en accidentes de tráfico, el 77% si nos restringimos al ámbito interurbano. En 2017, el número de víctimas mortales en estas vías aumentó en 5% respecto al año anterior, un dato que contrasta con la disminución del 8% observada en autovías;
- Los usuarios vulnerables: representan el 46% de los fallecidos (peatones: 351 fallecidos; bicicletas: 78 fallecidos; ciclomotores: 49 fallecidos; motocicletas: 359 fallecidos). Dentro de este colectivo destaca la evolución reciente de la mortalidad en motocicletas: entre 2014 y 2017, los fallecidos han aumentado un 25%, más que en ningún otro medio de desplazamiento. También los ciclistas fallecidos han aumentado entre 2015 (58) y 2017 (78), un aumento concentrado casi exclusivamente en las vías urbanas.

2.3. Actuaciones relacionadas con el ciclismo en España

En el año 2011 el Consejo de Seguridad Vial del Estado español aprobó las “Estrategia de seguridad Vial 2011-2020”, documento que integra y alinea todas las actuaciones de la Administración General de Estado que tienen impacto en la mejora de la seguridad vial desde una perspectiva multidisciplinar, con un nuevo enfoque por colectivos y temas clave; promueve e impulsa las actuaciones del resto de las administraciones públicas que tienen competencias en esta materia siguiendo las recomendaciones de la Comisión Europea (Dirección General de Tráfico, 2010).

Este documento establece como prioridad proteger a los usuarios más vulnerables mediante un objetivo operativo que pretende proporcionar espacios de movilidad seguros para las bicicletas ya que su objetivo final es reducir a la mitad el número de víctimas fallecida en accidentes de tráfico en los próximos 10 años desde su aplicación. Para lograr este objetivo operativo se consideran diferentes metas como es la promoción del uso de la bicicleta como modo de desplazamiento eficiente, generación de desplazamientos seguros en bicicletas en todas las vías, mejora de la capacitación y actitudes de ciclistas y resto de usuarios, acometer más estudios en profundidad y señalización de itinerarios.

Parte esencial de los documentos estratégicos son el establecimiento de mecanismos para el seguimiento y desarrollo de los objetivos específicos y de las líneas de actuación contenidas en este Plan. En el año 2017, el Ministerio del Interior propuso 50 nuevas acciones a las estrategias originales, quedando así con 154 acciones dentro de 39 objetivos estratégicos y 19 áreas temáticas.

Con la actualización de este documento se mantuvo como objetivo el ciclista considerando dos temas claves, la mejora de la capacitación y actitudes del ciclista con 4 acciones (considerado desde el origen de las estrategias) y el impulso de la movilidad de la bicicleta, conforme al Plan estrategia de la Bicicleta (PEB). Este



nuevo Plan de estrategia está siendo realizado por la Administración General del Estado y su finalidad será proponer un conjunto de propuesta para impulsar la bicicleta y aumentar la seguridad de ellas, además de un conjunto de medidas transversales como el cambio de la normativa, de educación, de cambio cultura y de infraestructuras.

La asociación Española de la Carretera propuso un estudio con una serie de actuaciones en la red convencional encaminadas a la mejora de la propia infraestructura (que pueden implementarse juntamente con otras medidas de gestión de la red). Dichas actuaciones se plantean en aquellos tramos que soportan mayores niveles de tráfico y que tienen un índice de peligrosidad superior a la media, considerando la realización de las actuaciones no sólo en los puntos concretos en los que se han identificado los accidentes, sino en la longitud absoluta de los tramos. Dichas actuaciones se concentran en evitar colisiones frontales mediante carreteras 2+1, evitar y/o reducir las consecuencias de los accidentes por salidas de vías y analizar los tramos de vía de “especial peligrosidad” (Asociación española de la Carretera, 2017), que sin duda alguna ayudarán a disminuir la accidentabilidad en este tipo de carreteras, pero estas medidas no están enfocadas en los ciclistas que es el tema principal de estudio.

2.3.1. Actuaciones relacionadas con usuarios vulnerables en las administraciones públicas.

El sistema viario de la Comunitat Valenciana tiene de titulares del sistema viario a diferentes administraciones públicas. A partir de información del Ministerio de Fomento en el año 2016 la Provincia de Valencia cuenta con un 41,7% del total de la red y además el 51,6% de ella es administrada por las diputaciones y cabildos (Ministerio de Fomento, 2016b).

| Provincia | Estado | | CCAA | | Diputaciones y Cabildos | | Total | |
|-------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|-------------------------|---------------|--------------|---------------|
| Alicante | 660 | 34,2% | 980 | 35,6% | 981 | 27,0% | 2.621 | 31,5% |
| Castellón | 479 | 24,8% | 968 | 35,1% | 775 | 21,4% | 2.222 | 26,7% |
| Valencia | 790 | 41,0% | 808 | 29,3% | 1.871 | 51,6% | 3.469 | 41,7% |
| Total C.V. | 1.929 | 100,0% | 2.756 | 100,0% | 3.627 | 100,0% | 8.312 | 100,0% |

Tabla 8 Longitud de Red de la Comunidad Valencia.

Debido a que el trabajo de fin de máster se centrara en carreteras de la Provincia de Valencia. A continuación, se resumen brevemente las actuaciones recientes relacionadas con los usuarios vulnerables de la Generalitat Valencia y de la propia Diputación de Valencia.

2.3.1.1. Generalitat Valenciana

Producto del aumento de la accidentabilidad año tras año como se evidencio en el apartado 2.2 de siniestralidad ciclista la Generalitat Valenciana ha propuesto diferentes actuaciones que se resumen brevemente a continuación (Generalitat Valenciana, 2016, 2017).



- Plan Director de Seguridad Vial (PDSV) cambia la visión tradicional de la seguridad vial por un nuevo enfoque donde la seguridad prima sobre otros beneficios sociales como la movilidad, y donde la responsabilidad es compartida entre quien diseña y gestiona el viario y quien lo utiliza, hacia la denominada visión cero: evitar que se produzcan accidentes mortales y graves. Este plan está vinculado con la Estrategia de seguridad vial 2011-2020 que es de ámbito nacional;
- Programa de Seguridad Vial 2015/2016, que contempla 197 actuaciones, para mejora de travesías, acondicionamiento de intersecciones, mejora de curvas y tratamiento de tramos problemáticos desde el punto de vista de la seguridad de la circulación;
- Libro Blanco sobre la Protección de Ciclistas de la Comunidad Valenciana, se orienta a promover el uso de la bicicleta dentro de un contexto de una vida saludable, proteger a quien conduce de la posible siniestralidad por el hecho de ser un vehículo desprotegido, prevenir la accidentabilidad de quien conduce bicicletas y las lesiones derivadas de la misma y fomentar medidas de autoprotección y seguridad vial del propio ciclista.

En el año 2001 la Generalitat Valenciana clasificó las vías de ciclistas interurbana ya que eran bastante distinta al tratamiento de la señalización en vías urbanas. Esta clasificación se dividió en vías integradas, segregadas y adosadas o arcén-bici. Todas ellas se señalarían en función del uso.

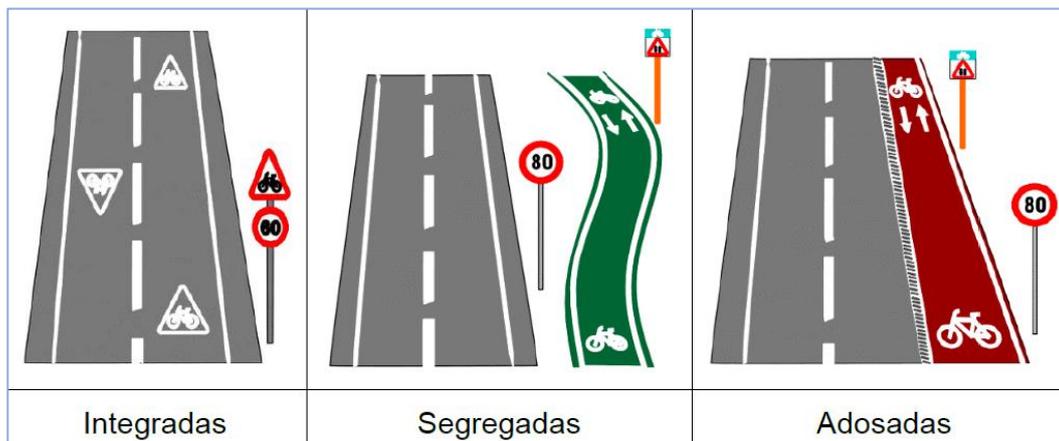


Fig. 7 Tipos de ciclo rutas (Picazo & Jover, 2001).

2.3.1.2. Diputación de Valencia

La Comunidad Valencia está compuesta por tres diputaciones y una de ellas es la Diputación de Valencia, que cuenta con cerca del 42% del total de la red viaria. Una información relevante es que cerca del 66% de esta red (Rambla Cerdá, 2017) no cuenta con arcenes el cual es un problema para los ciclistas ya que los obliga a utilizar la calzada.

La Diputación de Valencia está trabajando desde 1995 hasta la actualidad, en actuaciones para la mejora del estado de su red en relación con la accidentabilidad de los usuarios vulnerables. Algunas de ellas son (Rambla Cerdá, 2017):



Desde 1995, se comenzaron a ampliar arcenes y coloreando de rojos, resaltando marca vial de 20 cm. e incorporando señalización de advertencia de la presencia de ciclista.



Fig. 8 Mejoras desde 1995 de la Diputación de Valencia (Corb, 2017).

A partir de 2015, se comenzaron a incorporar señalización informativa en puertos de montaña y un año más tarde se consideraron 23 carreteras de baja IMD.



Fig. 9 Señalización de puerto de montaña de la Diputación de Valencia (Corb, 2017).

La identificación de los itinerarios ciclista, análisis de las características de la vía (IMD, plataforma, arcenes, etc.), determinación de tramos de actuaciones y la adopción de medidas de renovación de cartelería específica, limitación de velocidad en finde de semana o permanentemente en una franja horario y la ampliación de plataforma y arcenes fueron implementadas a partir del año 2017.

| CÓDIGO | COLOR | PROVINCIA | RECORRIDO (LOCALIDADES) | RECORRIDO (VÍAS) | LONGITUD TRAMO (Km) | LONGITUD PROVINCIA (Km) | LONGITUD COMUNIDAD AUTÓNOMA (Km) |
|----------|-------|-----------|---|---|---------------------|-------------------------|----------------------------------|
| ES-A-01 | | ALICANTE | Fuentes del Algar - Coll de Rates | CV-715 | 13,0 | 32,0 | 181,5 |
| ES-A-05 | | ALICANTE | El Campello - Relleu | CV-775 | 8,0 | | |
| ES-A-13 | | ALICANTE | A7 - Maigó - Agost | CV-827; (Cruce A-7) - (Cruce CV-820) | 11,0 | | |
| ES-CS-01 | | CASTELLÓN | Artana- La Vall d'Uixó | CV-223 desde conexión con CV-10 a Esilda (Km 0 al 10) CV-219 por Chóvar (Km 0 al 13,5) CV-230 hasta La Vall d'Uixó (Km 10,5 al KM 19) | 32,0 | 74,0 | |
| ES-CS-02 | | CASTELLÓN | L'Àlcora-Figueroles-Lucena-Puerto Remolcador | CV-190 Km 7 - Km 29,5 | 22,5 | 75,5 | |
| ES-CS-03 | | CASTELLÓN | Entre el enlace con la N-340 y la intersección con la CV-10 | CV-135 Km 0- Km 19,5 | 19,5 | | |
| ES-V-01 | | VALENCIA | Rotonda Alfafar - Palmeretes | CV-500 | 14,9 | | |
| ES-V-02 | | VALENCIA | Godella a Serra | CV-310 | 23,7 | 21,4 | |
| ES-V-03 | | VALENCIA | Torrent | CV-405 | 15,5 | | |
| ES-V-04 | | VALENCIA | Gandia - Simat | CV-675 | 21,4 | | |

Fig. 10 Rutas Ciclistas Comunidad Valenciana (Dirección General de Tráfico, 2017a).



Fig. 11 Cartelería específica de limitación de velocidad (Corb, 2017).

Además, es necesario considerar medidas para actuar contra los factores externos mencionado en el punto 2.2 de siniestralidad ciclista, que es la luminosidad de la vía, limpieza de la calzada, visibilidad, estado de la plataforma, obstáculos laterales, etc.



3. Marco Teórico

En el presente apartado se muestra la revisión bibliográfica de los conocimientos existentes en el ámbito de la circulación ciclista en carreteras convencionales y los conflictos que se producen con los vehículos, así como la descripción de las maniobras de adelantamientos desde estas dos perspectivas. Se ha considera relevante investigar sobre los análisis de capacidad y funcionalidad de las carreteras convencionales para lograr comprender como la presencia de diferentes modos de transportes pueden afectar en estas características de las carreteras convencionales.

Además, se describirán los modelos existentes para modelar el comportamiento de ciclistas mediante diferentes modelos y específicamente se estudiarán los diferentes modelos de microsimulación vehicular, para así lograr encontrar el modelo más adecuado para la interacción entre vehículo- bicicleta. Una vez encontrado el modelo más adecuado, es necesario conocer las diferentes acciones que se pueden aplicar en las carreteras convencionales para mejorar la funcionales de estas.

Este capítulo incluye desde artículos de investigación, publicaciones en diferentes medios hasta normativas y recomendaciones nacionales como internacionales, con el objetivo de lograr un nivel de conocimiento suficiente sobre el tema a analizar, profundizando en las conclusiones de otros investigadores y propuestas de estos, para así tener un buen punto de partida y con una base teórica para el desarrollo de esta investigación.

3.1. Regulación Legal.

La experiencia internacional sobre la normativa que regula la circulación ciclista y los adelantamientos es independiente de cada país, aunque en muchos países existe una similitud en las características que se regulan.

En la Unión Europea no existe una normativa única aplicable en todos los países. No obstante, desde la UE se está trabajando en varios frentes para que la bicicleta sea más segura, considerando unos criterios generales (European Comisión, 2019):

- Medidas de seguridad obligatorias, las bicicletas deberían llevar obligatoriamente algunos dispositivos de seguridad básicos, como frenos, timbre y reflectores, en todos los países de la UE. Algunos países exigen requisitos adicionales de visibilidad, cascos, asientos para niños y una edad mínima para circular en bicicleta por carretera;
- Diseño y tecnologías de los vehículos, el perfeccionamiento del diseño de coches y vehículos pesados reduciría los riesgos de lesiones a ciclistas, especialmente la incorporación de frontales con sistema de absorción de choques en los coches y los retrovisores que reducen los ángulos muertos en los camiones. También, algunos coches nuevos empiezan a incorporar sistemas de detección de bicicletas que pueden frenar automáticamente para evitar accidentes;



- Respecto a la infraestructura y gestión del tráfico, la separación de las bicicletas del resto del tráfico mediante carriles bici ininterrumpidos contribuye a la reducción de las colisiones entre coches y bicicletas. También ayudan las zonas de velocidad limitada (30 km/h).

Una forma más específica para la regulación de los ciclistas y sus vehículos la UE redactó regulaciones relacionadas con el tráfico que se aplican a los ciclistas dividiéndolo en regulaciones para vehículos, regulaciones sobre el uso de cascos de ciclismo y reglas de tráfico (European Comisión, 2019).

3.1.1. Regulación de los vehículos

De acuerdo con la Convención de Viena, un ciclo es un vehículo con al menos dos ruedas que es propulsado exclusivamente por la energía muscular de la persona que viaja en ese vehículo, en particular mediante pedales o manivelas. Además, la Convención establece que un ciclo deberá:

- Disponer de un freno eficaz;
- Estar equipado con un timbre que pueda ser oído a una distancia suficiente, y no llevar ningún otro dispositivo de aviso acústico;
- Estar equipado con un dispositivo reflectante rojo en la parte trasera, y con dispositivos que garantizan que la bicicleta puede mostrar una luz blanca o amarilla en la parte delantera y una luz roja en la parte posterior.

Además de las mencionadas "condiciones para la admisión de ciclos en el tráfico internacional", algunos países como Alemania y los Países Bajos tienen regulaciones complementarias sobre el equipamiento obligatorio para garantizar la visibilidad de los ciclistas. Algunos ejemplos son:

- Un reflectante blanco delantero visible desde la parte frontal;
- Reflectantes naranjas en los pedales visibles desde la parte delantera y trasera;
- Dos reflectores de radios de color naranja montados en la rueda en cada rueda, dispuestos en un ángulo de 180° y visibles desde el lado, o tiras retrorreflectoras circulares blancas continuas en los neumáticos o en los radios de las ruedas delanteras y traseras;
- Un reflector rojo adicional de gran superficie en la parte trasera;
- Guardabarros para evitar que el lodo reduzca la visibilidad de las luces y los reflectores.

En algunos países (los Países Bajos, por ejemplo), se han elaborado normas para accesorios tales como asientos de bicicleta para niños. Estas normas incluyen requisitos y recomendaciones con respecto al acoplamiento del asiento, las dimensiones, los reposapiés y la protección contra el contacto de los pies con los radios (European Comisión, 2019).



Fig. 12 Accesorios obligatorios y recomendados para la circulación de bicicletas (Dirección General de Tráfico, 2015).

3.1.2. Legislación sobre el uso de casco

En algunos países europeos, los cascos de ciclismo se han convertido en obligatorios en los últimos años. En Malta, los cascos para ciclistas se hicieron obligatorio para todos los ciclistas en abril de 2004. En Suecia, los cascos para ciclistas son obligatoria para los niños de hasta 15 años desde el 1 de enero 2005. El mismo grupo de ciclistas tiene que llevar casco en Eslovenia y para menores de 16 años en la República Checa. En España, el uso del casco es obligatorio en vías interurbanas para todos los usuarios de bicicleta salvo en rampas ascendentes prolongadas, por razones médicas o en condiciones extremas de calor. En las vías urbanas su uso es obligatorio para los menores de 16 años tanto si son conductores como ocupantes de bicicleta. Para los mayores de 16, no es obligatorio, aunque se recomienda su uso. A continuación, se presenta un resumen sobre la normativa del uso del casco en diferentes países de la UE.

| País | Normativa |
|-----------------|--|
| Alemania | No es obligatorio |
| Croacia | Menores de 16 años |
| Dinamarca | No es obligatorio |
| Eslovenia | Menores de 15 años |
| España | Obligatorio en carretera |
| Finlandia | No es obligatorio |
| Francia | No es obligatorio |
| Holanda | No es obligatorio |
| Italia | No es obligatorio |
| Malta | Obligatorio |
| Polonia | No es obligatorio |
| Portugal | No es obligatorio |
| Reino Unido | No es obligatorio |
| República Checa | Menores de 18 años |
| Suecia | Menores de 15 años si son transportados. Exentos si van solo |
| Suiza | No es obligatorio |

Fig. 13 Normativa sobre uso de Casco en países de la UE (European Cyclists' Federation, 2018).



La definición de estándares precisos sin los cuales no se puede garantizar la efectividad de los cascos, es un requisito previo para cualquier regulación sobre el uso de cascos. Algunos países ya han establecido tales normas. La Directiva europea N.º 89/686 / CE sobre equipos de protección personal establece las normas que podrían adoptarse para los cascos de ciclistas. Las disposiciones para los cascos para niños, sin embargo, aún deben ser resueltas (European Commisión, 2019).

(Dickinson et al., 2002) han resumido los pros y los contras de la legislación sobre los cascos de bicicleta de la siguiente manera:

- El grupo de cascos pro-bicicleta basa su argumento en el hecho de que existe evidencia científica de que, en caso de una caída, los cascos reducen sustancialmente las lesiones en la cabeza;
- El grupo anti-casco basa su argumento en varias cuestiones, entre ellas: el uso obligatorio del casco conduce a una disminución en el uso de la bicicleta, la teoría de la compensación de riesgo niega los beneficios para la salud, los estudios científicos son defectuosos y el entorno general de la carretera debe mejorarse.

3.1.3. Normas de tráfico para los ciclistas.

Además de las reglas que normalmente se aplican a todos los usuarios de las carreteras y de acuerdo con la Convención de Viena, los ciclistas están sujetos a reglas específicas definidas en su legislación nacional para garantizar que puedan viajar de manera segura y fácil (European Commisión, 2019):

- Los ciclistas no deben viajar sin sostener el manubrio con al menos una mano, no deben dejarse arrastrar por otro vehículo, y no deben transportar, remolcar ni empujar objetos que dificultan su circulación o ponen en peligro a otros usuarios de la carretera;
- Deben mantenerse a la derecha de la calzada (a la izquierda en el Reino Unido e Irlanda) y dar una señal de brazo adecuada cuando desean girar;
- En principio, los ciclistas deben circular en línea. Sin embargo, algunos países, como es el caso de España, introducen excepciones a esta regla permitiendo a los ciclistas circular en paralelo donde la calzada es lo suficientemente ancha, donde el tráfico de ciclistas es importante, en vías ciclistas, etc.;
- Se les exige utilizar carriles bici y pistas. No pueden, sin embargo, utilizar autopistas y carreteras similares;
- Al caminar y empujar sus bicicletas a pie, los ciclistas se clasifican como peatones y, por lo tanto, pueden usar el pavimento.

La Convención de Viena prohíbe el transporte de pasajeros en bicicletas, pero permite autorizar excepciones. En algunos países se permite el transporte de un pasajero si la edad de éste está por debajo de una edad fijada legalmente (por ejemplo 14 años en Francia) y si el ciclista principal tiene una edad mínima.



Alemania ha añadido recientemente nuevos elementos a su código de tráfico para ciclistas. Desde entonces, los ciclistas pueden viajar contra sentido en calles seleccionadas de un solo sentido, y en las denominadas ciclo-calles los ciclistas pueden hacer uso de toda la calle mientras que los coches tienen que permanecer detrás de los ciclistas. En algunos países escandinavos y en Alemania las pistas ciclistas sólo son obligatorias si cumplen con la norma de calidad mínima adecuada.

Algunas legislaciones nacionales establecen que los ciclistas sólo pueden circular por carretera a partir de cierta edad. En Suiza, el ciclista debe tener, al menos, la edad para ir a la escuela antes de poder circular por una carretera. En Dinamarca, a los niños menores de 6 años no se les permite ir en bicicleta a menos que estén acompañadas por una persona que tenga 15 años o más. En Alemania, los niños deben tener, al menos, 8 años, con las mismas disposiciones que en Dinamarca. En Polonia, los niños mayores de 10 años deben pasar una prueba para que se les permita circular por carretera.

| País | Edad mínima para montar en bici por las vías públicas |
|-----------|--|
| Alemania | Mayores de 8 años excepto si van acompañados por un ciclista mayor de 15 años. |
| Dinamarca | Mayores de 6 años excepto si van acompañados por un ciclista mayor de 15 años. |
| Polonia | Mayores de 10 años que deben examinarse antes de salir a la carretera. |
| Suiza | Niños en edad de escolarización. |

Fig. 14 Edad mínima para montar bicicleta por vías públicas (European Cyclists' Federation, 2018).

Respecto al comportamiento del vehículo que adelantan la normativa también es bastante variable según países. Es general, el planteamiento legal se limita a recoger que el adelantamiento debe realizarse manteniendo una distancia adecuada que garantice la seguridad del ciclista, pero son pocos los países que fijan una separación mínima concreta durante la maniobra.

En la zona europea, países como Bélgica y Holanda establecen 1 m de separación mínima. En España y Portugal la separación mínima es de 1,50 m. En Francia se establece 1 m en zona urbana y 1,50 m en interurbana. Sin embargo, en otros países como Italia, Dinamarca, Grecia, Alemania, Reino Unido o Irlanda, no se establece una distancia mínima. No obstante, en los últimos tiempos, en Alemania se está empezando a recomendar a nivel judicial separaciones entre 1,50 m y 2 m y en Irlanda y Reino Unido también están surgiendo movimientos solicitando el establecimiento de una separación mínima, 1,50 m en el primero de ellos y 1 m en viarios con limitación de velocidad hasta 30 km/h y de 1,50 m para velocidades mayores en el segundo (European Comisión, 2019).

Fuera del ámbito europeo la situación también es dispar respecto a la separación mínima durante el adelantamiento, encontrándose países donde no existe tal limitación, caso de Japón, y otros donde dependiendo de la división administrativa pueden tener establecidos o no separaciones mínimas. Por ejemplo, en una veintena de Estados de EE. UU. se establece una separación mínima de 3 pies (0,9 m) y solo en uno 4 pies (1,2 m), no existiendo limitación en el resto. También, solo en una



provincia de Canadá se establece 1 m de separación. Igualmente, en un estado de Australia, Nel Queensland, se establece 1 m de separación mínima en carreteras con limitación por debajo de 60 km/h y de 1,50 m para velocidades superiores, pero no en los restantes, aunque también se está intentando extender esta limitación al resto (Ferrer Pérez, 2017).

En el caso específico de España, Real Decreto 667/2015, de 17 de julio, por el que se modifica el Reglamento General de Circulación, aprobado por el Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre,, el que aprueba el Reglamento General de Circulación para la aplicación y desarrollo del texto articulado de la Ley sobre tráfico, circulación de vehículos a motor y seguridad vial, aprobado por el Real Decreto Legislativo 339/1990 que regulan la circulación de bicicletas y su interacción con el resto de los vehículos.

A continuación, se recogen, a modo de resumen, los aspectos más relevantes correspondientes a la circulación de bicicletas y adelantamientos a ciclistas en carreteras convencionales (Real Decreto Legislativo 6/2015, 2015). En el área de la circulación de los ciclistas se pueden destacar los siguientes aspectos recogidos en este Reglamento:

- En el artículo 12 referente a normas relativas a ciclos, ciclomotores y motocicletas se establece que los ciclos que, por construcción, no puedan ser ocupados por más de una persona podrán transportar, no obstante, cuando el conductor sea mayor de edad, un menor de hasta siete años en asiento adicional que habrá de ser homologado;
- El artículo 35 establece que la utilización del carril habilitado para VAO queda limitada a motocicletas, turismos y vehículos mixtos adaptables, y está prohibida, por tanto, al resto de los vehículos y conjuntos de vehículos, incluidos los turismos con remolque, así como a peatones, ciclos, ciclomotores, vehículos de tracción animal y animales;
- En el artículo 36 se detalla que los conductores tienen la obligación de su utilización:
 - Los conductores de vehículos de tracción animal, vehículos especiales con masa máxima autorizada no superior a 3.500 kilogramos, ciclos, ciclomotores, vehículos para personas de movilidad reducida o vehículos en seguimiento de ciclistas, en el caso de que no exista vía o parte de ella que les esté especialmente destinada, circularán por el arcén de su derecha, si fuera transitable y suficiente para cada uno de éstos, y, si no lo fuera, utilizarán la parte imprescindible de la calzada. En los descensos prolongados con curvas, cuando razones de seguridad lo permitan, los conductores de bicicletas podrán abandonar el arcén y circular por la parte derecha de la calzada que necesiten,
 - Se prohíbe que los vehículos enumerados en el apartado anterior circulen en posición paralela, salvo las bicicletas, que podrán hacerlo en columna de a dos, orillándose todo lo posible al extremo derecho de la vía y colocándose en hilera en tramos sin visibilidad, y cuando formen aglomeraciones de tráfico. En las autovías solo podrán circular por el arcén, sin invadir la calzada en ningún caso,
 - El conductor de cualquiera de los vehículos enumerados en el apartado



primero de este artículo, excepto las bicicletas, no podrá adelantar a otro si la duración de la marcha de los vehículos colocados paralelamente excede los 15 segundos o el recorrido efectuado en dicha forma supera los 200 metros.

- En el artículo 38 se establece la prohibición de circular por autopistas y autovías con vehículos de tracción animal, bicicletas, ciclomotores y vehículos para personas de movilidad reducida. No obstante, los conductores de bicicletas mayores de 14 años podrán circular por los arcenes de las autovías, salvo que por razones justificadas de seguridad vial se prohíba mediante la señalización correspondiente. Dicha prohibición se complementará con un panel que informe del itinerario alternativo;
- El artículo 48 detalla que, para ciclos, ciclomotores de dos y tres ruedas y cuadriciclos ligeros la velocidad máxima de circulación será de 45 km/h. No obstante, los conductores de bicicletas podrán superar dicha velocidad máxima en aquellos tramos en los que las circunstancias de la vía permitan desarrollar una velocidad superior;
- El artículo 54 establece que todo conductor de un vehículo que circule detrás de otro deberá dejar entre ambos un espacio libre que le permita detenerse, en caso de frenado brusco, sin colisionar con él, teniendo en cuenta especialmente la velocidad y las condiciones de adherencia y frenado. No obstante, se permitirá a los conductores de bicicletas circular en grupo sin mantener tal separación, extremando en esta ocasión la atención, a fin de evitar alcances entre ellos;
- El artículo 64, sobre prioridad de paso de los ciclistas, detalla que, como regla general, y siempre que sus trayectorias se corten, los conductores tienen prioridad de paso para sus vehículos en la calzada y en el arcén, respecto de los peatones y animales, salvo en los casos enumerados en los artículos 65 y 66, en que deberán dejarlos pasar, llegando a detenerse si fuera necesario. Los conductores de bicicletas tienen prioridad de paso respecto a los vehículos de motor:
 - Cuando circulen por un carril bici, paso para ciclistas o arcén debidamente señalizados,
 - Cuando para entrar en otra vía el vehículo de motor gire a derecha o izquierda, en los supuestos permitidos, y haya un ciclista en sus proximidades,
 - Cuando circulando en grupo, el primero haya iniciado ya el cruce o haya entrado en una glorieta,
 - En los demás casos serán aplicables las normas generales sobre prioridad de paso entre vehículos.
- El artículo 118 señala que los conductores de bicicletas y, en su caso, los ocupantes estarán obligados a utilizar cascos de protección homologados o certificados según la legislación vigente, cuando circulen en vías interurbanas, salvo en rampas ascendentes prolongadas, o por razones médicas que se acreditarán conforme establece el artículo 119.3, o en condiciones extremas de calor. Los conductores de bicicletas en Introducción 31 competición, y los ciclistas profesionales, ya sea durante los entrenamientos o en competición, se regirán por sus propias normas.



Respecto a los adelantamientos a bicicletas, el Reglamento recoge:

- El artículo 85 señala que cuando se adelante fuera de poblado a peatones, animales o a vehículos de dos ruedas o de tracción animal, se deberá realizar la maniobra ocupando parte o la totalidad del carril contiguo de la calzada, siempre y cuando existan las condiciones precisas para realizar el adelantamiento en las condiciones previstas en este reglamento; en todo caso, la separación lateral no será inferior a 1,50 metros. Queda expresamente prohibido adelantar poniendo en peligro o entorpeciendo a ciclistas que circulen en sentido contrario. Del mismo modo, el conductor de un vehículo de dos ruedas que pretenda adelantar fuera de poblado a otro cualquiera lo hará de forma que entre aquél y las partes más salientes del vehículo que adelanta quede un espacio no inferior a 1,50 metros;
- En el artículo 88 se establece que cuando en un tramo de vía en el que esté prohibido el adelantamiento se encuentre inmovilizado un vehículo que, en todo o en parte, ocupe la calzada en el carril del sentido de la marcha, salvo que la inmovilización venga impuesta por las necesidades del tráfico, podrá ser rebasado, aunque para ello haya que ocupar la parte de la calzada reservada al sentido contrario, después de haberse cerciorado de que se puede realizar la maniobra sin peligro. Con idénticos requisitos se podrá adelantar a conductores de bicicletas, ciclos, ciclomotores, peatones, animales y vehículos de tracción animal, cuando por la velocidad a que circulen;

Por otro lado, La Ordenanza de Circulación de Valencia publicada en 2010 pretende regular la circulación en las vías de competencia municipal centrándose en normativa aplicable en zona urbana. Aquellas materias que no se regulen expresamente en la Ordenanza, se aplicará la Ley sobre Tráfico y Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial. Como esta investigación no se centra en zona urbana, la normativa que considerará será la Ley mencionada en el punto anterior.

3.2. Análisis de capacidad y funcionalidad de la vía.

El Highway Capacity Manual desde ahora HCM es un manual que permite evaluar la capacidad y funcionalidad del tráfico en todos los elementos viarios, desarrollado por el Transportation Research Board (EE.UU). Sus objetivos son ayudar a investigadores e ingenieros mediante un sistema completo y consistente de técnicas para la evaluación de la calidad del servicio de carreteras y vías urbanas y además a establecer criterios políticos sobre las calidades de servicio deseables o apropiadas en cada caso. Este manual tiene diferentes aplicaciones y dependerá del tipo de estudio el criterio de evaluación o diseño que se utilizará. Debido a la ausencia de normativa española para la evaluación de la capacidad y funcionalidad del tráfico la instrucción de trazado hace referencia a este manual.



| Tipo de Carretera | Velocidad de Proyecto (km/h) | Nivel de servicio en la Hora de Proyecto del año horizonte |
|------------------------|------------------------------|--|
| Carretera convencional | 100 | D |
| | 80 | D |
| | 60 | E |
| | 40 (IMD ≥ 2000) | E |
| | 40 (IMD < 2000) | E |

Tabla 9 Nivel de servicio de una nueva carretera convencional (Ministerio de Fomento, 2016a).

3.2.1. Análisis de capacidad en tramos de carreteras convencionales según el HCM 2016

La capacidad de una carretera es la máxima intensidad que puede atravesar una sección dada de vía o absorber un determinado elemento viario, durante un periodo de quince minutos, en unas condiciones determinadas de la propia vía y del tráfico correspondiente, expresado en vehículos/hora y además no es única para cada tipo de carretera.

En carreteras convencionales las condiciones que favorecen la máxima capacidad son la ausencia de restricciones geométricas, de tráfico, o factores ambientales, es decir condiciones ideales que se pueden esperar dado el diseño y la operación normal son:

- Anchuras de carril mayores o iguales a 3.12 m (12 pies);
- Arcenes despejados más anchos o iguales a 1.82 m (6 pies);
- Tráfico equilibrado;
- Vehículos ligeros Exclusivamente;
- Perfil longitudinal llano;
- Corriente ininterrumpida del tráfico (sin semáforos, glorietas, etc.);
- 0% de zona de adelantamiento no permitido.

Con estas condiciones ideales la capacidad en carreteras convencionales de una calzada completa es de 3.200 vehículos ligeros/hora y en un sentido único es de 1.700 vehículos ligeros/hora (Camacho et al., 2017). En el HCM 6.0 se determinan las fórmulas para la capacidad fuera de las condiciones base. En condiciones base, la capacidad está limitada a los 1.700 vehículos ligeros/hora carril mencionados anteriormente.

| | |
|-----------------------------|--|
| $FFS = BFFS - F_{LS} - F_A$ | $ATS_d = FFS - 0,00776 (v_{d,ATS} + v_{o,ATS}) - f_{np,ATS}$ |
|-----------------------------|--|

Ecuación 1: Estimación de la velocidad a flujo libre y velocidad media del recorrido (HCM, 2016)

La capacidad no está definida para bicicletas en las carreteras convencionales por falta de datos. Volúmenes de bicicletas cercanos a la capacidad no ocurren a menudo en carreteras convencionales, excepto durante eventos especiales para bicicletas, y hay poca información disponible sobre la cual basar una definición.



3.2.2. Análisis de funcionalidad en tramos de carreteras convencionales según el HCM 2016

Las carreteras convencionales tienen un carril para el uso de tráfico en cada dirección provocando que las maniobras de adelantamiento utilicen el carril opuesto. El manual considera además el tráfico de ciclistas por carreteras (con fines recreativos) aceptando que la calidad de servicio que tienen se ve afectada principalmente por la velocidad y volumen de tráfico que fluye adyacente, y por el grado de separación entre ciclista y vehículo a motor (solo un carril para circular en un sentido).

En el capítulo 15 del HCM, de carreteras convencionales, presenta metodologías para el análisis, diseño y planificación de estas que operan bajo flujo ininterrumpido, tanto para automóviles como bicicletas (Existe flujo ininterrumpido cuando no hay dispositivos de control de tráfico que interrumpen el tráfico y donde no se forman pelotones por intersecciones semaforizada) (HCM, 2016).

Debido a la variedad de este tipo de carreteras, la metodología establece tres clases de carreteras.

| Tipo de carretera | Características | Parámetros De desempeño |
|-------------------|---|-------------------------|
| Clase I | Los conductores esperan viajar a velocidades relativamente altas. Mayoritariamente estas sirven sobre a viajes de larga distancia, o facilita las conexiones entre las vías importantes. | ATS -PTSF |
| Clase II | los conductores no necesariamente esperan viajar a altas velocidades. Funcionan como acceso a las carreteras clasificadas como clase I y a menudo sirven a viajes relativamente cortos, el comienzo o fin de viajes más largos o viajes de turismo juegan un papel importante | PTSF |
| Clase III | Carreteras que circulan por zonas relativamente desarrolladas, Generalmente travesías de otras carreteras Clase I o II y muchas veces hay velocidad límite reducida impuesta, con muchos accesos a propiedades | PFFS |

Tabla 10 Tipos de carreteras según HCM 2016 (HCM, 2016).



Clase I



Clase II



Clase III

Fig. 15 Tipos de Carreteras Convencionales según HCM (Camacho, Esparza, & Soriano, 2017).

El HCM para clasificar y evaluar la calidad del servicio percibido por los viajeros sobre la funcionalidad de la vía considerando la comodidad, seguridad economía, fluidez define el parámetro de Nivel de Servicio, esto quiere decir que los niveles de servicio (LOS) representan la calidad del servicio. Se definen 6 niveles de servicio, del nivel A al F, siendo el nivel F el peor y A el de menor calidad percibida por los usuarios.

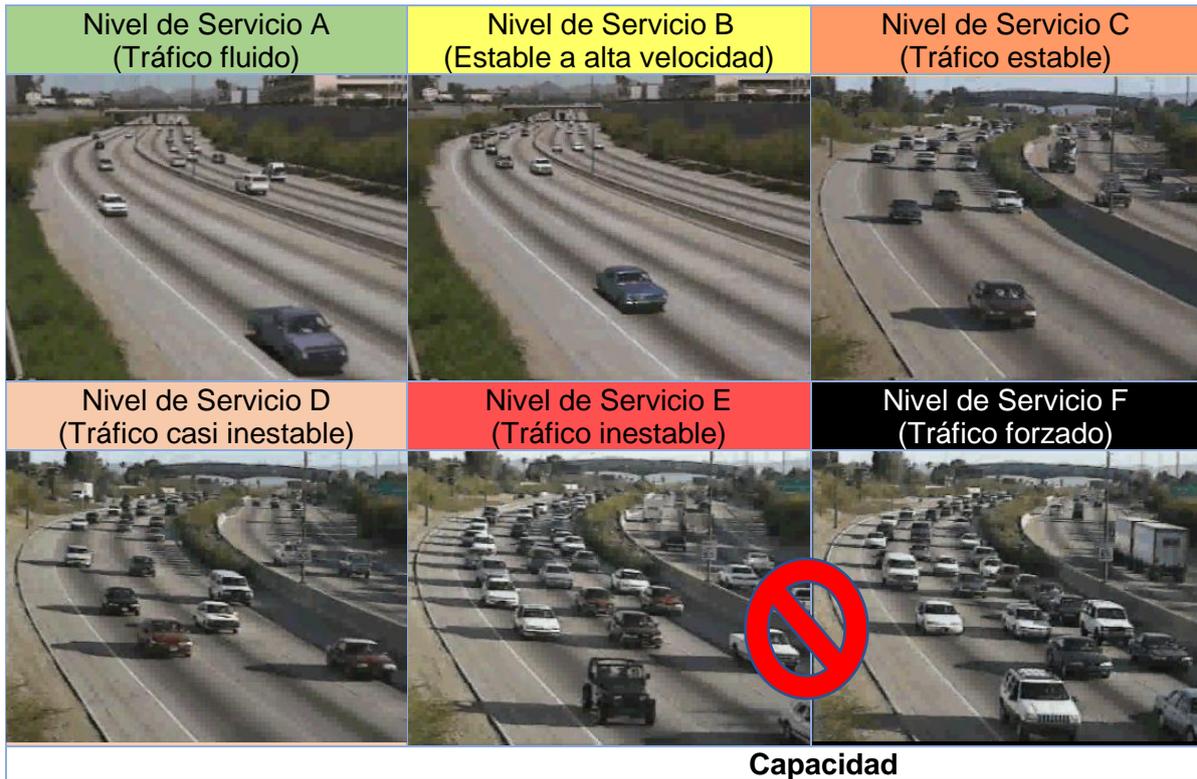


Fig. 16 Representación Niveles de Servicios HCM.

Como se puede observar en la Fig. 16, a medida que va bajando el nivel de servicio la velocidad de circulación se va disminuyendo y la intensidad va aumentando hasta llegar a la capacidad máxima. La imagen a continuación representa como interactúan la velocidad, capacidad e intensidad en los diferentes niveles de servicios.

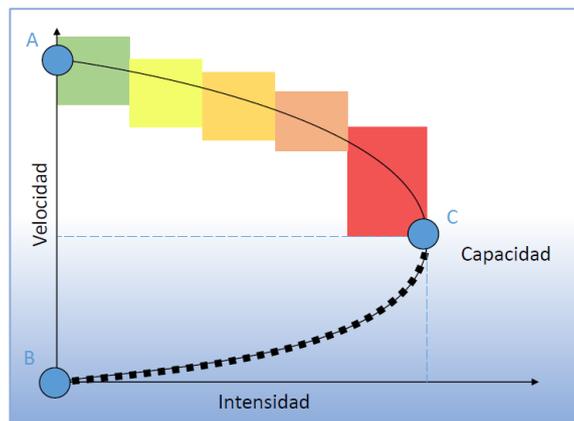


Fig. 17 Relación nivel de servicio con la velocidad, capacidad e intensidad (Camacho et al., 2017).

Debido a la variedad de los tipos de carreteras convencionales, el HCM define tres medidas de desempeño para la obtención del nivel de servicio para vehículos a motor, estos parámetros son (HCM, 2016):

- Velocidad promedio de viaje (ATS, average travel speed) refleja la movilidad en una carretera convencional. Se define como la longitud del tramo de carretera dividido por el tiempo promedio de viaje que toma a los vehículos a



- atravesarlo durante un intervalo de tiempo de diseño;
- Porcentaje de Demora por no rebase un vehículo, (PTSF, percent time spent following) representa la libertad de maniobra, el confort y la conveniencia del viaje. Es el porcentaje promedio de tiempo que los vehículos deben viajar en pelotones detrás de los vehículos más lentos debido a la incapacidad de adelantar. Debido a que esta característica es difícil de medir en el campo, una medida sustitutiva es el porcentaje de vehículos que circulen a menos de 3,0 segundos en un lugar representativo en el segmento de la carretera. PTSF también representa el porcentaje aproximado de los vehículos que viajan en pelotón;
- Porcentaje de la velocidad de flujo libre (PFFS, percent free Flow speed) cociente entre la velocidad media y la velocidad en flujo libre. Representa la capacidad de los vehículos para viajar en o cerca del límite de velocidad.

Para obtener el nivel de servicio para tipos de carreteras se utilizan diferentes combinaciones de los parámetros de desempeño debido a que las características funcionales de cada una son diferentes. En el caso de la estimación del nivel de servicio para carreteras tipo I, se consideran la velocidad promedio de viaje (ATS) y el porcentaje de demora por no rebase de un vehículo (PTSF) porque son carreteras donde se espera viajar a velocidades relativamente altas, para la estimación de las carreteras clase II, donde los conductores no necesariamente esperan viajar a altas velocidad se considera solo el porcentaje de demora por no rebase de un vehículo y por último para las carreteras tipo III, se considera el porcentaje de la velocidad de flujo libre (PFFS) ya que muchas veces estas carreteras tienen restricciones a la velocidad. A continuación, se resume el proceso para la determinación del nivel de servicio por tipo de carreteras.

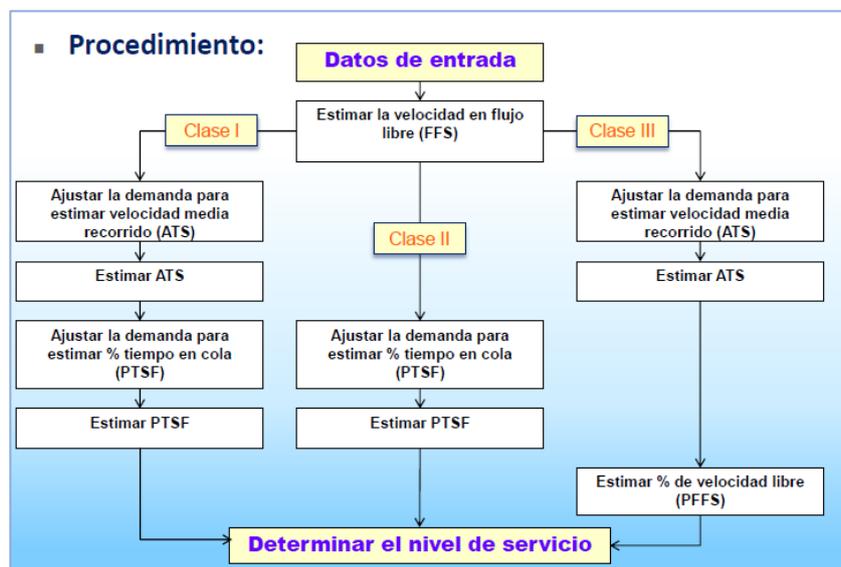


Fig. 18 Procedimiento para la determinación del nivel de servicio por tipo de carretera (Camacho et al., 2017).

Una vez obtenidos los diferentes índices de desempeños requeridos el HCM clasifica según los valores obtenidos que nivel de servicio. La figura a continuación presenta los diferentes rangos.



| LOS | Class I Highways | | Class II Highways | Class III Highways |
|-----|------------------|----------|-------------------|--------------------|
| | ATS (mi/h) | PTSF (%) | PTSF (%) | PFFS (%) |
| A | >55 | ≤35 | ≤40 | >91.7 |
| B | >50-55 | >35-50 | >40-55 | >83.3-91.7 |
| C | >45-50 | >50-65 | >55-70 | >75.0-83.3 |
| D | >40-45 | >65-80 | >70-85 | >66.7-75.0 |
| E | ≤40 | >80 | >85 | ≤66.7 |

Fig. 19 Criterios para la determinación del nivel de servicio (HCM, 2016).

Los niveles de servicio de bicicletas en carreteras convencionales se basan una puntuación de los niveles de servicio de bicicleta (BLOS), que a su vez se basa en un modelo de percepción del ciclista. Esta puntuación se basa, en orden de importancia, en cinco variables:

- Ancho efectivo medio del exterior del carril (arcén);
- Volumen de vehículos motorizados;
- Velocidades de los vehículos motorizados;
- Tráfico de vehículos pesados;
- Estado del pavimento.

En la siguiente tabla se pueden observar los niveles de servicio para bicicletas en carreteras convencionales.

| Niveles de Servicio | Puntuación de los Niveles de Servicio de Bicicletas |
|---------------------|---|
| A | ≤ 1,5 |
| B | > 1,5 – 2,5 |
| C | > 2,5-3,5 |
| D | > 3,5-4,5 |
| E | > 4,5-5,5 |
| F | > 5,5 |

Tabla 11 Nivel de servicio para bicicletas en carreteras convencionales. (HCM, 2016).

Las limitaciones de la metodología de la bicicleta es que se desarrolló con los datos recogidos en calles urbanas y suburbanas, incluidas las vías que se definen como carreteras convencionales suburbanas. Aunque la metodología se ha aplicado con éxito en carreteras de convencionales rurales en diferentes partes de los Estados Unidos, los usuarios deben ser conscientes de que las condiciones en muchas carreteras convencionales de zonas rurales estarán fuera de la gama de los valores utilizados para desarrollar el modelo LOS bicicleta. Los rangos de los valores utilizados en el desarrollo del modelo de nivel de servicio bicicleta (5) son los siguientes:

- Ancho del extra del carril exterior: 3,05 a 4,87 m. (10 a 16 ft);
- Ancho de la berma: 0 a 1,83 m. (0 a 6 ft);
- Volúmenes de vehículos motorizados: hasta 36.000 tráfico promedio diario anual (AADT);
- Velocidad Límite: 45 a 50 km/h;
- Porcentaje de vehículos pesados: 0% a 2%; y
- Condiciones del pavimento: 1 a 5 en la escala de calificación de pavimento de



la FHWA.

La metodología para determinar el nivel de servicio para bicicletas tampoco considera diferencias en el comportamiento prevalente del conductor, aunque el comportamiento del conductor puede variar considerablemente tanto a nivel regional y por las características de la vía. En particular, la probabilidad de que los conductores bajen la velocidad o proporcionen separación lateral adicional al pasar ciclistas juega un papel importante en la percepción de calidad de servicio de una carretera (HCM, 2016).

3.3. Maniobra de adelantamiento vehicular

A continuación, se presenta la descripción de la maniobra de adelantamiento realizada por los vehículos y los modelos de distancia de visibilidad que son considerados para la maniobra de adelantamiento.

3.3.1. Descripción de la maniobra de adelantamiento

La maniobra de adelantamiento se ejecuta para evitar interferencias entre vehículos a distinta velocidad para mejorar la calidad de circulación. Esta consiste en sobrepasar a un vehículo de adelante que circula en el mismo sentido una velocidad inferior a la deseada. Sin embargo, en carreteras convencionales la maniobra de adelantamiento es compleja ya que es necesario invadir el carril de sentido contrario de tráfico afectando la funcionalidad de la vía y la seguridad vial ante una posible colisión.

La maniobra de adelantamiento consta de diferentes etapas, que incluyen desde el momento en que el vehículo que quiere adelantar se acerca al vehículo siguiente, hasta que finaliza la maniobra. Para poder distinguir entre los vehículos involucrados en la maniobra, se llama vehículo adelantado al vehículo más lento (o vehículo líder mientras se realiza la maniobra), es decir, es el vehículo que produce que se realice el adelantamiento (debido a su velocidad inferior); y el vehículo rápido, que realiza la maniobra. Además, este vehículo se clasifica de según en qué etapa del adelantamiento se encuentre, siendo vehículo seguidor antes de que se ejecute el adelantamiento, y vehículo adelantante durante la maniobra.

Las diferentes etapas de la maniobra de adelantamiento se explican en la tesis doctoral “Análisis del adelantamiento en carreteras convencionales y propuestas de modelos para la mejora del diseño y de la señalización de las mismas” realizada por Carlos Llorca García (Llorca, 2015):

1. **Deseo:** 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 pero además influyen la impaciencia por demoras, o el tiempo restante de viaje pueden modificar este deseo. En caso de que el deseo sea positivo, en la siguiente etapa el conductor decide adelantar o no en función de las características y condiciones del tráfico, vía, del vehículo. en



- caso contrario el vehículo seguidor continua detrás del vehículo líder;
- 2. Decisión:** 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. El vehículo seguidor decide aceptar o rechazar los huecos en función de su tamaño y de su estimación de distancia de adelantamiento necesaria;
 - 3. Ejecución:** Aceptado el hueco, el vehículo seguidor desde ahora adelantante inicia la maniobra invadiendo 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 y termina la maniobra.

Un punto importante para considerar es que, si durante la ejecución de la maniobra de adelantamiento aparece un vehículo en sentido opuesto, se puede optar por abortar la maniobra. A partir de cierto punto, que muchos autores coinciden en llamar posición crítica, es más seguro y rápido completar la maniobra que abortarla.

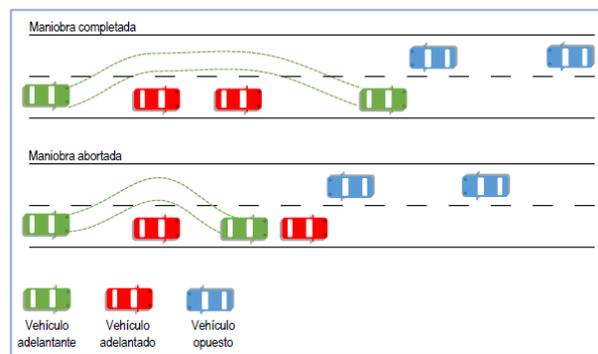


Fig. 20 Esquema de la maniobra de adelantamiento y vehículos implicados (Llorca, 2015).

Por otro lado, existen dos formas de comenzar la maniobra de adelantamiento, una se define como maniobra lanzada que ocurre cuando el vehículo adelantante no necesita desacelerar porque realiza el adelantamiento inmediatamente después de acercarse al vehículo líder, en este tipo de maniobra las diferentes fases ocurren en un muy corto tiempo. Por el contrario, si el vehículo que se acerca al líder debe disminuir su velocidad y mantenerse detrás, se habla de adelantamiento en seguimiento.

Dada la complejidad de esta maniobra, existe un número elevado de factores que tienen una influencia en la maniobra. A continuación, se presentan algunos factores descritos por (Llorca, 2015):

- Factores dependientes de las características y condiciones de la vía (afectando la visibilidad disponible);
- Factores relacionados con la velocidad de operación, volumen y composición del tráfico;
- Factores relacionados con el conductor dado que la maniobra depende de varios procesos de percepción y decisión;
- Factores externos como son las condiciones meteorológicas, la luminosidad



(diurno y nocturno).

Las posibilidades de adelantamiento que ofrece cada carretera tienen una estrecha relación con la calidad de circulación (nivel de servicio). De modo que, si en una carretera no existen muchas oportunidades de adelantamientos ya sea por uno de los factores mencionados, la calidad de circulación será peor en comparación a una con mayores oportunidades de adelantamiento. Para garantizar la calidad de circulación, es que los diseños de carreteras convencionales exigen un nivel de servicio para el año horizonte D y E (según la velocidad de proyecto) y además deben procurar obtener tramos con la máxima longitud posible, en los que la visibilidad de adelantamiento sea mayor que la distancia de adelantamiento.

La peligrosidad de esta maniobra es alta debido a la invasión del carril contrario en el caso de las carreteras convencionales y también a la presencia dos o más vehículos cuyas trayectorias se aproximan (vehículo adelantante, líder y opuesto). Aunque la frecuencia de choques frontales, alcances, salidas de vía, entre otros sea inferior a la de otros tipos de maniobras, la siniestralidad es muy alta.

Una variable importante y necesaria en toda maniobra de adelantamiento, es la distancia de visibilidad de adelantamiento que 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, esta distancia es la suma entre la distancia recorrida por el adelantante al efectuar la maniobra, una distancia de seguridad en caso de abortar la maniobra y la distancia recorrida por el vehículo opuesto durante el mismo tiempo (Ministerio de Fomento, 2016a) En la instrucción 3.1 IC para diseño geométrico del Ministerio de Fomento se presentan los criterios para garantizar que la visibilidad disponible a lo largo de las carreteras sea superior a la distancia de adelantamiento.

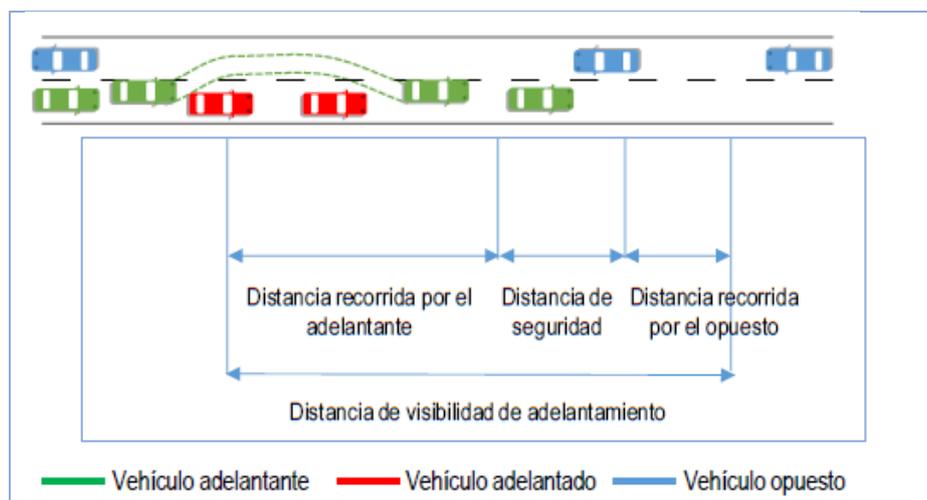


Fig. 21 Distancia de visibilidad de adelantamiento.



3.3.2. Modelos de distancias de visibilidad de adelantamiento.

Desde los treinta del siglo XX comenzó el interés de los investigadores por analizar la maniobra de adelantamiento, realizando las primeras mediciones con técnicas manuales. Actualmente existe una gran variedad de investigaciones sobre este tema, enfocándose principalmente en la definición de modelos de distancia de visibilidad de adelantamiento. Debido a la complejidad de describir y analizar esta maniobra, existe una dispersión elevada de los valores propuestos por las diferentes investigaciones debido a la gran cantidad de factores que influyen en la maniobra, y en el carácter aleatorio de muchas de ellas como por ejemplo los factores propios del conductor (percepción y reacción).

Entre los años 1939 y 1941 se realizaron los dos primeros estudios de campo en Estados Unidos, a partir de observaciones naturalísticas que permitieron calibrar el modelo de distancia de adelantamiento publicado en la normativa americana, así como en posteriores revisiones del mismo, hasta llegar a su quinta edición (AASHTO, 2004). En el año 1971 Van Valkenburg y Michael (1971) publicaron un modelo para distancias de adelantamiento, basado por primera vez en el concepto de la “posición crítica” o “punto de no retorno” o “situación de decisión”, este concepto lo define como el punto (en espacio y tiempo) del recorrido del vehículo adelantante, a partir del cual es mejor completar la maniobra que abortarla. A partir de esta investigación los modelos posteriores siguieron dos enfoques muy diferentes, unos utilizando el criterio de posición crítica donde la distancia de adelantamiento necesaria no considera la distancia hasta alcanzar esta posición porque no se considerarían las maniobras abortadas.

Las siguientes investigaciones a Van Valkenburg que consideraban posición crítica, modificaron la definición de posición crítica. Weaver y Glennon (1972) la definen como el punto en que los tiempos necesarios para completar y para desistir de la maniobra son iguales, mientras que Harwood y Glennon (1989) la definen como la igualdad de distancias de visibilidad necesarias, en lugar de tiempos.

No obstante, y al igual que existen diferentes definiciones para la posición crítica, la forma de determinar dónde y cuándo se produce difiere entre los autores de distintos modelos. Lieberman es el primero que la calcula analíticamente la posición crítica, igualando las distancias de visibilidad para completar y desistir la maniobra (Lieberman, 1982). Glennon (1988) y posteriormente Hassan et al.(1996) asumen como correcta la definición de posición crítica igualando las distancias de visibilidad 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.

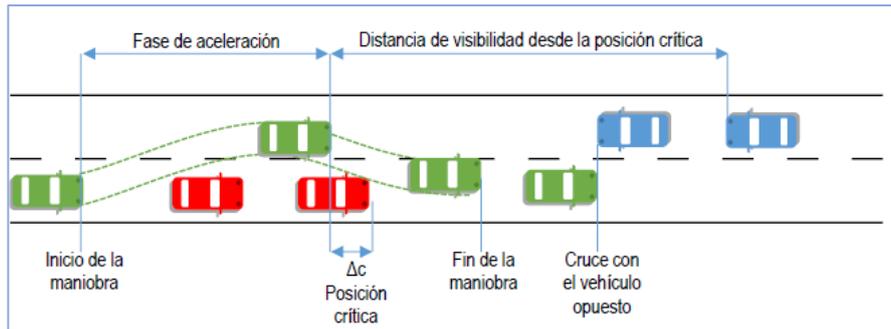


Fig. 22 Esquema de la maniobra y definición de variables en los modelos de (Glennon, 1988), (Harwood & Glennon, 1989) y (Hassan, Easa, & Abd El Halim, 1996).

Este planteamiento ha sido aceptado en la actualidad y forma parte de la normativa de diseño geométrico de EEUU (AASHTO, 2011). La siguiente figura muestra la distancia de visibilidad, de forma esquemática, necesaria para ambos supuestos, a lo largo de la posición donde se sitúa el vehículo adelantante.

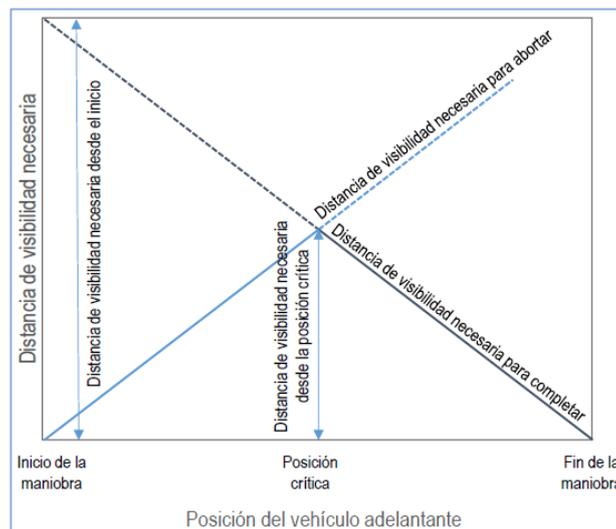


Fig. 23 Concepto de posición crítica (Llorca, 2015).

En el otro grupo de modelos, que no proporcionan la distancia de visibilidad necesaria desde la situación crítica, se encuentran el antiguo de la AASHTO (2014), Wang y Cartmell (1998) o Polus et al. (2000). Estos modelos describen la maniobra completa de adelantamiento desde el momento en que comienza, con el vehículo adelantante en el carril propio y detrás del adelantado, son modelos determinísticos que no usan el concepto de posición crítica y se basan en las ecuaciones de movimiento de los tres vehículos implicados. En estos modelos, se estiman distancias más elevadas, ya que las opciones de abortar la maniobra son muy pequeñas o en fases muy tempranas de la maniobra.

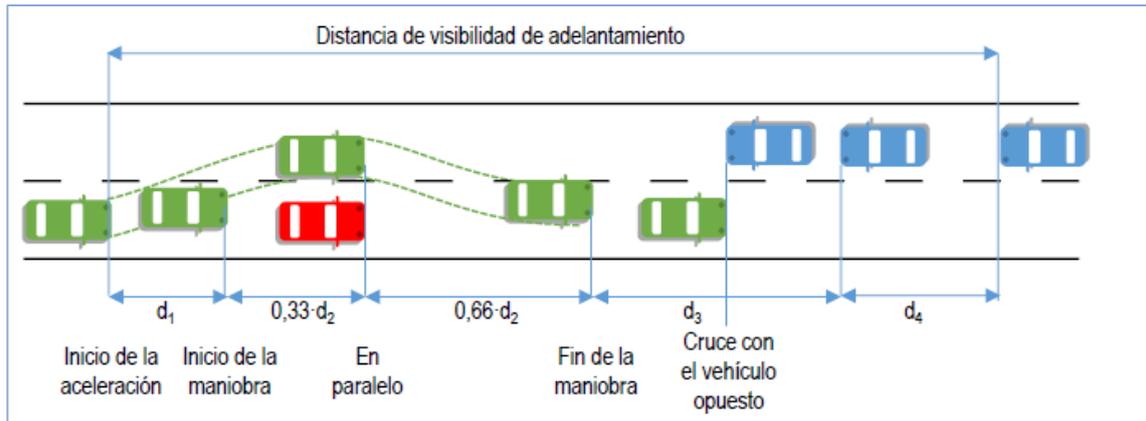


Fig. 24 Esquema de la maniobra y definición de variables en el modelo de la AASHTO (AASHTO, 2004).

Otro aspecto en el que los modelos difieren es en las velocidades de los tres vehículos implicados en la maniobra: el adelantado (V_i), el adelantante (V_p) y el opuesto (V_o). Es especialmente importante la relación que guardan esas tres velocidades entre sí (destacando la diferencia de velocidades entre adelantado y adelantante, definida como dV) y con las velocidades de diseño (V_d) y operación de la carretera (V_{85}). Muchos modelos asumen que el vehículo adelantante (y a menudo el opuesto) circulan 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 circula a una velocidad inferior. No teniendo en cuenta, por lo tanto, que durante el adelantamiento se podrían exceder las velocidades consideradas habituales para una localización determinada (Llorca, 2015).

Las diferencias de velocidades dV , según algunos autores, son constante y toman el valor de 16 o 18 km/h. Por contra, otros la definen 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 cuanto al vehículo adelantante, lo habitual es la consideración de un movimiento uniformemente acelerado (Moreno et al., 2017).

Otro de los parámetros de entrada de la mayoría de los modelos teóricos son 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) (Llorca, 2015). Entre los modelos que caracterizaron los vehículos por su longitud están el de Glennon (1988), Rilett et al. (1990), Hassan et al. (1996) o Wang & Cartmell (1998). Estos modelos se basaron en las ecuaciones que rigen el movimiento de los tres vehículos que participa en la maniobra.

La actitud de los conductores como se ha mencionado es un factor importante para tener en cuenta, por ello se emplean parámetros de percepción y reacción, distancias



de seguridad ya que son factores individuales representan una gran variabilidad y una difícil estimación ya empíricamente o analítica.

Como se ha mencionado al comenzar este apartado, podemos observar lo complejo que es de describir y analizar desde el punto de vista científico esta maniobra, prueba de ellos es la gran cantidad y variabilidad de modelos existentes.

Considerando estos modelos y evidenciando que ningún investigador ha basado la determinación de la posición crítica en datos experimentales, sino únicamente en modelos teóricos que no están validados, fue Llorca en el 2015, quien realizó un amplio estudio de campo grabando maniobras en diversos tramos de carretera convencional en los alrededores de Valencia. empleando 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 geoméricamente y señalar 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 (Llorca, 2015).

Otro de los resultados más significativos de Llorca, fue el desarrollo de un modelo de microsimulación para carreteras convencionales, integrado en un software de simulación de tráfico llamado AIMSUN. Este modelo de microsimulación se utilizará como base de este estudio para lograr representar los adelantamientos en carreteras convencionales.

3.4. Estudios referenciales sobre la presencia de bicicletas en carreteras convencionales.

La presencia de ciclistas en la calzada de carreteras interurbanas es un fenómeno cada vez más habitual. Del análisis realizado a la literatura, no se encuentran excesivas investigaciones en las que se analice la influencia de bicicletas en zonas interurbanas, así como las maniobras de adelantamientos o los efectos aerodinámicos a los que se ven sometidas los ciclistas. En cambio, la movilidad ciclista en ámbito urbano está siendo investigada, con diversas técnicas y



metodologías para la estimación de volúmenes ciclistas (Proulx et al., 2016; TRB, 2014).

En España, según el Reglamento General de Circulación, se obliga a los conductores a adelantar a ciclistas guardando más de 1,5 metros de separación lateral y los ciclistas están obligados a circular por el arcén o lo más próximos a la derecha de su carril, permitiendo que circulen dos ciclistas en paralelo, pero todos estos criterios carecen de una base científica.

En este apartado se procederá a realizar una revisión y recopilación del conocimiento existente en el ámbito de la presencia de ciclista en carreteras. El enfoque principal será el análisis de la maniobra de adelantamiento a ciclista segregando entre las observaciones sobre la distancia lateral, los efectos aerodinámicos sobre los ciclistas y las metodologías para la toma de datos.

3.4.1. Presencia de ciclista en entornos interurbanos

Desde finales de los setenta Watts comenzó a estudiar la maniobra de adelantamiento a bicicletas instalando una bandera o un disco horizontal en la parte trasera de las bicicletas y un chaleco reflectante al ciclista para aumentarla distancia a la que los vehículos lo adelantaban (Watts, 1979), este se consideró el comienzo de los estudios de campos que nacen a la necesidad de representar la maniobra de adelantamiento lo más exacto posible ya que los modelos teóricos y las normativas existentes en esos años eran insuficientes.

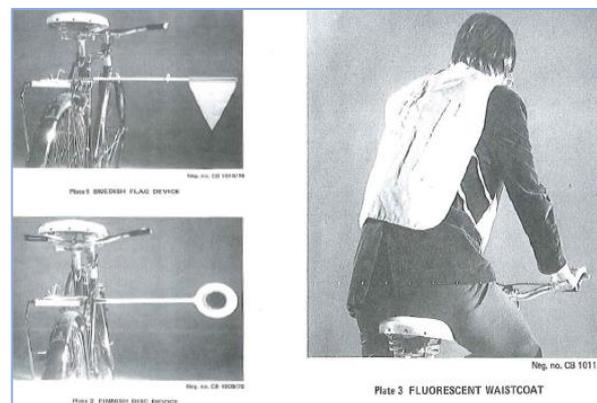


Fig. 25 Disposición de separadores y chaleco reflectante (Watts, 1979).

En el año 1984 Watts, implemento a los ciclistas con diferentes complementos de ropa para conocer el impacto sobre la distancia lateral utilizando un distanciómetro de ultrasonido. Todas investigaciones fueron muy innovadoras pero las tecnologías y metodologías utilizadas eran poco exactas y verídicas ya que se producía una gran influencia en la ejecución de la maniobra.

En este ámbito se ha detectado un salto cualitativo importante en las investigaciones mediante uso de bicicletas instrumentadas antes y después del año 1997, aunque las investigaciones realizadas por Watts han servido de referencia para en



investigaciones metodológicas, así como estudios sobre seguridad, accidentabilidad ciclista, percepción del ciclista y la interacción entre usuarios de una misma carretera.

Harkey y Stewart (1997) analizaron la incidencia en la separación de la existencia o no de carriles bici adosados o arcenes pavimentados en zona metropolitana. Tuvo en cuenta el tipo vehículo, la existencia de tráfico en el carril contrario, la colocación lateral del ciclista y del vehículo en la vía o la invasión por el conductor del carril contrario. Concluyendo que en general, la presencia de una línea de separación entre los ciclistas y los vehículos reducía el número de maniobras extrañas y aumenta el nivel de comodidad para los usuarios de la carretera (Harkey & Stewart, 1997).

Hunter (1999) evaluó la influencia de las carreteras con arcenes pintados de color rojo sobre la velocidad de los vehículos que circulan por estas vías, así como la interacción entre estos vehículos y los ciclistas existentes. Concluyendo que el 80% de los ciclistas circulaban por el arcén, la separación lateral fue menor en tramos con arcenes coloreados y no existe diferencia de la velocidad media de los vehículos antes y después del arcén coloreado (Hunter, 1999).

Parkin junto a otros investigadores en 2006, realizaron los primeros estudios que incluían la percepción de los riesgos de los ciclistas en tramos e intersecciones en zonas urbanas. En el 2009, con el objetivo de mejorar el estudio anterior, es que realizó una recolección de datos de maniobras de adelantamientos de vehículos. Concluyendo que los conductores mantenían menores distancias en las maniobras de adelantamiento sobre los ciclistas que en tramos de carretera sin carril bici. Por lo tanto, los carriles bici no proporcionaban mayores separaciones en todas las condiciones (Parkin & Meyers, 2009; Parkin et al., 2007).

Algunos investigadores como Chapman y Noyce (2012), Love et al. (2012), García et al. y Walker (2007) estudiaron las maniobras de adelantamiento de vehículos a motor a partir de una bicicleta con instrumentada con cámaras de video y medidores de distancia láser o de ultrasonidos que circularía de forma individual. En general, obtuvieron reducidas muestras de maniobras, a excepción de Walker que sí midió más de 2000. Analizaron algunos de los factores que pueden afectar al comportamiento del conductor al adelantar, como la existencia de arcenes, el tráfico en sentido opuesto o el sexo del ciclista (Chapman & Noyce, 2012; García et al., 2015; Love et al., 2012; Walker, 2007).



Fig. 26 Bicicleta Instrumental utilizada (Chapman & Noyce, 2012).

En el 2012, se evaluó la disposición lateral de los vehículos durante los adelantamientos a ciclistas, centrándose en la influencia de las bandas sonoras de la línea central de la calzada y en arcenes. Concluyendo que Los conductores eran



menos propensos a contactar con la línea central cuando existen bandas sonoras en las líneas centrales. Estas reducciones fueron iguales en otros lugares donde los ciclistas no estaban presentes (Savolainen et al., 2012).

Varias investigaciones sobre adelantamientos a ciclista, invasión de carril del sentido contrario, análisis de accidentes y conflictos en intersecciones se han desarrollado en entornos urbanos pero debido a que las velocidades desarrolladas en carreteras y los diferentes diseños de intersecciones hacen compleja la extrapolación de los resultados obtenidos en áreas urbanas (Chuang et al., 2013; Isaksoon et al., 2017; Kay et al., 2014; Schleinitz et al., 2016)

Dozza y Werneke (2014) recopilaron y analizaron eventos críticos sufridos por ciclistas en entorno urbano y periurbano a partir de la toma de datos naturalísticos. Ya en el 2016 Dozza et al. equiparon una bicicleta con sensores Lidar de modo que pudieron caracterizar con mayor detalle la posición del vehículo adelantante en toda su trayectoria y considerando la influencia de la presencia de tráfico opuesto, velocidad de adelantamiento y tiempo de adelantamiento, el ancho de carriles y arcenes, la visibilidad o el límite de velocidad, en 154 maniobras en carreteras rurales (Dozza et al., 2016; Dozza & Werneke, 2014). A continuación, se muestran las bicicletas instrumentalizadas utilizadas en los dos estudios.

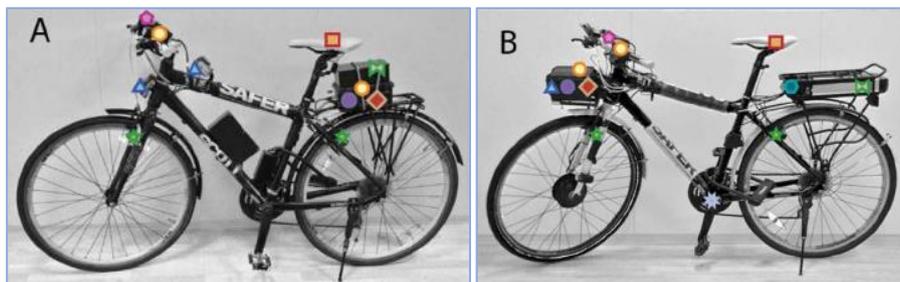


Fig. 27 Bicicletas instrumentalizadas utilizadas (Dozza & Werneke, 2014).



Fig. 28 Bicicletas instrumentalizadas utilizadas (Dozza, Schindler, Bianchi-Piccinini, & Karlsson, 2016).

La N.Z. Transport Agency (2016) analizó la separación durante la maniobra adelantamiento en zonas urbanas e interurbanas valorando la anchura del arcén y la comodidad por parte del ciclista durante la misma para imponer legalmente una separación mínima durante la maniobra de adelantamiento en Nueva Zelanda. Concluyendo que las separaciones mínimas y medias registradas fueron ligeramente mayores en carreteras rurales comparadas con las urbanas y relativamente pocas



maniobras registraron separaciones inferiores a 1,00 m en tramos urbanos y 1,5 m en tramos interurbanos (NZ Transport Agency, 2016).

Además, de estudios basados en datos tomados en campo, también se han estudiado esta maniobra y la influencia de la sección transversal en ella, en simuladores de conducción. Bella y Silvestri, analizaron los efectos que tres configuraciones de sección transversal distintas tienen en el comportamiento de los conductores ante la presencia de ciclistas. Su estudio se basó en la separación lateral y en la diferencia entre la velocidad que vehículos motorizados desarrolla en la ausencia de ciclistas y ante la presencia de uno de ellos (Bella & Silvestri, 2017).

3.4.1.1. *Estudios considerando la circulación de más un ciclista en entornos interurbanos*

Todas las investigaciones mencionadas en el anterior apartado se han centrado en el adelantamiento a una sola bicicleta. De hecho, el número en los que se haya analizado el comportamiento del conductor al adelantar a un grupo de ciclista es mucho más reducido, y ninguno de los estudios consideró la velocidad relativa entre ambos usuarios durante el adelantamiento.

El Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC) de la Universitat Politècnica de València (UPV) ha realizado investigaciones para estudiar el impacto en la seguridad vial y en la funcionalidad vía por la que la circulan bicicletas tanto de forma individual, como en grupo.

Entre el año 2014 y 2016 se llevó a cabo el proyecto CASEFU, estudio experimental de la funcionalidad y seguridad de las carreteras convencionales (TRA2013-42578-P). En este proyecto, además de perfeccionar el estudio de la funcionalidad del tráfico motorizado, se realizó una investigación exploratoria sobre la distribución de velocidades de ciclistas (y su agrupamiento en pelotones) al circular en carreteras convencionales. Para ello, se equipó a una muestra reducida de ciclistas pertenecientes a una peña con cámaras de acción con GPS, registrando de forma naturalística sus recorridos en dos etapas. Los resultados, pese al reducido tamaño de la muestra, permitieron caracterizar de forma clara la elección de velocidades por parte de los ciclistas, afectada fuertemente por el trazado en alzado. Se dedujo, además, que en tramos llanos los ciclistas tienden a agruparse en grupos más grandes y llevan velocidades poco sensibles al trazado en planta, mientras que en bajadas circulan individualmente, con una velocidad muy dispersa tanto entre individuos como a lo largo del trazado, claramente determinada por las curvas en planta (Llorca et al., 2015).

García et al. (2015), gracias a una instrumentación de dos bicicletas de carretera similar a Llorca et al 2017, que utilizó una bicicleta equipada con cámaras, analizaron el adelantamiento de vehículos motorizados a diferentes configuraciones de bicicletas: bicicleta circulando aisladamente, dos bicicletas en paralelo, dos bicicletas en línea, tres bicicletas en línea y una bicicleta seguida de dos en paralelo. Del análisis concluyeron que la mayor separación lateral se produce con las tres bicicletas circulando en línea, siendo la menor en aquellas configuraciones en las que hay dos bicicletas en paralelo. Asimismo, observaron que las mayores



velocidades relativas se producen cuando el grupo de ciclista circulan en línea (García et al., 2015; Llorca et al., 2017).

La tesis doctoral Establecimientos de parámetros de riesgo para la seguridad de los ciclistas durante las maniobras de adelantamientos en carreteras convencionales realizada por Vicente Ferrer (2017), se centró en el análisis de este fenómeno del adelantamiento de vehículos a ciclistas en carreteras convencionales con el fin de profundizar en la determinación de los niveles de riesgo asociados. El análisis lo realizó mediante la instrumentación de una bicicleta de carretera y otra de montaña recopilando datos in situ de adelantamientos a lo largo de varias carreteras convencionales de las Provincias de Valencia y Castellón, tomándose datos sobre separaciones, velocidades, trayectorias, etc., a través de observaciones naturalistas.

Los datos recopilados fueron analizados y a partir de ellos se establecieron diferentes parámetros de riesgo asociados a la maniobra de adelantamiento y se propusieron una serie de recomendaciones para el diseño y explotación de carreteras convencionales que permitan mejorar la seguridad de los ciclistas. Igualmente recopiló datos de accidentalidad tanto de las carreteras en las que se realizaron las pruebas como de otras adicionales de la Comunidad Valenciana, permitiéndole establecer correlaciones entre los parámetros de riesgo y la accidentalidad previsible, desarrollando un modelo para la estimación de accidentes (Ferrer Pérez, 2017).

En el caso de la seguridad vial, no se ha profundizado en otros posibles conflictos, como los relacionados con el alcance de vehículos a bicicletas (especialmente importante en carreteras sinuosas con alta pendiente) o salidas de vía de bicicletas aisladas por exceso de velocidad. Asimismo, existe una problemática adicional derivada del limitado uso que los ciclistas hacen de los carriles bici segregados del tráfico, prefiriendo circular por la calzada. En este sentido, a la peligrosidad existente consecuencia del tráfico mixto hay que añadir la peligrosidad consecuencia de la existencia de un elemento de separación, que en caso de alcance a bicicletas puede aumentar la gravedad del accidente. Los factores que llevan a los ciclistas a tomar esta decisión no se han estudiado previamente.

Actualmente el Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC) de la Universidad Politècnica de Valencia, está trabajando el proyecto Bike2lane: Mejora de la seguridad y operación de carreteras convencionales con ciclista, que analizará el impacto de la presencia de tráfico ciclista en entornos interurbanos, tanto en la funcionalidad como en la seguridad y además busca mejorar la operación y seguridad mediante sistemas de ayuda y modificaciones en los criterios de diseño y explotación. En concreto, se estudiarán los niveles de demanda ciclista y su variación horaria, semanal y estacional a partir de aforos. Además, se obtendrán modelos de estimación y agrupamiento de la velocidad de bicicletas en función del trazado, partiendo de los datos naturalísticos obtenidos al equipar peñas ciclistas mediante cámaras de acción. Todos los datos se usarán, en primer lugar, para desarrollar un modelo de microsimulación de tráfico de carreteras convencionales con bicicletas, que se integrará en un software de microsimulación, para caracterizar la reducción de capacidad y nivel de servicio causada por bicicletas, llegando a obtener una



metodología de cálculo de niveles de servicio con ciclistas (Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), 2019).

3.4.2. Fuerzas aerodinámicas que experimenta el ciclista

La estabilidad de circulación del ciclista se puede ver afectada debido a los efectos aerodinámicos generados por la presencia de vehículos de mayor tamaño durante la maniobra de adelantamientos.

El U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (USDOT FHWA, 1977), en su publicación “A Bikeway Criteria Digest. The ABCD’S of Bikeways” incluyó una correlación entre la velocidad de adelantamiento de camiones y la fuerza aerodinámica generada sobre un ciclista en función de la separación sobre éste. En esta correlación se marca el límite admisible de la fuerza lateral sobre un ciclista entorno de 16,5 N considerando un adelantamiento a 96 km/h y una distancia de 1,8 m. Un punto importante de este estudio que no se logra explicar es que, si el adelantamiento ocurre a una separación superior a 3,3 metros aproximadamente el ciclista no se ve afectado por esta fuerza. Este criterio de 16,5 N se ha seguido utilizando hasta la actualidad como referencia a nivel de interacción entre vehículos pesados y ciclista.

En 1981 Kato et al. analizaron los efectos aerodinámicos generados durante el adelantamiento de un vehículo a un ciclista mediante un modelo reducido de laboratorio, estableciendo los coeficientes aerodinámicos vinculados al empuje de la fuerza perpendicular aerodinámica generada por el vehículo sobre la bicicleta en base a la separación durante la maniobra (Kato et al., 1981).

Desde el año 2005, se comenzó a analizar los efectos aerodinámicos generados durante el adelantamiento de un vehículo a otro mediante un modelo a escala en laboratorio determinando los coeficientes aerodinámicos resultantes en función de la relación entre la separación y la anchura del vehículo (Noger et al., 2015). A partir del estudio de Noger et al. en el 2005, es que Ata y Langlois y Corin et al. es que realizaron investigaciones teóricas o experimentales en túneles de viento, que sí resaltan que las fuerzas aerodinámicas que experimenta el ciclista se deben tanto a una distancia reducida como a una velocidad relativa elevada (Ata & Langlois, 2011; Corin, He, & Dominy, 2008), sin considerar la anchura del vehículo como un factor importante ya que fue un estudio experimental.

3.4.3. Metodologías empleadas para la toma de datos

Se han logrado detectar diferentes metodologías prácticas para la toma de datos, estas se detallan a continuación.

3.4.3.1. Toma de datos a través de la instrumentación de bicicletas.

En esta metodología se realiza la toma de datos a partir de la instrumentación de una bicicleta mediante la disposición en la misma de diferentes instrumentos de



medición y/o grabación de imágenes. Son instrumentos utilizados pueden ser los siguientes (Ferrer Pérez, 2017):

- Distanciómetro de ultrasonidos: Permite medir la distancia entre el aparato y el vehículo adelantante;
- Cámara de fotos: Permite medir la distancia sobre las fotos tomadas sobre los vehículos que adelantan a la bicicleta;
- Cámara de vídeo: Permite la grabación de los adelantamientos para su posterior análisis;
- GPS: Permite recoger la información en cada momento tanto de la posición de la bicicleta como de su velocidad;
- Puntero láser: Colocado en un punto fijo de la bicicleta y señalando hacia el pavimento, permite al ciclista mantener una distancia sensiblemente constante respecto a una referencia como puede ser la línea de arcén;
- Colector LIDAR: Colocado en la parte trasera de la bicicleta realiza un barrido continuo de la posición del vehículo adelantante durante la maniobra de adelantamiento.

Esta información se graba en las memorias internas de los dispositivos o en dispositivos de almacenamiento externo.

3.4.3.2. Grabación desde cámaras de videos

Se han detectado dos tipos de metodologías. Por un lado, nos encontramos con aquella que se basan en el análisis de imágenes grabadas desde cámaras fijas en un tramo más o menos corto en función del alcance y resolución de la cámara. Por otro lado, tenemos las que se basan en la colocación de la cámara en un vehículo móvil que va grabando a los vehículos que lleva delante. En ambos casos, las imágenes grabadas requieren un posterior análisis y tratamiento en gabinete para medir una a una las distancias de separación en los adelantamientos (Ferrer Pérez, 2017).

3.4.3.3. Toma de datos mediante observaciones visuales para su posterior análisis

Estas experiencias consisten, básicamente, en la toma de datos referentes a aspectos como el uso del caso, chalecos reflectantes, ciertas características de los ciclista, para posteriormente, realizar un análisis de la información obtenida. Realmente, es una modalidad más simple y alternativa a la toma de datos mediante cámaras de vídeo externas (Ferrer Pérez, 2017).

3.4.3.4. Análisis estadísticos basados en los datos de partes de accidentes

Consisten en la recopilación de partes de accidentes para luego proceder a su análisis centrándose en los contenidos específicos sobre los que se pretenda realizar la investigación. Esta metodología permite realizar análisis simples o de primera aproximación, pero suele estar limitada por el alcance de la información disponible en los partes, poco clara o profunda en muchos casos y con las limitaciones de la subjetividad de la persona que los ha elaborado (Ferrer Pérez, 2017).



3.4.3.5. Encuestas sobre comportamiento y percepción

Algunas investigaciones se basan en la realización de encuestas sobre una muestra de población referentes a diferentes aspectos relativos a su percepción sobre los ciclistas, hábitos, etc. Se enmarcan en el campo del análisis psicológico del comportamiento tanto de los ciclistas como de los conductores, pero no permiten abordar los detalles concretos del comportamiento in situ de los mismos. Debe tenerse en cuenta en estos análisis, además, el hecho del posible comportamiento condicionado y subjetivo de los participantes que puede distorsionar su forma de actuar o responder (Ferrer Pérez, 2017).

3.4.3.6. Simulaciones

Se basan en la toma de datos en campo de datos sobre diferentes tipos de vehículos, sus velocidades, comportamientos, maniobras, interacciones, etc. para luego introducirlas en un programa informático de simulación y, previa calibración, realizar modelizaciones sobre las maniobras de los diferentes vehículos y sobre sus interacciones (Ferrer Pérez, 2017).

3.4.3.7. Pistas de ensayo y modelización por ordenador

Para la estimación de las fuerzas generadas durante el adelantamiento se han realizado diversos ensayos a escala en pistas de laboratorio, disponiendo sensores en los vehículos a escala y obteniendo a través de ellos información sobre las sobrepresiones y fuerzas generadas y a partir de ellos se han deducido los coeficientes aerodinámicos y sus posibles correlaciones con algunos parámetros como la separación durante el adelantamiento y el ancho del vehículo adelantante. También se han utilizado estos datos para elaborar y calibrar modelos 2D/3D por ordenador (Ferrer Pérez, 2017).

3.5. Modelos de simulación

Los avances en la tecnología han permitido el desarrollo de simuladores de tránsito que poseen la capacidad de representar de forma aproximada la realidad de una ciudad, carreteras, intersecciones, etc. La simulación es una herramienta poderosa en el proceso de diseño o aprendizaje de un proyecto, que puede utilizarse para resolver cualquier problema relacionado con un sistema real del cual se haya obtenido previamente una modelización.

Las técnicas de simulaciones entregan una serie de ventajas, entre las cuales se puede destacar, tiempos bajísimos en el análisis del sistema de transporte, es decir, simular en segundos o minutos el comportamiento de horas, días o meses. También se puede destacar la posibilidad de visualizar detalladamente comportamientos y reacciones del sistema ante cambios en la red, flujo, tiempos, etc. En síntesis, una de las mayores virtudes de los modelos de simulación es lograr entregar información detallada frente a los posibles cambios del sistema pudiendo valorarlas, ayudando a anticipar problemas y comprobar las mejores soluciones.



3.5.1. Clasificación de los modelos de simulación

Un modelo es una representación de un objeto, sistema, o idea, cuyo propósito es ayudar a explicarlo, entenderlo o mejorarlo. Precisamente en el modelado reside la habilidad para analizar un problema: consiste en resumir las características esenciales del mismo, seleccionar y modificar las suposiciones básicas que caracterizan al sistema, y luego enriquecer y elaborar el modelo hasta obtener una aproximación útil.

Dentro de la ingeniería en general, se han generado una gran cantidad de herramientas computacionales para el análisis de diversos problemas y datos. Para la ingeniería de transporte existen distintos tipos de clasificación para los modelos de simulación que dependiendo de las características de los modelos que son consideradas como relevantes para realizar la clasificación (Reyes Latorre, 2014).

- **Continuos o Discretos:** Se tiene un sistema continuo cuando, los elementos de un sistema cambian de estado continuamente en el tiempo como respuesta a estímulos continuos. Por el contrario, un sistema discreto es cuando se realizan los cambios de estado en forma abrupta en ciertos momentos. Hay dos tipos de modelos discretos, que son aplicables según las características que quieren ser representadas:
 - Tiempo: El tiempo está dividido en segmentos por medio de intervalos conocidos, en cada uno de ellos el modelo registra actividades que cambian de estado,
 - Evento: Los cambios se realizan en forma abrupta, produciéndose eventos y actualizándose la información cada vez que uno de ellos sucede (semáforos, obstáculos, etc.).
- **Deterministas o Estocástico:** Modelo es determinista cuando el sistema no contiene ningún elemento aleatorio. En cambio, si alguno de sus componentes presenta una conducta probabilística se denomina estocástico, es decir, para valores de entrada conocidas no es posible asegurar los valores que tomarán las salidas;
- **Estáticos o Dinámicos:** Un modelo es estático cuando sus variables de estado no dependen del tiempo, y dinámico cuando presentan una dependencia temporal;
- **Cerrados o Abiertos:** Los sistemas cerrados no presentan ningún tipo de interacción con el ambiente que los rodea, son herméticos a cualquier influencia externa. En cambio, los modelos abiertos se relacionan con su entorno a través de entradas y salidas.

Una distinta clasificación surge considerando el nivel de atracción que presentan los modelos. Para entender esta clasificación de una forma más clara, se detallará la visión de los modelos frente a la maniobra de adelantamiento (Reyes Latorre, 2014).

- **Modelo Macroscópico:** Son relaciones deterministas de flujo, velocidad y densidad del flujo de tráfico. Los flujos modelados se pueden representar como un histograma o con valores escalares pero el cambio de carril no puede ser representados. Ejemplos de modelos macroscópicos son ESTRAUS, SATURN;
- **Modelos Microscópico:** Simulan el movimiento de vehículos de forma



individual basado en diferentes modelos. En la maniobra del cambio de carril, un vehículo determinado tiene en cuenta la situación todos los vehículos cercanos en los diferentes carriles. Ejemplos de modelos microscópicos son PARAMICS, AIMSUN NG, VISSUM, CORSIM, DRACULA;

- **Modelo Mesoscópico:** Son una combinación de los otros dos modelos. En este caso, al realizar el cambio de carril los vehículos tienen en cuenta la densidad de ocupación del carril a la hora de hacer el cambio y no consideran a los vehículos de forma individual. Ejemplos de modelo mesoscópico es TRANSYT.

Si bien para este proyecto podrían utilizar tanto modelos mesoscópicos como microscópicos para modelar la circulación de ciclistas en carreteras convencionales, se presentan las siguientes razones para elegir un modelo microscópico:

- El objetivo principal de los programas microscópicos es simular diferentes situaciones y permiten modelar correctamente las reducciones en la capacidad de las carreteras que se pueden deber a la presencia de ciclistas;
- Tienen un enfoque más detallado, flexible y más preciso para evaluar los impactos de los ciclistas;
- Los modelos microscópicos se distinguen de los macroscópicos en que estos hacen referencia a flujos de vehículos, considerándolos de forma agregada. Los modelos macroscópicos, no muestran la evolución de los vehículos durante su modelación;
- Los modelos microscópicos consideran modelos de seguimiento vehicular que permiten modelar la maniobra de adelantamiento;
- Los microsimuladores permiten realizar un análisis cuantitativo detallado, como los datos sobre los cambios en los tiempos de viaje, la longitud de la cola, el consumo de combustible o las posibles emisiones de contaminantes;

Estos modelos, además, son capaces de simular eventos excepcionales como accidentes, obras de construcción o de interrupciones de tráfico de manera temporal; Cada tipo de vehículo es asociado con características dimensionales (ancho, largo, velocidad máxima, etc.) y de comportamiento (aceptación de límites de velocidad o agresividad de conducción).

3.5.1.1. Revisión de microsimuladores

Existe actualmente un gran número de microsimuladores. Algunos de ellos son de carácter comercial mientras otros son utilizados sólo académicamente. A continuación, se presenta un listado con modelos de microsimulación reportados por Smartest (1999). En ella la categorización tiene relación con el tipo de condiciones de tráfico que son capaces de representar.

| Urbano | Autopista | Combinado | Otros |
|----------|-----------|------------|---------|
| CASIMIR | AUTOBAHN | AIMSUN | ANATOLL |
| DRACULA | FREEVU | CORSIM | PHAROS |
| HUTSIM | FRESIM | MITSIM | SHIVA |
| MICSTRAN | MIXIC | VISSIM | SIMDAC |
| NEMIS | SISTM | MELROSE | |
| NETSIM | | MICROSIM | |
| PADSIM | | FLEXSYT II | |



| Urbano | Autopista | Combinado | Otros |
|----------|-----------|-------------|-------|
| SIGSIM | | PARAMICS | |
| SIMNET | | PLANSIM-T | |
| SITRA-B+ | | TRANSIMS | |
| SITRAS | | INTEGRATION | |

Tabla 12 Modelos de Microsimulación (Lind et al., 1999).

Los microsimuladores más utilizados actualmente son principalmente AIMSUN, CORSIM, VISSIM.

3.5.2. Elección del microsimulador

Aunque casi ningún software comercial puede simular el comportamiento de ciclistas, y los que lo hacen (por ejemplo, Vissim) no se centran en la circulación e interacción de estas en carreteras convencionales, sino únicamente en ciudad, donde las velocidades y distancias laterales son muy diferentes. Ningún estudio ha considerado la posible afección de las bicicletas al nivel de servicio en un ámbito interurbano.

En concreto, para el estudio que se llevará a cabo, se ha decidido trabajar con el programa informático de microsimulación Aimsun que cuenta con un modelo de adelantamientos en carreteras convencionales y permiten modelar a los ciclista a nivel operativo (solo algunos microsimuladores tienen estas características). La elección del software Aimsun se debe a sus capacidades para la simulación de adelantamientos, y a la disponibilidad de licencias de software en el departamento en el que se llevó a cabo el estudio.

Por otro lado, se cuenta con una investigación de la Universidad Politècnica de Valencia, donde se utilizó el microsimulador AIMSUN para modelar las maniobras de adelantamiento. Específicamente, entre los años 2011 y 2013 se desarrolló el proyecto "PASSING - Desarrollo de modelos de distancias de visibilidad de adelantamiento" (TRA2010-21736), en el que se estudió, entre otros aspectos, la metodología para caracterizar la funcionalidad del tráfico y el nivel de servicio en carreteras convencionales. En el marco de PASSING se desarrolló el modelo de microsimulación para carreteras convencionales incluyendo adelantamientos entre vehículos a motor, en colaboración con la empresa TSS – Transport Simulation System (Llorca et al., 2015). Este modelo calibrado se utilizará como base para la aplicación de este estudio.



Fig. 29 Microsimulador seleccionado.



3.5.3. Microsimulador Aimsun

Aimsun – Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and not-urban Networks es un software de simulación de tráfico, desarrollado y comercializado Siemens con sede central en Barcelona (España). Aimsun Next es un software de modelado de tráfico que le permite modelar cualquier elemento, desde una sola intersección hasta una región completa. Con miles de usuarios con licencia en agencias gubernamentales, consultorías y universidades de todo el mundo, Aimsun Next destaca por la velocidad excepcionalmente alta de sus simulaciones y por la fusión de modelos de demanda de viajes, asignación de tráfico estático y dinámico con simulación mesoscópica, microscópica e híbrida, todo dentro de una sola aplicación de software (AIMSUN, 2019) . La última versión de Aimsun Next (versión 8.4, publicada el 7 de febrero de 2019) incluye mejoras significativas al software de modelado de tráfico Aimsun Next, tanto a nivel de plataforma como de modelado. Sus principales características son (Reyes Latorre, 2014):

- AIMSUN realiza una aproximación microscópica al problema, esto significa que el comportamiento de cada vehículo es continuamente modelado durante el período de simulación, mediante diferentes técnicas;
- La simulación puede realizarse bien basándose en estados de tráfico o bien en matrices de viajes origen/destino basadas en una zonificación previamente establecida;
- Las maniobras vehiculares son modeladas en detalle utilizando modelos de car-following, lane-changing y de aceptación de gap. Los dos primeros están basados en los modelos de Gipps los cuales serán explicados a continuación;
- Evaluación de políticas de velocidad variable y otros sistemas de transporte inteligente (ITS);
- Análisis del Manual de Capacidad de Carreteras (HCM);
- Cuenta con un modelo innovador de seguimiento para carreteras de dos carriles (Two Lane Car Following Model), que sirve para forzar los vehículos más rápidos a ponerse en el carril izquierdo para adelantar los vehículos más lentos.

3.5.3.1. Revisión de los modelos utilizados por Aimsun

Aimsun basa su funcionamiento en modelos capaces de representar el movimiento de cada vehículo sobre la base del comportamiento del conductor, siguiendo las normas dictadas por. A continuación se presenta una descripción y análisis de la teoría básica con la que los vehículos circulan por la red modelada y que sustentan la estructura del modelo de microsimulación AIMSUN (Transport Simulation Systems, 2014).

- Modelo de seguimiento (Car Following Model);
- Teoría de cambio de carril (Lane Changing);
- Teoría de aceptación de huecos (Gap Acceptance);
- Nuevos modelos de seguimiento vehicular.



3.5.3.1.1. Modelo de seguimiento vehicular (Car Following Model)

Se basa en el modelo Gipps (1981,1986), con algunas modificaciones, que determina el comportamiento de un vehículo dependiendo de su entorno. Está compuesto principalmente por dos componentes, aceleración y desaceleración. El primer componente representa la intención de un vehículo de alcanzar cierta velocidad deseada, mientras el segundo reproduce las limitaciones impuestas por el vehículo precedente al tratar de conducir a la velocidad deseada. La velocidad máxima a la que un vehículo (n) puede acelerar durante un período de tiempo (t, t+T) es:

$$V_a(n, t + T) = V(n, t) + 2.5a(n)T \left(1 - \frac{V(n, t)}{V^*(n)} \right) \sqrt{0.025 + \frac{V(n, t)}{V^*(n)}}$$

Donde:

V(n,t): velocidad del vehículo n en el momento t.

V*(n) : velocidad deseada por el vehículo n.

a(n) : máxima aceleración del vehículo n.

T : tiempo de reacción o intervalo de simulación.

Fig. 30 Velocidad máxima que un vehículo (n) puede acelerar (Transport Simulation Systems, 2014).

La máxima velocidad que el mismo vehículo (n) puede alcanzar durante el mismo intervalo de tiempo (t, t+T), de acuerdo con sus propias características y a las limitaciones impuestas por la presencia de un vehículo antecesor es:

$$V_b(n, t + T) = d(n)T + \sqrt{d(n)^2 T^2 - d(n) \left[2\{x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)\} - V(n, t)T \frac{V(n-1, t)^2}{d(n-1)} \right]}$$

Donde:

d(n): (<0) es la máxima desaceleración deseada por el vehículo n.

x (n, t): es la posición del vehículo n en el momento t.

x (n - 1, t): es la posición del vehículo precedente (n-1) en el momento t.

s (n - 1): es la longitud efectiva del vehículo (n-1).

d'(n - 1): es una estimación de la desaceleración deseada del vehículo (n-1).

Fig. 31 Velocidad máxima que un vehículo (n) con limitación de vehículos antecesor (Transport Simulation Systems, 2014).

La velocidad final del vehículo n durante el intervalo (t, t+T) es el mínimo entre las dos velocidades definidas previamente. Por lo tanto, la posición del vehículo n es actualizada considerando esta velocidad en la ecuación de movimiento:

$$X(n, t + T) = X(n, t) + V(n, t + T)T$$

Fig. 32 Velocidad definitiva del vehículo n durante el intervalo (t, t+T) (Transport Simulation Systems, 2014).



Como se aludió anteriormente, AIMSUN utiliza los modelos de Gipps con algunas modificaciones, las cuales se enumeran y se explican a continuación: la forma en que se calcula $V^*(n)$ en el modelo de Gipps, la influencia de los vehículos en pistas adyacentes y la influencia en la pendiente

- **$V^*(n)$ en el modelo de Gipps:** Un vehículo que circula libremente alcanza su $V^*(n)$ velocidad máxima deseada tomando en cuenta tres parámetros:
 - Velocidad máxima deseada por n : $V_{max}(n)$. Este es un parámetro del vehículo,
 - Acatamiento de la velocidad: $\Theta(n)$, que es el grado de acatamiento al límite de velocidad, el modelador puede agregarle una distribución de probabilidades con el fin de capturar el nivel de agresividad de los conductores,
 - Límite de velocidad de la sección: $S_{limit}(s)$, este es un parámetro de la sección.

El límite de velocidad para un vehículo en la sección s , $S_{limit}(n, s)$, está dada por:

$$S_{limit}(n, s) = S_{limit}(s) * \theta(n)$$

Fig. 33 Límite de velocidad (Transport Simulation Systems, 2014).

Por lo tanto, la velocidad máxima deseada por el vehículo n en la sección s está dada por:

$$V_{max}(n, s) = \text{Min}[S_{limit}(n, s), V_{max}(n)]$$

Fig. 34 Velocidad máxima deseada por vehículo n (Transport Simulation Systems, 2014).

Este último valor es el mismo que en modelo de Gipps aparece denotado como $V^*(n)$. La influencia de los vehículos en pistas adyacentes AIMSUN toma en consideración el efecto que tiene cierto número de vehículos manejando a menor velocidad por la pista de la derecha. El modelo calcula la velocidad media de los N vehículos que manejan aguas abajo por la pista de la derecha (MeanSpeedVehiclesDown), considerando sólo a los vehículos que están a una cierta distancia máxima (MaximumDistance) y considerando por separado el caso de accesos y el de pistas en general.

Para el caso que la pista derecha sea un acceso, la velocidad máxima del vehículo puede ser igual al valor del parámetro MeanSpeedVehiclesDown más el valor del parámetro MaximumSpeedDifferenceOnRamp (otro parámetro local del modelo). Para el resto de las pistas de acceso la velocidad máxima del vehículo puede ser igual al valor del parámetro MeanSpeedVehiclesDown más MaximumSpeedDifference (otro parámetro local del modelo). Este procedimiento asegura que la diferencia de velocidades entre pistas adyacentes siempre será menor que MaximumSpeedDifferenceOnRamp en el caso de accesos y a MaximumSpeedDifference en el resto de los casos.



- **Influencia en la pendiente:** La pendiente de una sección influye en el comportamiento vehicular por medio de un aumento o reducción de la aceleración o de las capacidades de frenado, por tanto, la aceleración del vehículo que es un parámetro local está dada por:

$$accel = Max \left\{ veh\ acc - \frac{pendiente * 9.81}{100}, veh\ acc * 0.1 \right\}$$

Fig. 35 Aceleración del vehículo (Transport Simulation Systems, 2014).

Esta formulación permite que la aceleración de un vehículo nunca pueda ser negativa, es más, nunca será menor que un 10% de su aceleración bajo pendientes de ninguna magnitud.

3.5.3.1.2. Modelo de cambio de pista (Lane-Changing)

Este modelo puede ser considerado como un desarrollo del modelo de cambio de pista de Gipps. Se modela el comportamiento como un proceso de decisión, donde se analizan las siguientes preguntas:

- **¿Es necesario el cambio de pista?** Depende de varios factores, como lo son la necesidad de los virajes, la distancia al siguiente viraje, y las condiciones de tráfico de la pista actual;
- **¿Es deseable cambiar de pista?** Se requiere verificar si habrá una mejora en las condiciones de tráfico al cambiar de pista (medida en términos de velocidad y distancia);
- **¿Es posible cambiar de pista?** Se verifica que haya una suficiente brecha para realizar el cambio. Para esto se calculan las condiciones de frenado del vehículo precedente de la nueva pista y las condiciones de frenado impuestas a los vehículos aguas arriba de la nueva pista.

Para representar el comportamiento del conductor al momento de cambiarse de pista se han definido tres zonas en una sección, cada una de las cuales corresponde a distintas motivaciones para el cambio de pistas:

- **Zona 1:** la decisión de cambio de pista se rige por las condiciones de tráfico presente;
- **Zona 2:** esta es la zona donde se realizan la mayor cantidad de cambios de pistas. La decisión se rige por el próximo viraje en una intersección o la salida de una autopista. Se busca la brecha necesaria y se realiza el cambio, sin afectar el comportamiento de las pistas adyacentes;
- **Zona 3:** los vehículos están obligados a ingresar a la pista de viraje deseada, reduciendo la velocidad e incluso deteniéndose de manera completa. Asimismo, los vehículos de la pista adyacente alteran su comportamiento, permitiendo que los vehículos que desean realizar el cambio de pista encuentren la brecha necesaria.

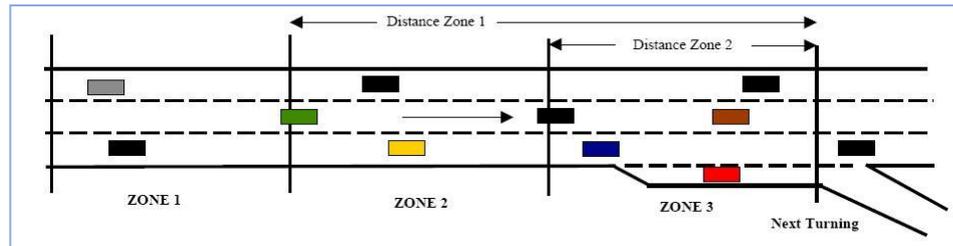


Fig. 36 Zona de cambio de pista (Transport Simulation Systems, 2014).

Las 3 zonas anteriormente mencionadas están definidas por dos parámetros, Distance Zone 1 y Distance Zone 2, los cuales están definidos en segundos y son convertidos en distancia mediante la siguiente fórmula:

$$D_m = D_t * S_{\text{limit}}(s) \left[\frac{S_{\text{limit}}(s)}{V_{\text{max}}(n, s)} \right]$$

Donde:
 Dm: es la distancia en metros
 Dt: es la distancia en segundos
 Slimit(s): es el límite de velocidad de la sección s
 Vmax (n, s): es la velocidad máxima deseada por el vehículo n en la sección s.

Fig. 37 Distancia del modelo de cambio de pista (Transport Simulation Systems, 2014).

- Modelo de cambio de pista para accesos:** Un modelo especial de cambio de pista es utilizado para el caso de los accesos (on ramps). En este caso se aplica otro modelo de cambio de pista para el auto que trata de emerger. Un parámetro adicional es considerado, el Time Distance on Ramp que es la distancia, en segundos, desde el final de la pista a la cual la pista lateral es considerada una pista de acceso. Cuando los vehículos que se encuentran en un acceso y están más lejos del fin de la pista que la distancia definida por el Time Distance on Ramp, éstos se comportan como en la Zona 1, cuando están más cerca tratan de emerger. La idea de este parámetro es caracterizar desde qué punto la pista auxiliar es considerada una “on ramp” en vez de una pista lenta o pista lateral.

Este submodelo también toma en cuenta otros aspectos, entre ellos, si el vehículo que trata de emerger es el primero en la pista, si está frenando o incluso si ha llegado al final de la pista y está detenido esperando, en este caso un parámetro que cobra relevancia es el Maximun Give Way Time, el cual determina cuánto tardará en que el vehículo detenido se ponga impaciente. Pasado este tiempo el vehículo considerará que está en la Zona 3, por tanto, se cambiará de pista incluso si esto perjudica a los otros conductores. Otra particularidad del modelo de “on ramps” es que para los vehículos que están en la Zona 3 y se acercan a un “on ramp”, éstos chequearán si es que hay vehículos tratando de emerger, si esto sucede tratarán de cambiarse hacia la pista de la izquierda (aplicando Zona 1).

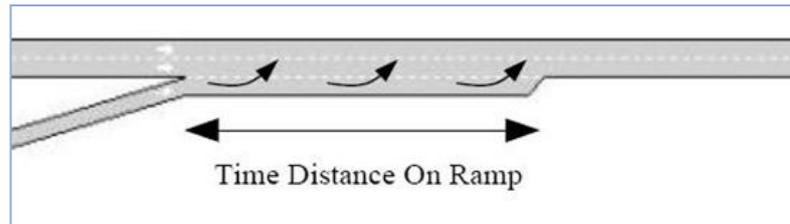


Fig. 38 Zonas en el modelo de cambio de pistas para acceso (Transport Simulation Systems, 2014).

- **Modelo de Cambio de Pista para salidas:** Este modelo se aplica en el caso de salidas de autopistas. En este caso se aplica el modelo de cambio de pista estándar. Un vehículo que debe tomar la próxima salida intentará cambiarse a la pista de la derecha una vez ingresando a la Zona 2 y una vez que esté alineado con la pista de salida hará el cambio de pista hacia la derecha. En el caso de grave congestión la salida puede congestionarse por completo tapando la pista de salida en su totalidad, en este caso el vehículo que debe tomar la salida se detendrá completamente esperando por el gap necesario para realizar el cambio de pista.

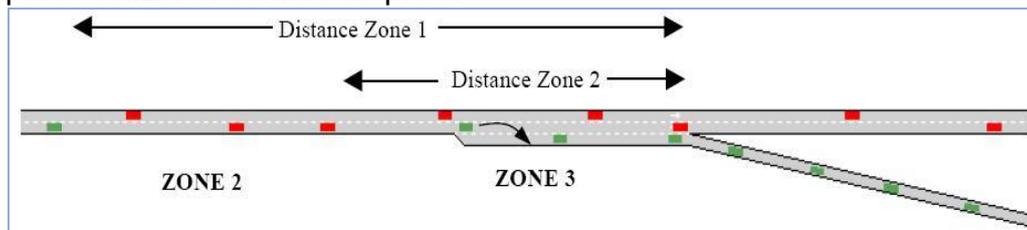


Fig. 39 Zonas en el modelo de cambio de pistas para salidas (Transport Simulation Systems, 2014).

- **Modelo “Look Ahead”:** Cuando las condiciones de tráfico están muy congestionadas puede pasar que los vehículos no puedan alcanzar la pista que les permita efectuar un giro y por ende lo pierden. Cambiando ciertos parámetros como la distancia de las Zona 1 y 2, las aceleraciones de los vehículos, el paso de simulación, etc. o también usando poli secciones en vez de secciones, cuando es posible, se puede minimizar el número de giros perdidos; pero esto no es suficiente. Para mejorar esto, el submodelo “Look Ahead” tiene por objetivo informar a los automovilistas de los dos próximos giros en sus rutas con el fin que puedan tomar decisiones de cambio de pista con un criterio más amplio y no sólo tomando en cuenta el próximo giro. El “Look Ahead Model” se puede resumir en 4 puntos: En todo momento cada vehículo conoce sus próximos 2 giros, por tanto, la decisión de cambio de pista está influenciada por 2 giros consecutivos. Las Zonas 2 y 3 del modelo de cambio de pista se extienden más allá que los límites de la sección, afectando la sección aguas arriba. Cuando se hace un giro se toma en cuenta la pista de destino basado en la información del próximo giro. Se le introdujo una mayor variabilidad a la definición de las zonas, con lo cual se obtiene una mejor distribución de las maniobras de cambio de pista.



3.5.3.1.3. *Teoría de aceptación de huecos (Gap Acceptance).*

Esta maniobra se desarrolla principalmente en la zona 1 (Fig. 36), siendo algunas veces llevada a cabo en la zona 2. Dos parámetros son los que definen la caracterización de las maniobras de adelantamiento.

- **Percent Overtake:** es el porcentaje de la velocidad deseada de un vehículo bajo el cual el vehículo decide adelantar. Esto es, si el vehículo precedente conduce más lento que el porcentaje de adelantamiento de la velocidad deseada del vehículo que le sigue, entonces el que le sigue trata de adelantarle;
- **Percent Recover:** es el porcentaje de la velocidad deseada de un vehículo sobre la cual el vehículo decide volver a la pista lenta. Esto es, si el vehículo precedente conduce más rápido que el porcentaje de recuperación de la velocidad deseada del vehículo que le sigue, entonces el que le sigue trata de volver la pista lenta.

Se recomienda que los valores del porcentaje de recuperación sean mayores que los de porcentaje de adelantamiento, para evitar que algunas maniobras de adelantamiento sean abortadas. Valores muy pequeños tampoco son recomendables.

3.5.3.1.4. *Nuevos modelos de seguimiento vehicular.*

En los últimos años se han incorporado dos modelos innovadores de seguimiento vehicular que permiten aproximarse aún más al comportamiento vehicular. Estos modelos son:

- **Modelo de seguimiento de vehículos a dos carriles (two lane car following model):** Este modelo fuerza a los vehículos más rápidos a utilizar el carril izquierdo para adelantar a un vehículo más lento. Este modelo está basado en el número de vehículos considerados, máxima distancia por delante y diferencias de velocidad máximas. Todos estos parámetros son ingresados por el usuarios para permitir replicar los diferentes comportamientos que se requieran;
- **Modelo de adelantamiento de vías de dos sentidos y dos carriles:** Este modelo fue desarrollado por Llorca (2015) para el proyecto de investigación conocido como PASSING. El modelo incorpora en su interior el efecto de nuevos factores, como la distancia de visibilidad, la demora y el tiempo de viaje restante hasta el final del tramo considerado. Los resultados del modelo se compararon con los datos reales observados. En primer lugar, con las maniobras de adelantamiento individuales. En segundo lugar, con el flujo de tráfico, el porcentaje de vehículos en cola y el número de maniobras de adelantamiento en cuatro áreas distintas con dos niveles diferentes de tráfico. El modelo fue validado en cuatro áreas de adelantamientos diferentes (C. Llorca, García, & Torres, 2015).

El modelo de adelantamiento evalúa las 3 fases del adelantamiento (deseo, decisión y ejecución) (C. Llorca et al., 2015). En primero lugar considera para cada vehículo en cola, el deseo de adelantar evaluándolo sobre el tiempo invertido en cola (s), la diferencia entre la velocidad real y la deseada (km/h),



rango en cola (rango 1 cuando está detrás del vehículo más lento y así sucesivamente) y el tiempo restante de viaje hasta el final del tramo de la carretera(s).

La decisión de iniciar la maniobra de adelantamiento incluye la verificación de que ésta no sea prohibida (línea continua). En el caso que otros vehículos estuvieran adelantando en el mismo tiempo el vehículo que conduce se debe tener en cuenta si es permitido el adelantamiento simultáneo, considerando el número de adelantamientos simultáneos que se pueden hacer y si es respetado el retardo entre adelantamientos simultáneos. Si se respetan todos los factores, se evalúa la decisión de adelantar.

En caso de que la diferencia de velocidad entre la velocidad deseada y la velocidad real estuviera bajo el umbral de la diferencia de velocidad, el vehículo adelantante puede alcanzar una velocidad mayor de la deseada, igual al producto de su velocidad deseada por el factor de mejora de la velocidad del vehículo durante el adelantamiento. Este factor representa la posibilidad de viajar a una velocidad mayor que la velocidad de flujo libre deseada del conductor.

Para evaluar la decisión de adelantar, se calculan el tiempo de la maniobra de adelantamiento (s) suponiendo que el vehículo mantiene a una aceleración constante hasta que alcance su velocidad deseada (o su velocidad de adelantamiento mejorada); después mantiene una velocidad constante, se calcula, además, el tiempo de colisión con el vehículo más cercano en sentido contrario: se supone que el vehículo que se aproxima mantenga una velocidad constante. En caso de que se haya ningún vehículo en sentido contrario, o si se encuentra más lejos que la distancia de visibilidad disponible en el punto de decisión, el modelo utiliza un vehículo ficticio situado en el borde de la visibilidad y el tiempo de señal hasta el final de la zona de adelantamiento identificada por señales.

El vehículo iniciará la maniobra de adelantamiento si es posible completarla antes del final de la zona de adelantamiento y si la duración de la maniobra (PT) será menor que el tiempo de colisión teniendo un margen de seguridad definido por el parámetro del margen de seguridad para la maniobra de adelantamiento, diferente para cada vehículo.

Una vez que la ejecución del adelantamiento se ha decidido, el vehículo acelera con su máxima aceleración hasta la velocidad deseada. En este punto se calcula el tiempo requerido para abortar, es el tiempo que el vehículo que adelanta requiere para desacelerar y volver a su propio carril sin pasar al vehículo más lento. El punto crítico es aquel donde el tiempo de la maniobra de adelantamiento es igual al tiempo requerido para abortar (C. Llorca et al., 2015). Este será el principal modelo que se utilizará para representar la maniobra de adelantamiento.

3.5.3.2. *Parámetros de entrada en Aimsun*

Tal como exponen diversos estudios y como lo representan los manuales de AIMSUN, los parámetros son agrupados en tres categorías, dependiendo del nivel



de detalle, éstos son: Atributos de los vehículos, Locales, Globales (Transport Simulation Systems, 2014).

3.5.3.2.1. *Atributos de los vehículos*

Estos parámetros están definidos a nivel de tipo de vehículo, como, por ejemplo: Automóvil, bus, taxi, camión, etc., y tienen influencia en toda la red. Se puede definir tanto la media de los atributos como su desviación, y sus valores mínimo y máximo. Las características particulares de cada tipo de vehículo son tomadas de una distribución Normal Truncada. Los parámetros de este grupo son los siguientes:

- **Nombre:** nombre del tipo de vehículo;
- **Largo:** corresponde a la longitud, en metros, para el tipo específico de vehículo. Este parámetro se utiliza tanto para fines gráficos como de modelación. Influye en la modelación vehicular ya que en los modelos de comportamiento vehicular es tomado en cuenta;
- **Ancho:** corresponde al ancho, en metros, para el tipo específico de vehículo, este valor sólo se utiliza con propósitos gráficos, y no influye en la modelación;
- **Máxima velocidad deseada:** corresponde a la máxima velocidad, en km/h, a la cual el tipo de vehículo desearía viajar en cualquier punto de la red;
- **Máxima aceleración:** corresponde a la máxima aceleración, en m/s^2 , que puede alcanzar el tipo de vehículo. Este parámetro es consecuencia del tipo de vehículo junto con el comportamiento del conductor. Debido a esto, su cota máxima depende de las especificaciones técnicas del parque automotriz. Esta aceleración es utilizada en el modelo de seguimiento vehicular de Gipps;
- **Desaceleración normal:** corresponde a la máxima desaceleración, en m/s^2 , que puede alcanzar el tipo de vehículo. Es análoga al parámetro anterior, pero en caso de disminuciones de velocidad. Esta desaceleración es utilizada en el modelo de seguimiento vehicular de Gipps;
- **Máxima desaceleración:** corresponde a la máxima desaceleración, en m/s^2 , bajo circunstancias especiales, como casos de emergencia;
- **Aceptación de velocidad:** representa la obediencia que posee el tipo de vehículos a los límites de velocidad establecidos. $0 \leq \theta \leq 1$ significa que la máxima velocidad deseada será menor que el límite de velocidad. Su valor es $\theta \geq 0$;
- **Distancia mínima entre vehículos:** es la distancia que guarda un vehículo con el precedente al estar detenidos. Este valor también es considerado para ubicar el primer vehículo detenido respecto a la línea de detención;
- **Máximo tiempo de sesión de paso:** cuando un vehículo está esperando para cruzar o incorporarse en una intersección prioritaria, al sobrepasar este tiempo de espera es más agresivo y reduce los márgenes de aceptación. También es utilizado este parámetro en el modelo de cambio de pista;
- **Vehículos guiados:** es el porcentaje de vehículos que son guiados a través de la red. Esto se da al trabajar con matrices O/D y elección dinámica de rutas, indicando cuántos vehículos son los que siguen a otros en las elecciones de ellas;
- **Aceptación de ser guiados:** es la probabilidad de que un vehículo siga una recomendación. $0 \leq \theta \leq 1$ entrega el nivel de aceptación de las indicaciones para ser guiado;



- **Tolerancia de crucero:** es utilizado en los modelos de consumo de combustible y de emisión de contaminantes. Los vehículos que circulan con una aceleración o desaceleración, en m/s^2 , menor que este coeficiente son considerados circulando a velocidad constante;
- **Consumo de combustible:** son seis parámetros que dicen relación con las tasas de consumo de combustible y que son utilizados en el modelo del mismo nombre:
 - tasa de consumo de combustible para vehículo que circula a velocidad constante, en ml/s . (F_i reposo),
 - tasa de consumo de combustible para vehículo que acelera, en ml/s . (c_1 acelerando),
 - tasa de consumo de combustible, en litros cada 100 km, para vehículo viaja a velocidad constante de 90 km/h. (F_1 a 90 km/h),
 - tasa de consumo de combustible, en litros cada 100 km, para vehículo viaja a velocidad constante de 120 km/h. (F_2 a 120 km/h),
 - velocidad a la cual la tasa de consumo de combustible, en ml/s , está en su mínimo para un vehículo que viaja a velocidad constante. (V_m),
 - tasa de consumo de combustible para vehículo que desacelera, en ml/s . (F_d desacelerado).
- **Emisión de contaminantes:** para cada tipo de vehículo, un grupo de contaminantes puede ser definido, y para cada uno se requieren los siguientes parámetros que son utilizados en el modelo de consumo de combustible:
 - tasa de emisión para vehículo que acelera, en g/s ,
 - tasa de emisión para vehículo que desacelera, en g/s ,
 - tasa de emisión para vehículo que circula a velocidad constante, en g/s .

3.5.3.2.2. Locales

Este grupo de parámetros afectan el comportamiento de todos los automovilistas en un punto específico de la red modelada. Esto permite representar comportamientos que tienen un ámbito local mientras los conductores se encuentran atravesando la sección correspondiente, pero cambian a medida que el vehículo se cambia de ella y que sólo se observan en determinadas situaciones. Los parámetros de este grupo son:

- **Límite de velocidad de la sección:** velocidad máxima permitida, en km/h , para los vehículos que viajan a través de una sección. Dependiendo de las características del conductor, ellos siguen o no esta recomendación;
- **Límite de velocidad por pista:** velocidad máxima permitida, en Km/h , para los vehículos que viajan a través de una pista en particular;
- **Velocidad de viraje:** máxima velocidad, en km/h , a la cual viaja un vehículo al realizar un viraje. Este valor es calculado automáticamente por el modelo dependiendo de la geometría de la intersección, pero también puede ser modificado manualmente;
- **Distancia de visibilidad en intersecciones:** al acercarse un vehículo a una intersección donde debe ceder el paso, se aplica el modelo de aceptación de gaps al ser la distancia al fin de la sección menor que este valor (m);
- **Velocidad de Yellow Box:** un vehículo evita ingresar al cruce sin bloqueos ("yellow box") si el vehículo precedente circula a una velocidad menor que la



indicada por medio de este parámetro, en km/h;

- **Distancia zona 1:** distancia desde el final de la Zona 1 al punto donde finaliza la sección en la cual está el vehículo. Esta distancia está definida como el tiempo que es necesario para recorrer cierta distancia. Esta conversión es posible considerando el límite de velocidad de la sección y la velocidad a la cual desean circular los vehículos por ella. Se utiliza tiempo para que la distancia sea variable, dependiendo del vehículo ya que cada uno puede poseer distinta velocidad deseada. Se utiliza este parámetro en el modelo de cambio de pista;
- **Distancia zona 2:** distancia, en segundos, desde el final de la Zona 2 al punto donde finaliza la sección en la cual está el vehículo. Su transformación en distancia es igual al caso anterior y se utiliza en el mismo modelo;
- **Distancia de rampas de acceso:** es la distancia, en segundos, para las pistas laterales que se consideran rampas de acceso. Su transformación en distancia es igual al caso anterior. Es utilizado para el modelo especial de cambio de pista aplicado a las entradas tipo rampas. El cambio entre tiempo y distancia se realiza considerando los mismos aspectos antes mencionados;
- **Pendiente de la sección:** la pendiente de una sección influye en las tasas de aceleración y desaceleración que experimentan los vehículos que circulan por ella. Los valores son entregados como porcentajes o por medio de cotas, siendo.

3.5.3.2.3. Globales

Estos parámetros se relacionan con los modelos de comportamiento vehicular a través de toda la red. Estos parámetros no están definidos ni en forma local ni en forma específica para cada tipo de vehículo. Son utilizados para todos los vehículos, en toda la red y durante toda la simulación:

- **Parámetros Generales:**
 - Tiempo de reacción del conductor: corresponde al tiempo que toma al conductor reaccionar frente a cambios en la velocidad del vehículo precedente. Se utiliza en el modelo de seguimiento vehicular. También corresponde a los intervalos de simulación, lo que hace que al haber cambios (disminuciones en su valor) se reaccione en forma más inmediata a fenómenos presentes en la red,
 - Tiempo de reacción en detención: corresponde al tiempo que le toma a un vehículo detenido reaccionar frente a la aceleración del vehículo anterior o al cambio de luz a verde. Este tiempo se usa sólo para los vehículos detenidos, mientras que el anterior está definido para los que están en movimiento. Este parámetro tiene gran influencia en la descarga de colas,
 - Velocidad entrando a la cola: los vehículos que se mueven bajo este valor, en m/s, se consideran como detenidos. Afecta la recolección de datos para detenciones y colas,
 - Velocidad dejando la cola: los vehículos que estaban en cola y superan esta velocidad, en m/s, se considera que están en movimiento. Afecta la recolección de datos para detenciones y colas.



Estos últimos dos parámetros también afectan el comportamiento vehicular, ya que, como parte del modelo de cambio de pista, los vehículos esperan que se presente el gap aceptable para realizar el cambio, y no les gusta esperar detenidos más que cierto tiempo. La condición de detención viene dada por estos parámetros.

- **De seguimiento vehicular:**
 - Número de vehículos: es el número máximo de vehículos a considerar en el modelo de seguimiento vehicular, que es utilizado para modelar la influencia de las pistas adyacentes en el modelo,
 - Máxima distancia: es la máxima distancia hacia delante, en m, considerada en el modelo de seguimiento vehicular,
 - Máxima diferencia de velocidad: es la máxima diferencia de velocidad, en km/h, entre una pista y la adyacente en el modelo de seguimiento vehicular,
 - Máxima diferencia de velocidad en rampa de acceso: es la máxima diferencia de velocidad, en km/h, entre la pista principal y la de acceso en rampa en el modelo de seguimiento vehicular.
- **De cambio de pista:**
 - Porcentaje de adelantamiento: representa el porcentaje de la velocidad desde el cual un vehículo decide adelantar. Debe ser mayor que cero y menor o igual a uno. Se utiliza para modelar la decisión de adelantamiento,
 - Porcentaje de recuperación: representa el porcentaje de la velocidad desde el cual un vehículo decide volver a la pista lenta después de haber adelantado. Debe ser mayor que cero y menor o igual a uno. Se utiliza para modelar la decisión de adelantamiento,
 - Modelo de rampa de acceso: el usuario puede seleccionar cuál de las dos versiones disponibles de modelo para rampas de acceso desea utilizar.
- **Otros Parámetros Globales:** Además de todos los parámetros globales mencionados anteriormente, existen dos parámetros adicionales que pueden ser utilizados en el editor de AIMSUN. Ellos no son parámetros sujetos a calibración, ya que no representan opciones que se puedan tomar. Más bien muestran la aplicabilidad que posee AIMSUN al incluir mayor variedad de casos. Éstos son:
 - Lado del camino o movimiento vehicular: dice relación con el lado de la calle que el conductor de un vehículo utiliza para conducir. Este parámetro es considerado en el modelo de cambio de pista,
 - Distinción de pistas de destino en virajes: determina la capacidad para que el usuario defina las pistas de destino de un movimiento. Si está fijado en la alternativa NO, entonces todas las pistas son consideradas en el destino del movimiento.

3.5.3.3. *Resultados obtenidos desde Aimsun*

El software brinda un conjunto de salidas numéricas y gráficas tras la ejecución de la simulación. AIMSUN puede entregar resultados en los diferentes niveles de agregación (toda la red, por sección, giro o conjuntos de secciones) definidas por el usuario, además de la información basada en rutas de origen-destino e información



de las líneas de transporte público. En la tabla se definen todas las salidas globales de AIMSUN que se consideraran en este proyecto.

| Parámetro | Definición |
|------------------------------------|---|
| Flujo | Número promedio de vehículos por hora que han pasado por la red durante el período de simulación. Los vehículos se cuentan al salir de la red a través de una sección de salida. |
| Densidad | Número promedio de vehículos por kilómetro para toda la red. |
| Contaje de entrada | Número de vehículos que han entrado en la red durante el período de simulación. Los vehículos se cuentan al entrar en la red a través de una sección de entrada. |
| Flujo de entrada | Número de vehículos por hora que han entrado en la red durante el período de simulación. Los vehículos se cuentan al entrar en la red a través de una sección de entrada. |
| Velocidad | La velocidad promedio para todos los vehículos que han abandonado el sistema. Esto se calcula con la velocidad comercial media de cada vehículo. |
| Velocidad armónica | La velocidad media armónica para todos los vehículos que han abandonado el sistema. |
| Tiempo de Viaje | Tiempo promedio necesario para que un vehículo se desplazar en un kilómetro dentro de la red. Esta es la media de todos los tiempos individuales de viaje (tiempo de salida - hora de entrada) para todos los vehículos que ha cruzado la red, convertida en el tiempo por kilómetro. |
| Tiempo de demora | Tiempo promedio de demora por vehículo por kilómetro. Esta es la diferencia entre la hora prevista de viajes (el tiempo que se tardaría en recorrer el sistema en condiciones ideales) y el tiempo de viaje. Se calcula como la media de todos los vehículos y luego se convierte en el tiempo por kilómetro. |
| Tiempo de parada | Tiempo promedio en reposo por vehículo por kilómetro. |
| Número de Paradas | Número promedio de paradas por vehículo por kilómetro. |
| Distancia Total recorrida | Número total de kilómetros recorridos por todos los vehículos que se han cruzado en la red. |
| Tiempo total del viaje | El tiempo total de viaje experimentado por todos los vehículos que se han cruzado en la red. |
| Cola media | Longitud media de la cola en esa sección, expresada como el número de vehículos por carril. Se calcula como un promedio de tiempo. |
| Max Cola | Longitud máxima de la cola, expresada en número de vehículos por carril. |
| Vehículos dentro | Número de vehículos dentro de la red cuando la simulación finaliza. |
| Vehículos fuera | Número de vehículos que han salido de la red durante la simulación. |
| Vehículos perdidos Dentro | Si se está utilizando el modo basado en rutas, el número de vehículos perdidos que se encuentran actualmente en la red, que se entienden los vehículos que han perdido al menos a uno de sus giros preasignadas y que están en un lugar desde donde su destino original no puede ya ser alcanzado |
| Los vehículos perdida fuera | Si se está utilizando el modo basado en rutas, el número de vehículos perdidos que han dejado a la red durante el período de simulación. |
| Consumo de combustible | Litros totales de combustible consumido por todos los vehículos que se han cruzado en la red. |
| Emisiones Contaminantes | Para cada contaminante, kilogramos totales de la contaminación emitida por los vehículos que se han cruzado en la red |

Tabla 13 Parámetros evaluados por Aimsun (Transport Simulation Systems, 2014).

3.5.4. Métodos para modelar el comportamiento de ciclistas

Barceló proporcionó en su estudio del 2010, una descripción detallada de las herramientas de simulación de tráfico microscópica más avanzadas como son Aimsun, SUMO, DRACULA, VISSIM entre otros (Barceló, 2010). La mayoría de las herramientas de simulación de tráfico microscópicas actualmente disponibles y ampliamente utilizadas se centran en el movimiento y la interacción de los vehículos



motorizados. Siendo posible incluir bicicletas en la simulación, pero empleando los mismos modelos de comportamiento utilizados para representar el tráfico de vehículos motorizados. Los parámetros se suelen ajustar para reflejar la menor velocidad de desplazamiento de las bicicletas. Sin embargo, varias características únicas del comportamiento de los ciclistas hacen que la adopción de estos modelos de comportamiento de vehículos tradicionales sea difícil y, a veces, poco realista. Sin embargo, varios modelos se han desarrollado de forma independiente para modelar el tráfico de bicicletas con mayor precisión. Esta sección resumirá una selección de estos modelos, presentando los conceptos principales utilizados actualmente en el modelado del comportamiento de la bicicleta.

Twaddle et al. (2014), identificó los modelos que buscan representar el comportamiento de los ciclistas en cuatro categorías en áreas urbanas: Modelos longitudinalmente continuos, modelos autómatas celulares, modelos de fuerza social y modelos lógicos (Twaddle et al., 2014).

3.5.4.1. Modelos longitudinalmente continuos

La mayoría de las herramientas de simulación de tráfico utilizan dos modelos para modelar de manera independiente el movimiento longitudinal y lateral de los usuarios de la carretera (VISSIM, Aimsun, SUMO). Los modelos de movimiento longitudinal son de espacio continuo y tiempo discreto, y suelen estar basados en uno de los tres modelos siguientes: modelos Gazis-Herman-Rothery, modelos de distancia de seguridad y modelos psicofísicos.

Todos ellos utilizan la velocidad y la posición de un vehículo líder para determinar el comportamiento del siguiente vehículo (si es que este, está suficientemente cerca para influir). Mientras tanto, el movimiento lateral de los vehículos de motor, y con frecuencia las bicicletas, se modela con un modelo de elección de carril discreto, donde la posición y la velocidad de otros usuarios de la carretera y la ruta se toman en cuenta en el proceso de elección de carril. El movimiento lateral dentro de un carril no es posible en la mayoría de los modelos de selección de carril de elección discreta. Si tales modelos se utilizan para simular flujos de tráfico mixto, los ciclistas individuales forman rápidamente un cuello de botella en movimiento en la carretera, lo que rara vez es el caso en la realidad, ya que los vehículos más rápidos superan a las bicicletas lo antes posible (Twaddle, Schendzielorz, & Fakler, 2014).

Falkenberg et al. Propuso un modelo con un eje lateral continuo (Falkenberg et al., 2003). Los ciclistas seleccionan su posición lateral dentro del carril con el objetivo de maximizar el tiempo mínimo de colisión (TTC) con otras bicicletas, peatones y vehículos motorizados. TTC se define como el tiempo restante hasta que dos usuarios de la carretera chocan, dado que permanecen en el mismo camino con la misma velocidad.

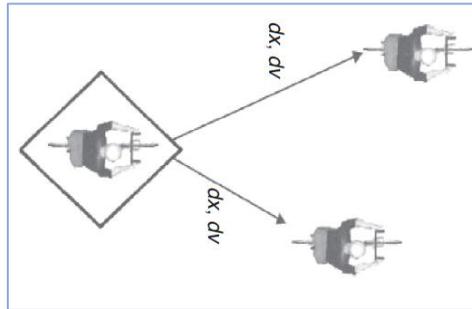


Fig. 40 Modelo gráfico del movimiento lateral (Falkenberg et al., 2003).

Las flechas representan el TTC calculado entre otros usuarios de la carretera en las inmediaciones. Si ningún otro usuario de la carretera viaja cerca, los ciclistas seleccionan su posición lateral según una preferencia predefinida (normalmente hacia el lado derecho).

Los modelos suponen que, dado que los ciclistas son personas, se pueden utilizar los mismos factores psicológicos (velocidad deseada y distancia de seguimiento) y factores físicos (umbral de percepción y control del vehículo imperfecto) para determinar su comportamiento (Falkenberg et al., 2003). Esta suposición no se probó, pero el uso posterior del modelo en VISSIM (Carrignon & Buchanan, 2009; COWI, 2012) ha demostrado que es capaz de representar de manera realista el tráfico de bicicletas en la mayoría de las situaciones (en ámbito urbano). Sin embargo, Carrignon observó que los ciclistas en VISSIM no interactúan de manera realista con los bordes de la infraestructura (generalmente un bordillo o señal de carril) en todas las situaciones (Carrignon & Buchanan, 2009). Este problema no se evidencia cuando los carriles son anchos y existen pocos usuarios.

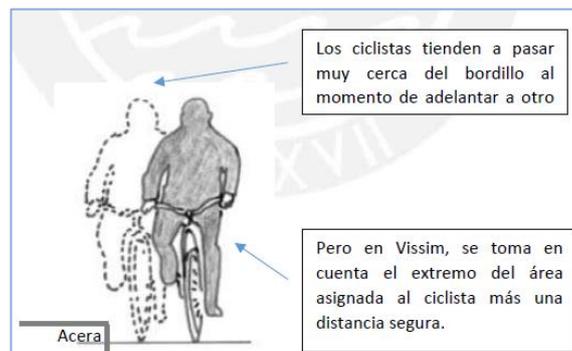


Fig. 41 Comparación de las consideraciones en Vissim y realidad (Quispe Chayña, 2016).

3.5.4.2. Modelos autómatas celular

Los autómatas celulares (CA) son modelos discretos en el tiempo y el espacio (Twaddle et al., 2014). En el modelo original de Nagel y Schreckenberg, el espacio bidimensional se divide en una cuadrícula de celdas de tamaño idéntico (longitud de un vehículo aprox.) y estos siguen rutas predefinida a través de las celdas (Nagel & Schreckenberg, 1992). Estas rutas utilizan cuatro regímenes de conducción: aceleración, desaceleración, aleatorización y actualización y movimiento. Las celdas no se superponen entre sí y no es posible que más de un usuario de la carretera ocupe una celda en un solo paso. Por esta razón, el CA original de Nagel y



Schreckenberg proporcionó un método simple y rápido para modelar flujos de tráfico heterogéneos, pero limita la representación del tráfico mixto. Se han sugerido varias extensiones de la CA original para hacer posible incluir el tráfico de bicicletas.

Por otro lado, en China, Yao et al. (2009) propone otra alternativa que, a diferencia del anterior, plantea dividir las celdas en función al más pequeño de los elementos, pero, al mismo tiempo, permite que diferentes usuarios puedan ocupar una misma celda a la vez. se representaron a los vehículos con espacios de 5x3 celdas y a los ciclistas con espacios de 3x1 celdas (Yao et al., 2009). Sin embargo, como señala (Twaddle, 2014), el modelo todavía no ha sido calibrado y validado empíricamente. En el 2010 un estudio realizado en la India por Mallikarjuna y Ramachandra Rao utilizaron un enfoque similar para modelar flujos de tráfico mixto. En este modelo, las longitudes de las celdas se basan en las propiedades de aceleración y desaceleración de los usuarios de la carretera y las anchuras de las celdas se basan en el ancho y el espaciado lateral observado entre los diferentes grupos de usuarios de la carretera (Mallikarjuna & Rao, 2009).

Finalmente, Vasic y Ruskin, plantearon una nueva propuesta para modelar una red urbana, basado en el modelo celular autómatas y las reglas de movimiento de Nagel y Schreckenberg (1992), la simulación es mixta y es evaluada en dos condiciones, uno es en el tramo de una calle y otro en una intersección. En este modelo, la velocidad depende de la distancia entre dos vehículos, es decir, entre el número de celdas libres que los separa (Nagel & Schreckenberg, 1992; Vasic & Ruskin, 2012). Finalmente, como señala Twaddle et al. (2014), la ventaja de este modelo es que la geometría de una intersección puede ser directamente trasladada a una adecuada malla de celdas.

3.5.4.3. Modelos de la fuerza social

El modelo de fuerza social considera a los ciclistas como partículas físicas que siguen la segunda ley de Newton para sus movimientos en carriles para bicicletas. Fueron desarrollados inicialmente por Helbing y Molnár (1995) para describir la dinámica de los peatones. El principio operativo básico de este modelo se basa en el concepto de que los peatones se mueven en reacción a la suma de varias fuerzas atractivas y repulsivas.

Li et al. (2011) desarrolló un modelo de fuerza social que considera las corrientes de tráfico con bicicletas mixtas y vehículos motorizados. En este modelo, los movimientos de la bicicleta están controlados por dos tipos de fuerzas, es decir, las fuerzas impulsoras y las fuerzas de repulsión. Esto pretende reflejar el hecho de que los automóviles tienen una mayor influencia en el espacio vial que los ciclistas. Este modelo no fue validado o calibrado utilizando datos empíricos (Li et al., 2011).

Liang et al. (2012) mejoró aún más este modelo al considerar dos regímenes: flujo libre y flujo congestionado. Los ciclistas fueron resumidos como elipses. Cuando dos ciclistas estaban cerca uno del otro, sus elipses se superpusieron y se produjo una colisión. Se desarrolló un algoritmo físico para evitar tales colisiones. Schönauer et al. (2012) también desarrolló un enfoque de fuerza social para simular intersecciones entre peatones, ciclistas y vehículos de motor en un espacio compartido.



Los tres modos deben seleccionar su ruta a través de la intersección en función de la geometría de la infraestructura y el comportamiento de otros usuarios de la carretera. Esto se hace con tres modelos: un modelo de infraestructura, un modelo operacional y un modelo táctico (Schönauer et al., 2012). El modelo de infraestructura crea un campo de fuerza que usa fuerzas repulsivas de los bordes de la infraestructura para empujar a los usuarios de la carretera hacia su ruta prevista. El modelo operacional es nuevamente una forma adaptada del modelo propuesto por Helbing y Molnar. Para considerar los reducidos grados de libertad asociados con los vehículos de motor y las bicicletas, se utiliza el modelo de una sola vía para la dinámica de los automóviles que muestra Kramer (Kramer, 2007).

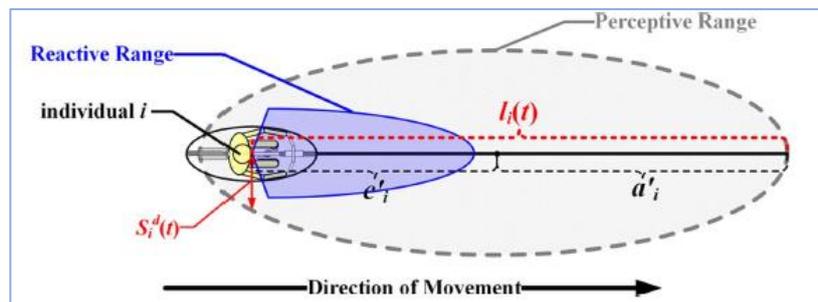


Fig. 42 Diagrama de fuerzas de reacción y percepción (Liang, Ph, Xie, Ph, & Jia, 2018)

Estos modelos suponen que las características dinámicas de las bicicletas son sorprendentemente similares a las de los peatones. A diferencia de otros métodos microscópicos para considerar los avances longitudinales y laterales por separado, los modelos de fuerza social representan los movimientos de la bicicleta en un plano bidimensional.

3.5.4.4. Modelos Lógicos.

Los enfoques de modelos lógicos se utilizan para representar el comportamiento de elección consciente, o el comportamiento táctico, de los ciclistas, incluida la selección de la infraestructura y el método utilizado para cruzar las intersecciones. Solo un número limitado de modelos existentes considera el comportamiento táctico de los ciclistas.

Para modelar correctamente el movimiento de los usuarios de la carretera en intersecciones no controladas con infraestructura que comparten todos los usuarios de la carretera, Schönauer et al. agregó un vector de fuerza táctica a su modelo de fuerza social (Huang et al., 2012). El movimiento de los usuarios de la carretera se deriva de la suma de la fuerza guía de la infraestructura, el modelo de fuerza social adaptada y el modelo de fuerza táctica. El modelo de fuerza táctica se basa en el concepto de juego Stackelberg, que es un modelo de juego jerárquico no simétrico con seguidores y jugadores líderes (Von Stackelberg, 1934). Los posibles conflictos entre usuarios de la carretera se identifican según las trayectorias planificadas de los usuarios de la carretera no influenciados. Los dos usuarios de la carretera consideran varias posibilidades para evitar conflictos. La validez del modelo de fuerza táctica aún no se ha probado con datos empíricos.



Huang y Wu propusieron un modelo que utiliza reglas de lógica difusa para determinar el comportamiento de elección de ruta de los ciclistas en intersecciones no controladas (Huang & Wu, 2009). El modelo consta de tres submodelos: Un modelo de detección de situaciones, que detecta la velocidad, la dirección y la posición de todos los demás usuarios de la carretera dentro de un área determinada. Un modelo de trazado de trazado, que utiliza la información recopilada por el modelo de detección de situaciones para determinar posibles trayectorias y un modelo de generación de ruta reactiva, que realiza la elección de ruta y envía información al modelo de detección de situación. Las pruebas modelo utilizaron datos empíricos y los resultados indicaron que las trayectorias modeladas reflejaban las observadas en el sitio de prueba.

3.5.4.5. *Evaluación de la modelación del comportamiento ciclista.*

La breve descripción de los modelos seleccionados en la sección anterior ofrece una descripción general del estado del arte en el modelado de bicicletas. Twaddle (2014), llevó a cabo una evaluación para determinar la idoneidad de los modelos actualmente disponibles para la evaluación de la calidad y seguridad del tráfico de bicicletas (Twaddle, 2014) agrupando según el enfoque del modelo y evaluándolos por separados según su capacidad de modelar el comportamiento táctico y operativo. Se utilizaron las siguientes categorías de evaluación (Michon, 1985):

- El nivel operativo incluye las acciones automáticas realizadas por un ciclista para controlar la bicicleta y circular por el entorno del tráfico, como controlar la velocidad, seguir la infraestructura de la carretera y mantener una distancia lateral segura de otros objetos y usuarios de la carretera;
- El nivel táctico incluye maniobras a corto plazo que un ciclista selecciona conscientemente para hacer frente a la situación actual del tráfico. Los ejemplos de comportamiento táctico incluyen evitar las colisiones con otros usuarios de la carretera y objetos a través del desvío o desaceleración y encontrar un camino a través de una intersección.

El comportamiento de los usuarios de la carretera se dividió en dos tipos de movimiento: el comportamiento no influenciado, que ocurre cuando el movimiento no se ve afectado por la presencia o las acciones de otros usuarios de la carretera, y el comportamiento influenciado, que es una reacción a la presencia o las acciones de otros usuarios de la vía. Los modelos fueron evaluados con respecto a sus capacidades dentro de cada subcategoría (por ejemplo, comportamiento operacional).

Se concluyó que los enfoques utilizados para modelar el comportamiento no influido e influenciado en el nivel operacional varían en su nivel de detalle y capacidad para reproducir la realidad correctamente. Sin embargo, es bastante posible modelar la mayoría de los comportamientos de los ciclistas en este nivel. Sin embargo, sería beneficioso validar y calibrar varios de los modelos existentes con datos empíricos recopilados en una variedad de ubicaciones y situaciones de tráfico (Twaddle, 2014).

El estado del arte en el modelado del comportamiento táctico de los ciclistas está, sin embargo, menos desarrollado. El comportamiento táctico no influenciado de los ciclistas, que ha recibido poca atención, es importante incluir en los modelos para



considerar cómo se comportan los ciclistas antes de que sus acciones se vean afectadas por la presencia o acciones de otros usuarios de la carretera. Solo así será posible adaptar y cambiar este comportamiento en función de otros ciclistas y vehículos motorizados en las proximidades. Como los ciclistas son mucho más flexibles que los conductores de automóviles, la pregunta de por qué se comportan de la manera en que lo hacen se vuelve al menos tan importante como la forma en que se comportan. Para desarrollar modelos precisos que describan el comportamiento táctico no influenciado e influenciado de los ciclistas, los datos empíricos, en forma de preferencia declarada y observada, deben recopilarse en diversas situaciones (Twaddle, 2014).

3.5.5. Modelación tráfico mixto.

La mayoría de los microsimuladores de tráfico más usados se centran en la interacción y comportamiento de los vehículos a motor, siendo posible incluir bicicletas, pero empleando los mismos modelos de comportamientos utilizados para representar el tráfico de vehículos motorizados. Por otro lado, se han desarrollado modelos de forma independiente para modelar el tráfico de bicicletas con mayor precisión, pero sin incluir la interacción con otros vehículos. Además, los pocos estudios desarrollados se basan en entornos urbanos, donde el comportamiento ciclista es muy diferente.

Twaddle concluyó que es bastante posible modelar la mayoría de los comportamientos no influido e influenciado en el nivel operacional de los ciclistas ya que replican su nivel de detalle y su capacidad para reproducir la realidad son correctas.

Debido a que el comportamiento de los ciclistas es diferente del de los vehículos motorizados, se considerará en este estudio el comportamiento de los ciclistas a nivel operacional ya que a nivel táctico aun esta poco desarrollado. Los criterios que se utilizarán para modelar el comportamiento de los pelotones ciclistas y diferenciarlo de los vehículos a motor, serán los largos, aceleraciones, velocidades, tiempos de adelantamientos, ocupaciones de carriles contrarios, intensidad de adelantamientos. Todos estos parámetros mencionados se obtendrán de mediciones a campos a diferentes pelotones para lograr representar con mayor veracidad este tipo de vehículos y no solo crean un vehículo lento que circule por la carretera.

Una vez se logre replicar el comportamiento de los ciclistas en carreteras convencionales en el microsimulador Aimsun, se procederá a ingresar los vehículos motorizados para así analizar la influencia en la funcionalidad debido a la interacción del tráfico mixto.



3.6. Recomendaciones para el diseño de carreteras convencionales con presencia de ciclista

La circulación de ciclistas en carreteras convencionales supone un problema de seguridad vial causando muertes todos los años y sin disminuir, a diferencia de los ocupantes de vehículos a motor. En el siguiente apartado, se detallarán la tipología de accidentes más comunes que afectan a los ciclistas en vías interurbanas y las recomendaciones de diferentes autores para ser consideradas en las etapas de diseño o explotación en carreteras convencionales.

3.6.1. Tipología de accidentes con ciclistas en vías interurbanas

La ausencia de elementos de protección y la diferencia de velocidad con los vehículos ocasionan accidentes de elevada gravedad. Un profesor del GIIC estudio la vulnerabilidad de los ciclistas mencionando la tipología de los accidentes que sufren los ciclistas en vías interurbanas, todo esto para proponer criterios de seguridad vial para el diseño de infraestructuras ciclistas (Carrera Hueso, 2014). A continuación, se resumen las diferentes tipologías de accidentes:

- **Adelantamiento desestimado vehículo:** El vehículo procede a realizar la maniobra de adelantamiento al ciclista y durante la invasión del carril contrario decide abortar la maniobra por la presencia de un vehículo circulando en sentido contrario;
- **Colisión frontal en adelantamientos o carreteras con sección reducida:** El vehículo procede a realizar la maniobra de adelantamiento al vehículo que le precede sin percibir la presencia del ciclista o grupo de ciclistas circulando en sentido opuesto. Al no poder abortar la maniobra impacta frontalmente con los mismos;
- **Incorporación/salida vehículo por la derecha:** El vehículo procede a realizar la maniobra de incorporación a otra vía con la presencia de un ciclista circulando por el arcén de la vía principal. Ante la proximidad de la salida el vehículo adelanta al ciclista y realiza el giro a derecha hacia la vía a la que pretende incorporarse, cerrando el paso al ciclista;
- **Incorporación vehículo por la izquierda:** El vehículo procede a realizar la maniobra de incorporación a la vía principal con la presencia ciclistas circulando por el arcén de la vía principal. Ante la proximidad de la salida el vehículo adelanta al ciclista y realiza el giro a izquierda hacia la vía a la que pretende incorporarse, cerrando el paso al ciclista;
- **Glorietas:** las glorietas son un punto conflictivo y recurrente de accidentes ya que se pueden producir colisiones en las aproximaciones a la glorieta, colisiones frontolateral cuando el conductor quiere salir y cuando los pelotones están ingresando a la glorieta.

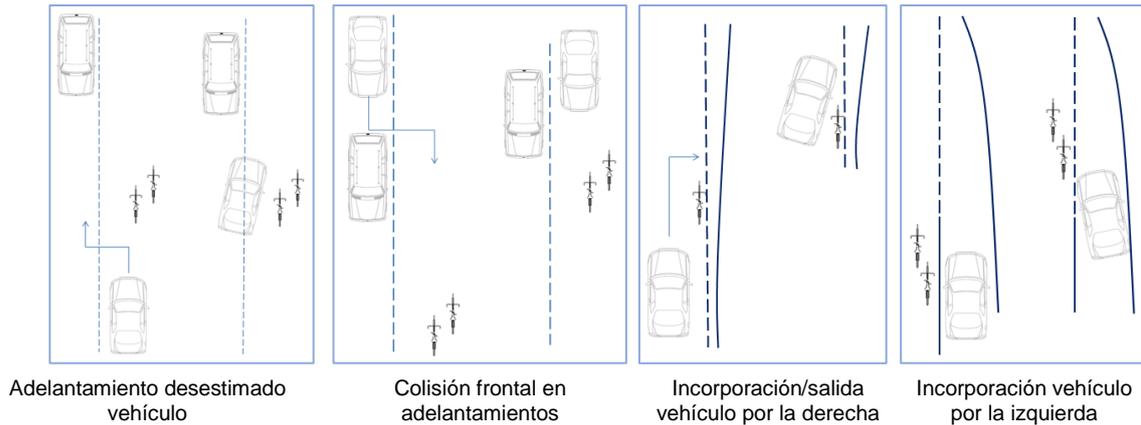


Fig. 43 Tipología accidentes con ciclistas en vías interurbanas (Carrera Hueso, 2014).

3.6.2. Recomendaciones para el diseño y explotación de carreteras convencionales

Vicente Ferre en su tesis doctoral concluyó que considerando ciertos criterios tanto en el diseño como a la explotación de carreteras convencionales se logra mejorar la seguridad de circulación de los ciclistas. Se procede a detallar las principales recomendaciones (Ferrer Pérez, 2017).

- **Velocidad máxima:**
 - Para no superar la fuerza aerodinámica admisible (16,5 N), en carreteras con presencia de ciclistas se debe limitar la velocidad máxima a 80 km/h,
 - En el caso de carreteras existentes, con importante de ciclistas, en las que se contemplen limitaciones de velocidades mayores, debe valorarse la adopción de medidas adicionales en relación con otros factores (F_{85} menor a 13,2 N),
 - En el caso de que no puedan garantizarse volúmenes de tráfico pesado inferiores a los valores propuestos debe valorarse la posibilidad de restringir su circulación en los periodos de mayor afluencia ciclista, fines de semana, por ejemplo, o, alternativamente, prohibir la circulación de ciclistas y plantear la construcción de carriles bici específicos.

| Ancho semiplataforma (m) | % vehículos pesados |
|--------------------------|---------------------|
| 2,50 | 9 |
| 3,00 | 11 |
| 3,50 | 14 |
| 4,00 | 16 |
| 4,50 | 18 |
| 5,00 | 20 |
| 5,50 | 22 |
| 6,00 | 24 |

Fig. 44 Relación entre ancho de semiplataforma y máximo % de vehículos pesados para $F_{85} < 13,2$ N (Ferrer Pérez, 2017).



- **Visibilidad mínima:**
 - En proyectos de nuevas carreteras convencionales en las que se prevea la afluencia de ciclistas se debe considerar la distancia recorrida en 10 segundos a la velocidad de proyecto del tramo considerado, a lo largo de todo el trazado y no sólo al entorno específico de nudos en el que se centra la Instrucción,
 - En el caso de carreteras existentes, la distancia de visibilidad disponible debe situarse entre un mínimo de 40 m y una deseable de 105 m. En los tramos no se pueda garantizar una visibilidad mínima de 40 m debe plantearse la prohibición de adelantar a ciclistas.
- **Sección transversal:**
 - proyecto de carreteras nuevas en las que se prevea la afluencia de ciclistas deben adoptarse secciones tipo 7/10 o 7/12 con limitación de velocidad máxima a 80 km/h,
 - En ningún caso deben proyectarse carreteras con semi-plataformas inferiores a 4,50 m y arcenes inferiores a 1 m en itinerarios con afluencia de ciclistas (para garantizar la separación lateral mínima).
- **Tratamiento de arcenes y bermas:**
 - Para carreteras nuevas y existentes es fundamental un mantenimiento, siega y limpieza adecuado de estas zonas con el fin de garantizar un rodar seguro para los ciclistas. Esto debe ser extensible a los bordes exteriores de carril, especialmente en carreteras con arcenes estrechos,
 - Debe tenderse a minimizar la presencia de este elemento de contención tanto en los proyectos de nuevas infraestructuras como en las carreteras existentes con afluencia de ciclistas y sustituirse por márgenes seguros, pero menos agresivos.
- **Separación mínima:**
 - Velocidades superiores a 80 km/h y hasta 100 km/h, velocidad permitida para vehículos ligeros en España en carreteras convencionales, la separación de 1,50 m establecida en la regulación española permite mantener las fuerzas aerodinámicas sobre los ciclistas por debajo de ese límite,
 - En el caso de camiones y autobuses la separación mínima se cumple siempre que a ambos tipos de vehículos se les limite la velocidad máxima a 80 km/h.
- **Nivel de riesgo:**
 - Tanto en carreteras convencionales existentes como en el proyecto de futuras infraestructuras debe contemplarse, dentro de los análisis de seguridad vial, una evaluación del riesgo para ciclistas como consecuencia de manobras de adelantamiento cuando se prevea que pueda existir la presencia de este tipo de usuario. No deben admitirse niveles de riesgo superiores al nivel 3, es decir, valores previsibles de F_{85} no debe superar los 13,2 N.

$$F_{85} = 13,74 + 0,33 \times \%P - 1,43 \times \text{Semiplat}$$



| NIVEL | F ₈₅ (N) |
|-------|---------------------|
| 1 | 6,6 |
| 2 | 6,6-9,9 |
| 3 | 9,9-13,2 |

Donde:

- **F85** es la fuerza previsible para el percentil 85 en N.
- **%P** es el porcentaje de vehículos pesados
- **Semiplat** es el ancho de la semiplataforma en m

Fig. 45 Niveles de riesgo en función de la F₈₅ (Ferrer Pérez, 2017).

- **Accidentalidad y exposición al riesgo:**

- Se recomienda la inclusión en los análisis de seguridad vial en carreteras convencionales, tanto existentes como de nuevo diseño, de la estimación de la accidentalidad de ciclistas por adelantamiento previsible. Se puede establecer el nivel de exposición y el número de accidentes por adelantamiento previsible en un periodo de 10 años. De esta forma, partiendo de las formulaciones propuestas para.

- $FT = -11,00 + 1,28 \times F_{85} + 0,00071 \times IMD$ **donde:**
- $Exp = FT \times v \times c / 10^9$
- $N.º \text{ accidentes} = 0,863047 + 0,007807 \times Exp$

| Nº de accidentes | Rango de exposición |
|------------------|---------------------|
| 0 | < 5 |
| 1 | 5 - 85 |
| 2 | 85 - 170 |
| 3 | 170 - 260 |
| 4 | 245 - 370 |
| 5 | 310 - 480 |
| 6 | > 380 |

- **FT** es la frecuencia de fuerza acumulada de exposición previsible en N/min.

- **F85** es el percentil 85 de la fuerza previsible para esa carretera en N.

- **IMD** es la Intensidad Media Diaria de la carretera en veh/día.

- **Exp** es la exposición al riesgo para el tramo o segmento de carretera en N/min*veh/año*cicl/año/10⁹

- **v** es el número de vehículos año en el tramo o segmento.

- **c** es el número de ciclistas año en el tramo o segmento.

Fig. 46 Accidentes previsible para un periodo de 10 años en base al rango de exposición (Ferrer Pérez, 2017).

Por otro lado, Miguel Ángel Carrera (2014), sugiere la implantación de arcenes bici en carreteras convencionales existente con las siguientes características para mejorar la seguridad de los ciclistas en carreteras convencionales interurbanas:

- IMD de 5.000 a 12.000 vehículos/días;
- Baja circulación de camiones;
- Proximidad a zonas urbanas;
- Entorno de poblaciones con gran número de peñas deportivas;
- Trazados con curvas suaves y pendientes ligeras;
- Ancho de arcenes entre 2,00 a 2,50 metros.

Recomendando, además, que debiesen realizar circuitos o tramos de 40 a 50 km, en los que se pretende concentrar al máximo de ciclistas de la carretera o tramos que reúnan las máximas garantías de seguridad posibles que permitiría absorber gran cantidad de tráfico ciclista deportivo. Este tipo de medidas se aplicó en tres carreteras locales de Valencia con una longitud total de 18 km (Carrera Hueso, 2014).



Fig. 47 Recomendaciones de diseño de arcenes bici (Carrera Hueso, 2014).

Víctor Valencia en su tesis doctoral, explica las posibles mejoras operacionales en carreteras convencionales que pueden ser aplicadas para facilitar la maniobra de adelantamiento, aunque están enfocadas a la circulación de vehículos a motor, pudiese ser aplicables para mejorar la circulación ciclista en carreteras convencionales. Las soluciones estudiadas por Valencia son (Valencia Alaix, 2016):

- Carriles de adelantamiento y tramos de tres carriles;
- Carriles de adelantamiento y tramos de tres carriles;
- Carriles de ascenso;
- Apartaderos;
- Tramos cortos de cuatro carriles;
- Circulación por el arcén;
- Secciones de uso de arcén;
- Secciones transversales amplias;
- Carreteras 2+1.

Por último, recientemente, y con carácter puntual, la DGT ha implantado reducciones de velocidad temporales en determinadas franjas horarias, en algunos tramos con afluencia masiva de bicicletas, denominando a esta medida “rutas ciclistas seguras”. Pero sin considerar ningún criterio científico.



4. Objetivos e hipótesis

Se describen a continuación los objetivos e hipótesis planteadas para el desarrollo del presente trabajo de fin de máster.

4.1. Objetivos

El principal objetivo del presente trabajo de investigación es evaluar el impacto en la funcionalidad de las carreteras convencionales en entornos interurbanos debido la presencia de tráfico ciclista mediante microsimulación. Para la realización del objetivo principal se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Estudio de la siniestralidad del tráfico ciclistas en carreteras convencionales,
- Revisión de la inclusión en la normativa actual respecto al tráfico ciclista en diferentes países,
- Estudio de trabajos de investigación relacionados con el tráfico ciclista en carreteras convencionales y su influencia en la operación del tráfico,
- Seleccionar un modelo de simulación que permita evaluar los efectos en la funcionalidad de carreteras convencionales existente producto de la presencia de tráfico ciclista y vehículos a motor,
- Proponer criterios de diseño para mejorar la seguridad y funcional del tráfico ciclista en carreteras convencionales en entornos interurbanos.
- Aplicación de los criterios de diseño en el modelo de simulación creado y estudiar la variabilidad del tiempo de viaje, consumos de combustibles, emisiones de gases, niveles de servicio, etc.



4.2. Hipótesis

A continuación, se presentan las hipótesis planteadas en esta investigación. Estas hipótesis serán comprobadas mediante el análisis de los resultados y se aceptarán o rechazarán en función de los resultados finales del estudio.

- La presencia de ciclistas supone una reducción de la velocidad media del tráfico y puede afectar al nivel de servicio,
- La existencia de infraestructura exclusiva para la ciclista produce aumentos de la velocidad media de los vehículos a motor,
- La presencia de ciclistas por los carriles de circulación provoca mayor cantidad de adelantamientos vehiculares,
- Los tiempos de viajes de los vehículos a motor aumentan con la presencia de ciclistas en carreteras convencionales,
- Las diferentes configuraciones de los pelotones provocan diferentes tiempos de adelantamientos.
- El nivel de servicio en una carretera con presencia ciclista no puede evaluarse únicamente con PTSF.
- Cuando existe penalización en la funcionalidad de la carretera la disposición de apartaderos mejora la funcionalidad.



5. Metodología

En este capítulo se desarrollarán diversas actividades con el fin de cumplir los objetivos propuestos. La primera tarea será la selección de un tramo de estudio para lograr estudiar la interacción entre los vehículos motorizados y bicicletas mediante el uso de un microsimulador. Seleccionado el tramo de estudio se procederá a realizar dos tareas que son complementarias para la creación del modelo de simulación, una de las actividades será la realización de las observaciones en campo para la creación de una base de datos que nos permita alimentar el modelo de microsimulación y por otro lado es necesario la creación física de este modelo de simulación, es decir, obtener e ingresar las características operacionales y geométricas del tramo de estudio.

Ya definido el modelo de simulación es necesario realizar la calibración y validación del modelo para que así represente lo observado en campo, en este caso, la representación de los diferentes pelotones observados en campo (considerando sus diferentes velocidades, tiempos de adelantamientos, longitudes del pelotón, etc.). El proceso de calibración es un proceso iterativo hasta lograr obtener el menor error posible entre los datos observados y modelados. La validación del modelo no es un proceso iterativo, ya que su objetivo es verificar si el modelo calibrado ofrece una representación precisa del modelo, pero considerando otro conjunto de datos diferentes a los utilizados en el proceso de calibración.

Obtenido el modelo de microsimulación de la zona de estudio y calibrados los diferentes pelotones de ciclistas se procederán a simular diferentes escenarios (relación flujo de vehículos y ciclistas) para evaluar cómo influye la presencia de los pelotones de ciclistas en la funcionalidad de las carreteras convencionales. Se comenzará utilizando las observaciones puntuales realizadas en el tramo de estudio para luego comenzar a cambiar la relación de vehículos ligeros, pesados y pelotones ciclistas.

Además de los escenarios simulados, se procederá a estudiar diferentes propuestas de mejora para evitar que la presencia de bicicletas influya en la funcionalidad de la vía mediante el modelo de simulación. Luego se compararán los escenarios para poder evaluar si estas propuestas aportan en la mejora de la funcionalidad.

Analizados los resultados de las diferentes simulaciones se procederá a la creación de las conclusiones y recomendaciones generadas a partir de este estudio. a continuación, en la Fig. 48 se presenta un resumen esquemático del flujo de trabajo de la investigación. En los siguientes apartados se desarrollarán todos los pasos detallados en la figura.

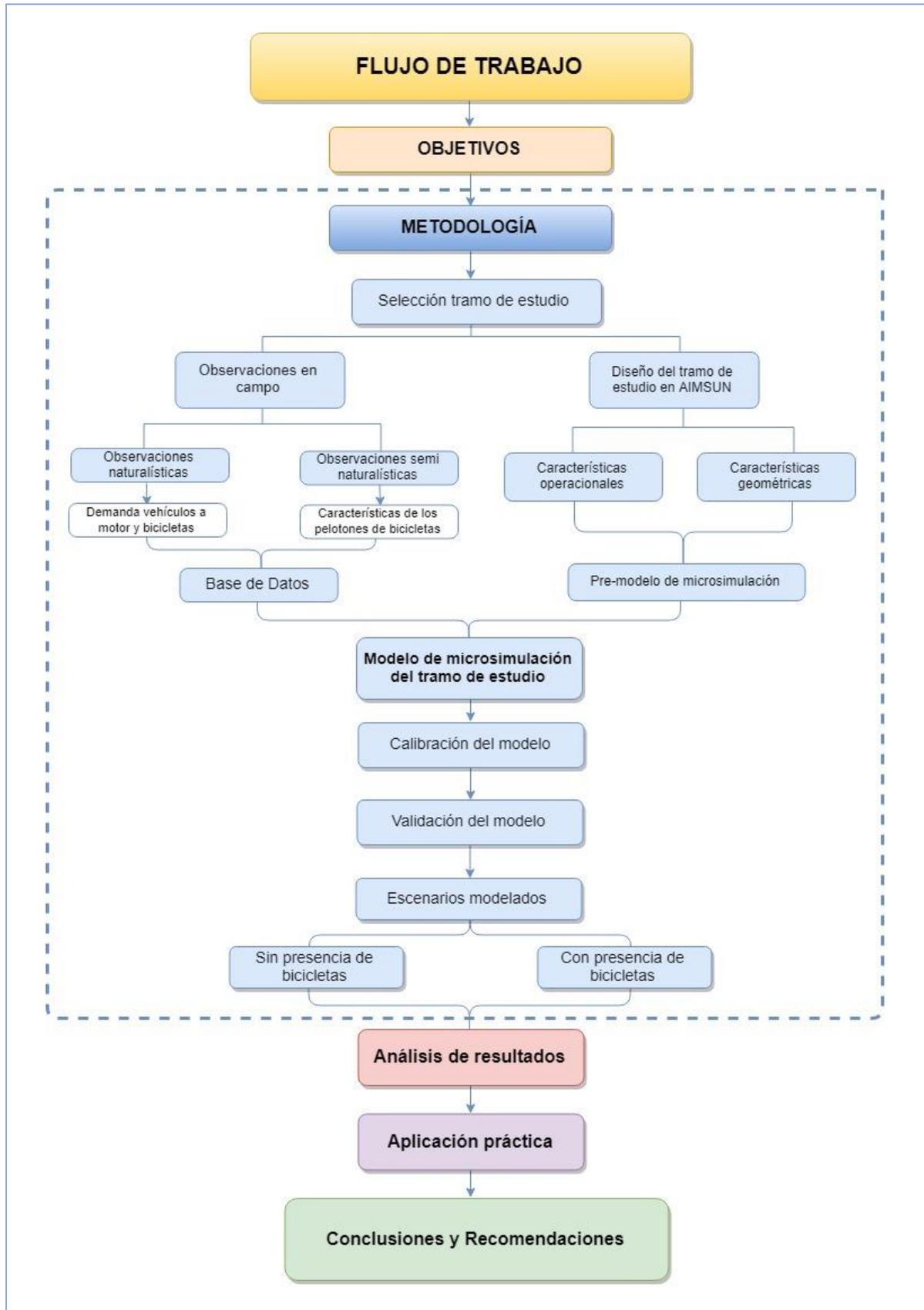


Fig. 48 Descripción del flujo de trabajo de la investigación.



5.1. Elección de zona de estudio

Para evaluar de mejor manera la variabilidad de la funcionalidad de las carreteras convencionales producto de la presencia de tráfico ciclista, es necesario seleccionar una zona de estudio con un cierto control de los accesos y principalmente con tráfico ciclista y vehículos a motor.

Por otro lado, una de las actividades realizadas por el Grupo de Investigación de Ingeniería de Carreteras para el proyecto Bike2lane, fue la ubicación de varios segmentos de carreteras convencionales en la Comunidad Valenciana con alta demanda de ciclistas. En total fueron seleccionado cinco segmentos de carretera donde se recolectaron datos sobre maniobras de adelantamiento de vehículos a motor a ciclistas.



Fig. 49 Ubicación de segmentos de carreteras seleccionados para analizar (López & Moll, 2018).

Su elección estuvo relacionada con las diferentes características geométricas y de tráfico existentes (diferente ancho de carril y arcenes, presencia o no de carril bici, arcén coloreado o sin color, diferente AADT (promedio de tráfico diario anual)).

| Tramo | Carretera | Longitud (m) | Carril (m) | Arcén (m) | IMD | %P | Carril bici paralelo |
|-----------|-----------|--------------|------------|-------------|--------|------|----------------------------|
| Tramo I_1 | CV-500 | 15.000 | 3,0 | 1,5 | 16.310 | 2,8 | 650 m primeros decreciente |
| Tramo I_2 | CV-502 | 5.350 | 3,5 | NO | 4.733 | 1,75 | No |
| Tramo I_3 | CV-310 | 5.750 | 3,15 | 2/1,5 Color | 5.542 | 1,44 | No |
| Tramo I_4 | CV-333 | 7.500 | 3,2 | 1,0 | 6.380 | 1,8 | vía de servicio 2,5 m |
| Tramo I_5 | CV-50 | 7.500 | 3,5 | 1,5 | 4.911 | 5,88 | No |

Tabla 14 Características de tramos de estudio Bike2lane (López & Moll, 2018).



Para este estudio se seleccionó el Tramo 5 del Proyecto Bike2lane, ya que cuenta con las siguientes características:

- Sección transversal más o menos constante a lo largo de su longitud;
- Presenta el más alto porcentaje de vehículos pesados;
- No tiene carril bici paralelo;
- Sin actuaciones en sus arcenes.

Tramo 5 está ubicado en la CV-50 entre el PK 83+500 y el PK 76+550 que discurre por los términos municipales de Cheste y Villamarxant, en la Provincia de Valencia. Esta carretera es de titularidad Autonómica, siendo la Generalidad Valenciana la encargada de su explotación y correcto funcionamiento. La longitud total del tramo es de 7 km aproximadamente. Según los datos del mapa de aforos del 2017 de la Comunidad Valenciana, la IMD en el tramo es de 4.911 veh/día, con un porcentaje de pesados de 5,88%. A continuación, se presenta la ubicación tramo en estudio.

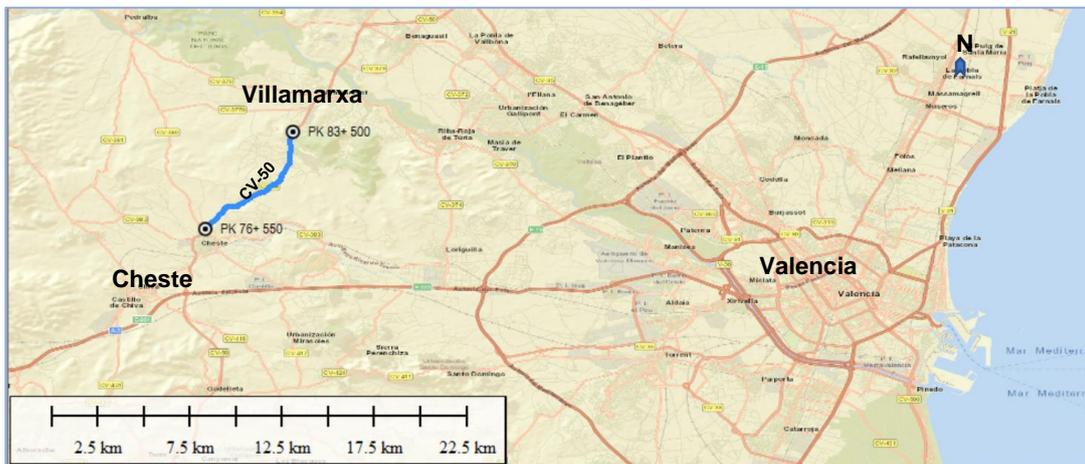


Fig. 50 Ubicación Tramo Cheste – Villamarxant.

5.2. Observaciones de campo

Las observaciones en campo son necesarias para evaluar la funcionalidad actual del tramo de estudio, sin estas mediciones no sería posible estimar que tan relevante es la presencia de ciclistas y además nos permitirán caracterizar el comportamiento de los diferentes usuarios. Las observaciones en campo fueron realizadas para el proyecto Bike2lane que realiza la Universidad Politécnica de Valencia y se solo se procesará la información disponible para el tramo de estudio.

A través de la investigación Bike2lane se ha concluido que *“no existe un método único válido para obtener todas las variables que se desean a la vez (velocidades, configuraciones de la bicicleta, dimensiones sección transversal, visibilidades, etc.)”*. En resumen, se llevaron a cabo diferentes observaciones de tipo naturalística (sin intervención apreciable de los investigadores) y semi-naturalística (fijando algunos parámetros previamente) que combinaron diferentes modos complementarios para lograr obtener la mayor cantidad de información de cada observación. A

continuación, se presentan los tipos de observaciones realizadas en el tramo de estudio y los diferentes resultados que se lograrán obtener de ellas.

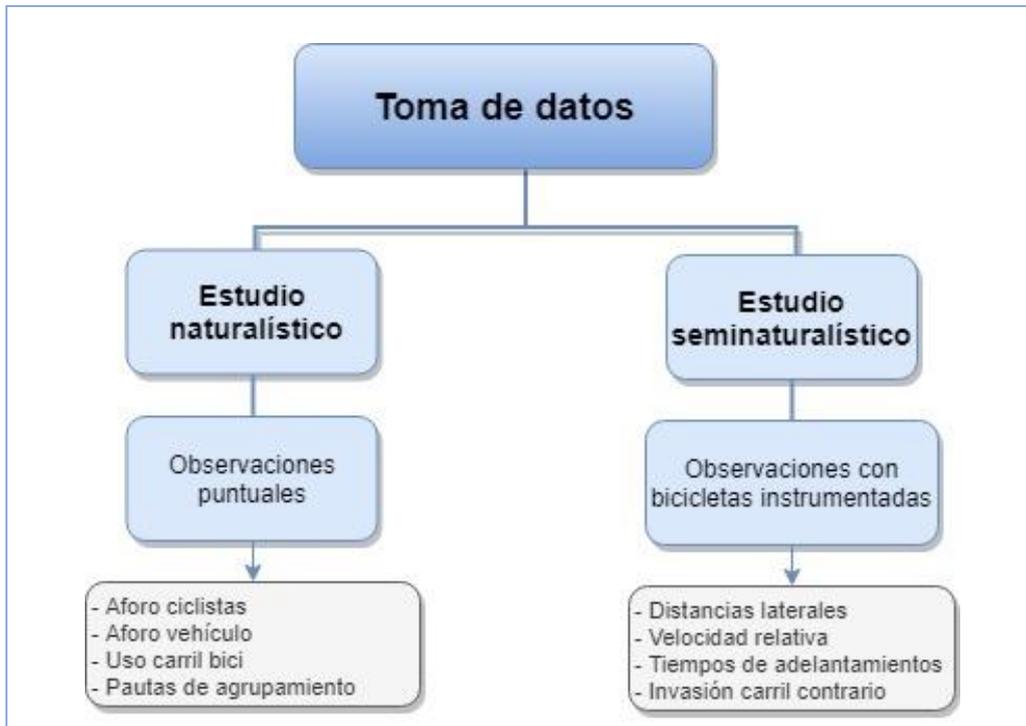


Fig. 51 Tipos de observaciones realizadas (López & Moll, 2018).

En los siguientes puntos se detallarán las diferentes técnicas realizadas en cada tipo de observación y su procesamiento para obtener la base de datos necesaria para ingresar al modelo de microsimulación.

5.2.1. Estudio Naturalístico.

El estudio naturalísticos (sin intervención apreciable de los investigadores) se realizó una observación puntual en la glorieta que une Cheste con la CV-50, a unos metros del inicio del tramo de estudio. Esta observación fue realizada mediante la grabación de videos con cámaras Virb Elite sobre un trípode, el cual permite aforar con un único dispositivo y evitan la necesidad de post-procesamiento en cuanto a la sincronización de diferentes grabaciones.

Se realizaron seis campañas de aforos puntuales para lograr caracterizar la variación horaria, semanal y estacional de intensidad de bicicletas y vehicular. Estas grabaciones permitirán conocer los aforos de bicicletas y vehicular que serán utilizadas para alimentar el modelo inicial.



Fig. 52 Ubicación de la observación y materiales utilizados (Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), 2019).

5.2.2. Estudio Semi-naturalístico.

El estudio semi-naturalístico se enfocó en obtener datos específicos de maniobras de adelantamiento entre vehículos motorizados y bicicletas. Para ello se equiparon las bicicletas con GPS, cámaras de video Garmin VIRB Elite, pulsadores para el nivel de riesgo percibido. Estas bicicletas circularon con personal contratado para esta finalidad. Los recorridos eran sucesivos de ida y vuelta por los tramos.

Dos de las bicicletas contaban con un sistema láser Laser Technology Inc. T200 / T100 que consistía en un par de telémetros láser, perpendiculares al eje de la bicicleta, uno de ellos en la parte delantera de la bicicleta y el otro en la parte trasera. El sensor proporciona la velocidad relativa del vehículo que adelanta, después de calcular el intervalo de tiempo entre las mediciones de los dos telémetros. También mide la distancia desde la bicicleta hasta el cuerpo del vehículo que adelanta.



Fig. 53 Bicicletas instrumentadas (Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), 2019).



Toda esa información se almacenó en un registrador de datos y dos baterías de 12 VCC que proporcionó alimentación durante la recopilación de datos. Las bicicletas totalmente instrumentadas estaban ubicadas en la cabeza y en la parte trasera del pelotón y en el lado más cercano a los vehículos motorizados para obtener datos desde el principio hasta el final de la maniobra de adelantamiento.

El análisis de videos de varias investigaciones anteriores mostró que el ciclista suele viajar solo línea o en dos líneas paralelas, cambiando sus posiciones de la cabeza del pelotón a la parte posterior del pelotón de vez en cuando (Pérez et al., 2018) Sobre la base de lo anterior, es que en el tramo de estudio se consideraron dos grupos de pelotón. Un pelotón de 4 ciclistas y otro de 10 ciclistas profesionales que a la vez recorrieron el tramo en diferentes configuraciones. Se utilizó diferentes configuraciones porque los pelotones pueden cambiar su tamaño, longitud, forma y velocidad relativa a lo largo de su itinerario.

- **Pelotón de cuatro ciclistas:** Las observaciones de este pelotón se realizaron los días 3 y 4 de mayo del año 2018. Se eligieron seis configuraciones diferentes para estudiar el comportamiento de los conductores al adelantar a un pelotón: individual (1L), dos en línea (2L), cuatro en línea (4L), dos en paralelo (2F), cuatro en paralelo (4F), y con tres ciclistas se circuló en 2+1 y 1+2.

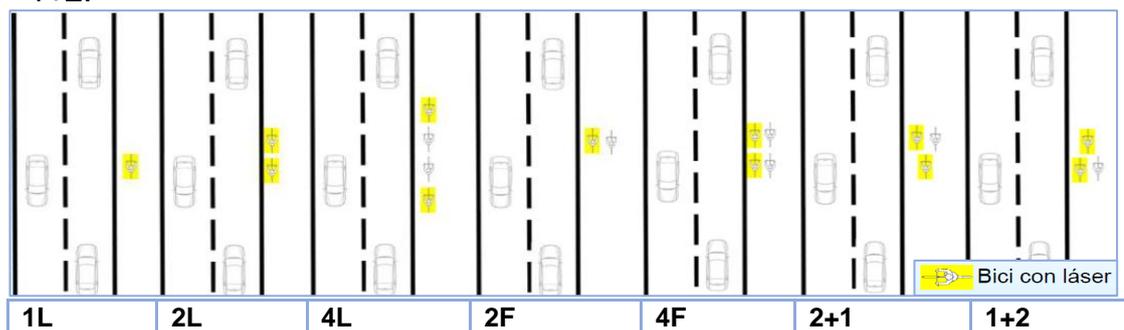


Fig. 54 Configuraciones de pelotón de cuatro ciclistas (Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), 2019).

- **Pelotón de diez ciclistas:** Las observaciones de este pelotón se realizaron los días 18 y 19 de noviembre del año 2018. Se seleccionaron cuatro configuraciones diferentes para estudiar el comportamiento de los conductores al adelantar: línea única (SF), líneas paralelas (PL), cuatro ciclistas en una sola línea y los últimos seis ciclistas en líneas paralelas (en cola) (4 SF + 6 PL), y seis ciclistas en líneas paralelas y los últimos cuatro ciclistas en línea (en cabeza) (6 PL + 4 SF).

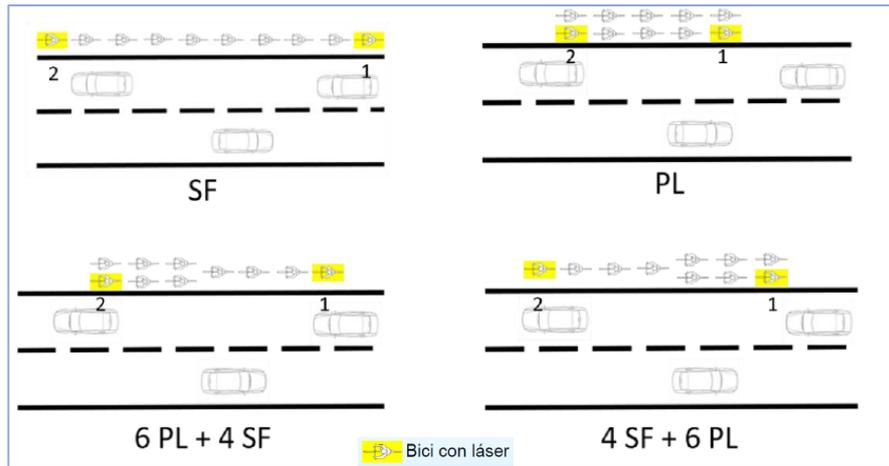


Fig. 55 Configuraciones de pelotón de diez ciclistas (Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), 2019).

Las diferentes configuraciones de pelotones recorrieron el tramo en ambos sentidos, realizando las diferentes combinaciones mencionadas anteriormente. Los pelotones mantienen su configuración durante todo el recorrido y solo fue modificada al término del tramo. Cada configuración recorrida como mínimo una vez el tramo de estudio, esto es, debido a que en las últimas configuraciones del día se comenzaba a presenciar el agotamiento de los ciclistas y los resultados ya no serían representativos.



Fig. 56 Pelotón de 4 ciclistas circulando en 4F (Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), 2019).

5.2.3. Información bruta obtenida.

El resultado de estas observaciones se traduce en varias horas de grabación bruta y requieren un orden y filtro para lograr obtener la base de datos necesaria. Este procesamiento se ha realizado para cada tipo de observación según el día de



medición. En los siguientes apartados se explicará la información bruta obtenida en campo.

5.2.3.1. Estudios naturalísticos.

Esta metodología requiere de un importante trabajo en gabinete para poder obtener las variables requeridas. Para lograr obtener los diferentes aforos, se procedió a analizar visualmente todos los videos obtenidos durante los diferentes días mediante un software de visualización de videos, las observaciones se han agrupado cada 15 minutos para facilitar su analisis y se ha diferenciado si es por modo de transporte (vehiculos ligeros, pesados y ciclistas) que ingresa o sale. Además, se debe tener en cuenta que solo se pueden extraer conclusiones vinculadas al entorno puntual del tramo considerado.



Fig. 57 Proceso de obtención de datos del estudio naturalístico.

La obtención de los aforos de ciclista fue realizada en gabinete por el Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras pero no se detalló la formación que llegaban los diferentes ciclistas (10 línea, 10 paralelo, individual, etc), por lo que se debió complementar esta información junto con los aforos vehiculares, ya que esta información no fue necesaria en las investigaciones anteriores. En total se obtuvieron 19 horas de medición durante los 7 días de campañas de aforo. A continuación se presentan los días, horas de inicio y fin de las diferentes campañas de aforos realizadas.

| Fecha | Mes | Día | Hora de inicio | Hora de fin | Duración |
|------------|------------|--------|----------------|-------------|----------|
| 27-01-2018 | Enero | Sábado | 8:11:52 | 12:23:30 | 3:58:06 |
| 12-04-2018 | Abril | Jueves | 8:31:02 | 11:39:00 | 3:07:58 |
| 03-05-2018 | Mayo | Jueves | 8:52:30 | 12:14:07 | 3:21:37 |
| 26-05-2018 | Mayo | Sábado | 8:30:46 | 11:38:42 | 2:03:22 |
| 21-08-2018 | Agosto | Martes | 7:47:00 | 11:15:00 | 3:28:00 |
| 22-09-2018 | Septiembre | Sábado | 8:36:36 | 11:38:03 | 3:01:27 |

Tabla 15 Días y horas de mediciones puntuales en el tramo de estudio.



5.2.3.2. Estudio Semi-naturalístico.

Las observaciones del estudio semi-naturalístico fue procesado en gabinete por el Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras. Los diferentes videos fueron observados manualmente empleando el software gratuito de edición KINOVEA.



Fig. 58 Procesamiento estudio semi-naturalístico.

Un punto importante a considerar para el análisis de las imágenes es que la bicicleta con la cámara de video orientada hacia el frente facilitaría la detección de vehículos opuestos y bicicleta con la cámara de video de orientada hacia atrás permitiría observar el acercamiento del vehículo de adelantamiento. A continuación, se presentan las horas de medición y día para las diferentes configuraciones. Cabe destacar que las horas de medición de las bicicletas instrumentadas 1 y 2 son similares ya que forman parte de la misma configuración.

| Pelotón | Configuración | Notación | Fecha | Hora inicio | Hora fin | Duración |
|--------------------|-----------------|------------|------------|-------------|----------|----------|
| 10 Ciclistas | 10 Línea | 10 L | 18-11-2017 | 9:01:44 | 9:33:38 | 0:31:54 |
| | 10 Paralelo | 10 F | 18-11-2017 | 9:43:58 | 10:07:54 | 0:23:56 |
| | | | 19-11-2017 | 9:26:44 | 9:50:40 | 0:23:56 |
| | 10 en Cabeza | En Cabeza | 19-11-2017 | 10:03:00 | 10:29:12 | 0:26:12 |
| | 10 en Cola | En Cola | 18-11-2017 | 11:23:35 | 11:44:50 | 0:21:15 |
| | | | 19-11-2017 | 10:29:28 | 10:50:38 | 0:21:10 |
| 4 ciclistas | individual | Individual | 03-05-2018 | 11:37:49 | 11:58:18 | 0:20:29 |
| | | | 04-05-2018 | 11:23:38 | 11:43:06 | 0:19:28 |
| | Dos en paralelo | 2F | 03-05-2018 | 11:11:02 | 11:35:38 | 0:24:36 |
| | | | 04-05-2018 | 10:58:34 | 11:20:08 | 0:21:34 |
| | Dos en línea | 2L | 03-05-2018 | 8:36:50 | 9:02:36 | 0:25:46 |
| | | | 04-05-2018 | 8:50:25 | 9:14:22 | 0:23:57 |
| | 1+2 | 1+2 | 03-05-2018 | 12:07:50 | 12:30:40 | 0:22:50 |
| | | | 04-05-2018 | 11:45:41 | 12:12:20 | 0:26:39 |
| | 2+1 | 2+1 | 03-05-2018 | 9:06:18 | 9:28:58 | 0:22:40 |
| | | | 04-05-2018 | 9:19:15 | 9:39:22 | 0:20:07 |
| | Cuatro en línea | 4L | 03-05-2018 | 9:42:58 | 10:08:18 | 0:25:20 |
| | | | 04-05-2018 | 9:55:33 | 10:21:46 | 0:26:13 |
| Cuatro en paralelo | 4F | 03-05-2018 | 10:20:36 | 10:42:58 | 0:22:22 | |
| | | 04-05-2018 | 10:35:39 | 10:57:08 | 0:21:29 | |

Tabla 16 Días y horas de mediciones de observaciones semi-naturalístico.



Cabe destacar que las configuraciones aisladas y dos en línea solo presentaban una bicicleta instrumentada, ya que es solo una bicicleta la que tendrá relación con el vehículo a motor, se puede observar esta situación en el esquema presentado en la figura 56. En el caso de las bicicletas aisladas se realizaron 2 vueltas para optimizar el tiempo de espera de los ciclistas. En total se obtuvieron 5 horas y 39 segundos para los pelotones de 10 ciclista y 8 horas y 25 minutos aprox. para los pelotones de 4 ciclistas. A continuación, se presenta como se distribuyen las horas para las diferentes configuraciones.

| Pelotón | Configuración | Notación | Horas de medición por bicicleta instrumentada | Total, Horas medición |
|--------------|--------------------|------------|---|-----------------------|
| 10 Ciclistas | Línea | 10 L | 0:31:54 | 1:05:32 |
| | Paralelo | 10 F | 0:47:52 | 1:35:44 |
| | En Cabeza | 6 PL + 4SF | 0:26:12 | 0:54:13 |
| | En Cola | 4SF + 6 PL | 0:42:25 | 1:25:10 |
| 4 ciclistas | Individual | individual | 1:15:26 | 1:15:26 |
| | Dos en paralelo | 2F | 0:46:10 | 0:46:10 |
| | Dos en línea | 2L | 0:49:43 | 1:39:26 |
| | 1+2 | 1+2 | 0:49:30 | 1:13:26 |
| | 2+1 | 2+1 | 0:42:47 | 1:05:29 |
| | Cuatro en línea | 4L | 0:51:34 | 1:18:58 |
| | Cuatro en paralelo | 4F | 0:43:51 | 1:05:37 |

Tabla 17 Horas totales de mediciones de observaciones semi-naturalístico.

Los datos registrados por el láser y las cámaras de video permitieron la caracterización de las maniobras de adelantamiento, demarcaciones, velocidades relativas, etc. Las diferentes características obtenidas del video fueron recolectadas en un archivo Excel para cada configuración. La caracterización considera las siguientes variables:

- Posición de bicicletas y velocidades;
- Tipos de vehículos adelantante;
- Velocidad relativa entre vehículo de adelantamiento y bicicleta;
- Separaciones laterales entre vehículos y bicicletas;
- Tipo de demarcación central;
- Alineación horizontal;
- Tiempo hasta el vehículo contrario;
- Tiempos siguientes;
- Duración del adelantamiento;
- Cruce de línea central;
- Ocupación del carril opuesto.

Los criterios utilizados para obtener los tiempos en las diferentes fases de la maniobra de adelantamiento son los siguientes:

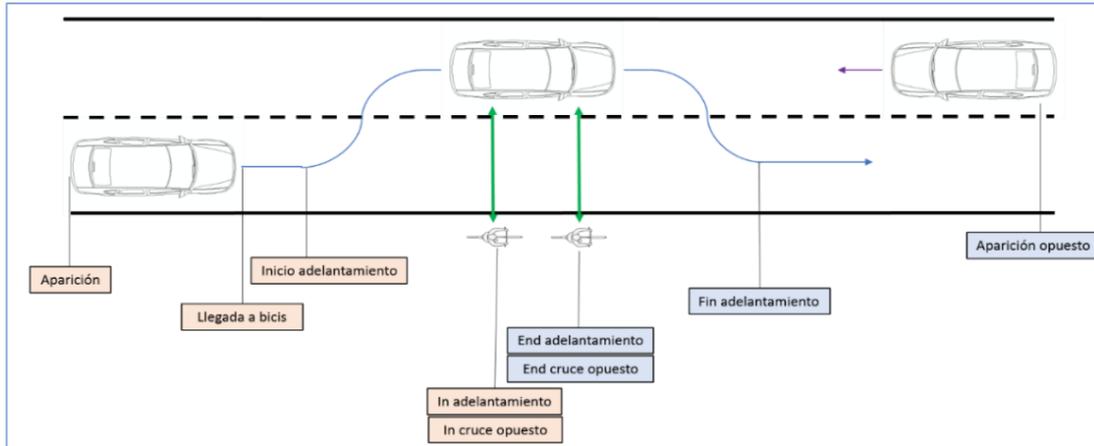


Fig. 59 Tiempos observados para las diferentes fases del adelantamiento (Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), 2019).

5.2.4. Preprocesamiento de la base de datos

Para aumentar la fiabilidad de los datos obtenidos en campos, será necesario realizar un preprocesamiento de toda la información bruta obtenida en el apartado anterior. Este procesamiento nos asegurará que los valores que se utilizarán para las diferentes etapas de este proyecto serán completos, seguros, precisos y consistentes.

5.2.4.1. Estudio Naturalístico

En el caso de las observaciones puntuales, se verificó que todos los videos obtenidos fueran continuos, debido que las cámaras utilizadas crean archivos de videos de 23:56 minutos, por lo tanto, para una misma hora de mediciones se tiene diferentes archivos. Además, se verificó que no hubiera solape en las horas de medición, ya que hay casos que para una misma campaña se utilizaron más de una cámara para cubrir todo el periodo de aforo. Luego de este proceso de verificación solo se eliminó menos de un minuto de grabación. A continuación, se presenta el único caso de solape entre los videos ocurrido el día 21 de agosto del 2018.



Fig. 60 Preprocesamiento observaciones naturalístico.



5.2.4.2. Observaciones Semi-naturalístico

Para facilitar el procesamiento de la toda información se utilizó una base de datos única con todas las observaciones realizadas a las diferentes configuraciones de ciclistas. La primera validación realizada fue la eliminación de observaciones que no tuvieran al menos una de las siguientes características:

- Configuración del pelotón;
- Hora de inicio o fin del adelantamiento;
- Velocidad del ciclista al inicio o fin de la maniobra;
- Velocidad relativa al inicio y fin de la maniobra;
- Si el adelantamiento fue producido por otra bicicleta;
- En el caso del pelotón de 4 ciclistas fueron eliminados además los adelantamientos realizados por autobuses, camiones y coches con remolque por ser pelotones más pequeños y pueden presentar mayor error en los tiempos.

| Configuration | Nº ciclistas | ID | Vi relativa (m/s) | Vf relativa (m/s) | Inicio adelantamiento (H) | Fin adelantamiento (h) | Tiempo adelantamiento (s) |
|---------------|--------------|------|-------------------|-------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| LINEA | 10 | 2644 | 0,00 | 0,00 | 9:04:50,000 | 9:04:53,000 | 3,00 |
| LINEA | 10 | 2647 | 26,94 | 23,33 | 9:06:57,000 | 9:06:59,000 | 2,00 |
| LINEA | 10 | 2649 | 14,17 | 13,06 | 9:07:41,000 | 9:07:44,000 | 3,00 |
| LINEA | 10 | 2652 | 21,11 | 17,50 | 9:07:46,000 | 9:07:48,000 | 2,00 |
| LINEA | 10 | 2653 | 19,44 | 16,67 | 9:07:50,000 | 9:07:53,000 | 3,00 |
| LINEA | 10 | 2656 | 11,39 | 15,00 | 9:08:34,000 | 9:08:40,000 | 6,00 |
| LINEA | 10 | 2660 | 19,72 | 17,50 | 9:10:29,000 | 9:10:33,000 | 4,00 |
| LINEA | 10 | 2662 | 17,22 | 16,67 | 9:10:49,000 | 9:10:53,000 | 4,00 |
| LINEA | 10 | 2663 | 18,61 | 17,78 | 9:10:55,000 | 9:10:59,000 | 4,00 |
| LINEA | 10 | 2664 | 0,00 | 17,78 | 9:10:57,000 | 9:11:01,000 | 4,00 |
| LINEA | 10 | 2665 | 19,72 | 18,61 | 9:10:59,000 | 9:11:02,000 | 3,00 |
| LINEA | 10 | 2673 | 25,00 | 20,28 | 9:14:27,000 | 9:14:30,000 | 3,00 |
| LINEA | 10 | 2675 | 29,17 | 26,67 | 9:15:25,000 | 9:15:27,000 | 2,00 |
| LINEA | 10 | 2676 | 28,06 | 25,00 | 9:15:26,000 | 9:15:28,000 | 2,00 |
| LINEA | 10 | 2677 | 26,39 | 23,61 | 9:15:27,000 | 9:15:29,000 | 2,00 |
| LINEA | 10 | 2679 | 18,33 | 17,78 | 9:16:21,000 | 9:16:27,000 | 6,00 |

Fig. 61 Primera validación de la base de datos.

Se verificó además la consistencia de la información obtenida, por ejemplo, se comprobó que, en todas las etapas del adelantamiento, el tiempo inicial fuera inferior al final, en caso contrario estos adelantamientos serán omitidos.

| Configuration | Nº Ciclistas | ID | Vi relativa (m/s) | Vf relativa (m/s) | Inicio adelantamiento (h) | Fin adelantamiento (h) | Tiempo de adelantamiento (s) |
|---------------|--------------|-----|-------------------|-------------------|---------------------------|------------------------|------------------------------|
| 1+2 | 3 | 601 | 5,28 | 15,56 | 12:10:06,000 | 12:10:08,000 | 2,00 |
| 1+2 | 3 | 609 | 8,89 | 20,28 | 12:12:10,000 | 12:12:12,000 | 2,00 |
| 1+2 | 3 | 615 | 12,22 | 12,78 | 12:13:33,000 | 12:13:35,000 | 2,00 |
| 1+2 | 3 | 617 | 6,39 | 11,94 | 12:13:35,000 | 12:13:38,000 | 3,00 |
| 1+2 | 3 | 620 | 21,67 | 21,39 | 12:14:14,000 | 12:14:16,000 | 2,00 |
| 1+2 | 3 | 622 | 23,06 | 22,22 | 12:15:14,000 | 12:15:17,000 | 3,00 |
| 1+2 | 3 | 626 | 7,22 | 14,44 | 12:15:45,000 | 12:15:47,000 | 2,00 |
| 1+2 | 3 | 629 | 17,50 | 16,94 | 12:16:05,000 | 12:16:07,000 | 2,00 |
| 1+2 | 3 | 630 | 20,83 | 20,83 | 12:16:15,000 | 12:16:18,000 | 3,00 |
| 1+2 | 3 | 631 | 9,44 | 20,00 | 12:16:17,000 | 12:16:19,000 | 2,00 |
| 1+2 | 3 | 635 | 13,89 | 12,78 | 12:17:20,000 | 12:17:23,000 | 3,00 |
| 1+2 | 3 | 639 | 16,39 | 16,94 | 12:19:00,000 | 12:19:02,000 | 2,00 |
| 1+2 | 3 | 640 | 11,67 | 11,94 | 12:19:04,000 | 12:19:07,000 | 3,00 |
| 1+2 | 3 | 642 | 20,00 | 18,89 | 12:19:11,000 | 12:19:13,000 | 2,00 |
| 1+2 | 3 | 644 | 10,56 | 22,50 | 12:19:48,000 | 12:19:51,000 | 3,00 |
| 1+2 | 3 | 648 | 5,28 | 29,44 | 12:20:32,000 | 12:20:35,000 | 3,00 |
| 1+2 | 3 | 649 | 6,11 | 26,39 | 12:20:36,000 | 12:20:39,000 | 3,00 |
| 1+2 | 3 | 655 | 8,33 | 14,72 | 12:21:40,000 | 12:21:44,000 | 4,00 |
| 1+2 | 3 | 658 | 16,94 | 19,44 | 12:23:07,000 | 12:23:09,000 | 2,00 |
| 1+2 | 3 | 675 | 15,00 | 10,28 | 12:27:07,000 | 12:27:09,000 | 2,00 |
| 1+2 | 3 | 677 | 9,72 | 5,28 | 12:27:22,000 | 12:27:24,000 | 2,00 |
| 1+2 | 3 | 678 | 12,50 | 4,72 | 12:27:29,000 | 12:27:32,000 | 3,00 |
| 1+2 | 3 | 679 | 13,06 | 8,33 | 12:27:37,000 | 12:27:39,000 | 2,00 |
| 1+2 | 3 | 681 | 6,11 | 6,39 | 12:27:46,000 | 12:27:49,000 | 3,00 |
| 2+1 | 3 | 124 | 13,61 | 17,22 | 9:11:59,000 | 9:11:59,000 | 0,00 |
| 2+1 | 3 | 125 | 12,22 | 15,28 | 9:12:04,000 | 9:12:05,000 | 1,00 |

Fig. 62 Segunda validación de la base de datos.



Por último, se analizaron las circunstancias de como se había producido cada adelantamiento, eliminando los adelantamientos ocurridos cuando el pelotón estaba dividido o detenido.

| ID | Fecha | Nº ciclistas | Configuration | Hora inicio | Velocidad bicicleta inicial | Tipo_vehiculo | Comentarios |
|------|------------|--------------|---------------|-------------|-----------------------------|---------------|--|
| 2802 | 18-11-2017 | 10 | PARALELO | 9:43:58 | 0 | MONOVOLUMEN | PELTON PARADO |
| 2804 | 18-11-2017 | 10 | PARALELO | 9:43:58 | 0 | BICICLETA | PELTON PARADO |
| 2806 | 18-11-2017 | 10 | PARALELO | 9:43:58 | 2 | UTILITARIO | PELTON PARADO |
| 2807 | 18-11-2017 | 10 | PARALELO | 9:43:58 | 8 | UTILITARIO | PELTON ARRANCANDO; LENTO |
| 3045 | 19-11-2017 | 10 | EN CABEZA | 10:03:00 | 5 | UTILITARIO | PARADOS EN SALIDA GLORIETA AHORA SON 9 |
| 3046 | 19-11-2017 | 10 | EN CABEZA | 10:03:00 | 2 | UTILITARIO | PARADOS EN SALIDA GLORIETA AHORA SON 9 |
| 3047 | 19-11-2017 | 10 | EN CABEZA | 10:03:00 | 1 | MONOVOLUMEN | PARADOS EN SALIDA GLORIETA AHORA SON 9 |
| 3198 | 19-11-2017 | 10 | EN COLA | 10:29:28 | 31 | MONOVOLUMEN | GRUPO DIVIDIDO |

Fig. 63 Tercera validación de datos según características del adelantamiento.

5.2.5. Generación de la base de datos

Una vez pre-procesado todas las tomas de datos obtenidas en campo, se generaron dos bases de datos finales en formato Excel. En el caso de las observaciones naturalísticas, se dividieron los resultados por día y por tipo de flujo observados (vehículos motorizados y bicicletas) y en las observaciones semi-naturalísticas se segregaron en las diferentes configuraciones.

La primera base de dato cuenta con todos los flujos medidos. Estos fueron agrupados cada 15 minutos, y cabe mencionar que hay varios días que se realizaron aforos manuales por problemas de la cámara y combinado con la baja presencia de ciclistas facilito este procedimiento. A continuación, se presentan los resultados del total de las horas de medición. En la tabla 1 del Anejo I: Toma de Datos se encuentra el detalle de esta información.

| Fecha | Mes | Día | Hora de inicio | Hora de fin | Duración | Flujo ciclista | |
|------------|------------|--------|----------------|-------------|----------|----------------|--------|
| | | | | | | Ingreso | Salida |
| 27-01-2018 | Enero | Sábado | 8:11:52 | 12:23:30 | 3:58:06 | 280 | 368 |
| 12-04-2018 | Abril | Jueves | 8:31:02 | 11:39:00 | 3:07:58 | 13 | 10 |
| 03-05-2018 | Mayo | Jueves | 8:52:30 | 12:14:07 | 3:21:37 | 50 | 30 |
| 26-05-2018 | Mayo | Sábado | 8:30:46 | 11:38:42 | 2:03:22 | 103 | 99 |
| 21-08-2018 | Agosto | Martes | 7:47:00 | 11:15:00 | 3:28:00 | 53 | 53 |
| 22-09-2018 | Septiembre | Sábado | 8:36:36 | 11:38:03 | 3:01:27 | 150 | 153 |

Tabla 18 Aforos ciclistas realizados en el tramo de estudio.

En la Tabla 18, se observa la mayor presencia de ciclista durante los sábados, llegando a observarse cerca de 650 ciclista durante las 3,5 horas de medición. Por otro lado, es importante destacar que la presencia de ciclista en las carreteras se ve afectada por la meteorología adversa, esto se pudo comprobar el día 12 de abril por ser un día con mucho viento (es el día que menos ciclistas se observaron).

En el caso del aforo vehicular se procedió a analizar, dos días de semana y un día festivo ya que la variabilidad del flujo vehicular es menor del total de horas de



medición y otros 3 días solo en los 15 minutos más cargados de ciclistas ya que el trabajo que conlleva es bastante. Se observaron los videos y se agruparon los flujos cada 15 minutos diferenciando por si es un vehículo ligero o pesado. A continuación, se presentan los resultados globales de estas observaciones.

| Fecha | Mes | Día | Hora inicio | Hora fin | Duración | Entrada vehículos | | Salida vehículos | |
|-------------------------|------------|--------|-------------|----------|----------|-------------------|---------|------------------|---------|
| | | | | | | Ligero | Pesados | Ligero | Pesados |
| 27-01-2018 ¹ | Enero | Sábado | 8:11:52 | 12:23:30 | 3:58:06 | 50 | 1 | 28 | 0 |
| 12-04-2018 | Abril | Jueves | 8:31:02 | 9:31:02 | 1:00:00 | 129 | 37 | 189 | 18 |
| 03-05-2018 ¹ | Mayo | Jueves | 8:52:30 | 12:14:07 | 3:21:37 | 32 | 3 | 37 | 7 |
| 26-05-2018 ¹ | Mayo | Sábado | 8:30:46 | 11:38:42 | 2:03:22 | 30 | 1 | 28 | 0 |
| 21-08-2018 | Agosto | Martes | 8:49:00 | 10:49:00 | 2:00:00 | 218 | 60 | 318 | 40 |
| 22-09-2018 | Septiembre | Sábado | 8:53:00 | 11:39:10 | 2:30:00 | 382 | 26 | 374 | 17 |

Tabla 19 Aforos vehicular realizados en el tramo de estudio.

En la Tabla 19 se puede observar que el tramo de estudio presenta un flujo un poco mayor en sentido norte – sur (desde Villamarxant a Cheste) durante los días de semana, en cambio el sábado presenta flujos equilibrados. Se observa, además, la presencia una gran presencia de tráfico pesado principalmente en los días de semana. Durante los días de semana se observa un flujo similar y este flujo aumenta durante los días festivos. En la tabla 2 del Anejo I: Toma de Datos se encuentra el detalle de esta información.

Las microsimulaciones se realizarán para la intensidad horaria punta, para ello, se seleccionarán los 15 minutos más cargados de ciclistas para cada día de observación, cabe mencionar, que no se observaron los videos realizados para el jueves 12 de abril, debido a la casi nula presencia de ciclistas producto a que este día existió de meteorología adversa (fuertes vientos). A continuación, se presentan las horas de medición segregando el flujo de ciclistas y vehículos a motor por sentido de circulación.

| Fecha | Mes | Día | hora inicio | hora fin | Flujo ciclista | | Entrada vehículos | | Salida vehículos | |
|------------|------------|--------|-------------|----------|----------------|--------|----------------------|---------|------------------|---------|
| | | | | | Ingreso | Salida | Ligeros | Pesados | Ligeros | Pesados |
| 27-01-2018 | Enero | Sábado | 9:26:52 | 9:41:52 | 64 | 22 | 50 | 1 | 28 | 0 |
| 12-04-2018 | Abril | Jueves | 11:01:02 | 11:16:02 | 5 | 0 | meteorología adversa | | | |
| | | | 8:46:02 | 9:01:02 | 2 | 0 | | | | |
| 03-05-2018 | Mayo | Jueves | 9:37:30 | 9:52:30 | 11 | 10 | 32 | 3 | 37 | 7 |
| 26-05-2018 | Mayo | Sábado | 9:00:46 | 9:15:46 | 28 | 26 | 30 | 1 | 28 | 0 |
| 21-08-2018 | Agosto | Martes | 9:19:00 | 9:34:00 | 9 | 13 | 28 | 4 | 37 | 3 |
| 22-09-2018 | Septiembre | Sábado | 9:08:06 | 9:23:06 | 43 | 11 | 30 | 2 | 23 | 0 |

Tabla 20 Intensidad del cuarto de hora más cargado.

¹ Se observaron los 15 minutos de flujos ciclistas más cargados para facilitar el procesamiento, además, esta es la información requerida para realizar las microsimulaciones.



Se considerará un factor de hora punta igual a uno para conseguir la intensidad horaria de modelación, es decir, que la intensidad del cuarto más cargada será multiplicada por 4. Las intensidades horarias para modelar serán las siguientes.

| Mes | Día | Hora inicio | Hora fin | Flujo ciclista | | Entrada vehículos | | Salida vehículos | |
|------------|--------|-------------|----------|----------------|--------|-------------------|---------|------------------|---------|
| | | | | Ingreso | Salida | Ligeros | Pesados | Ligeros | Pesados |
| Enero | Sábado | 9:26:52 | 10:26:52 | 256 | 88 | 200 | 4 | 112 | 0 |
| Mayo | Jueves | 9:37:30 | 10:37:30 | 44 | 40 | 128 | 12 | 148 | 28 |
| Mayo | Sábado | 9:00:46 | 10:00:46 | 112 | 104 | 120 | 4 | 112 | 0 |
| Agosto | Martes | 9:19:00 | 10:19:00 | 36 | 52 | 112 | 16 | 148 | 12 |
| Septiembre | Sábado | 9:08:06 | 10:08:06 | 172 | 44 | 120 | 8 | 92 | 0 |

Tabla 21 Intensidad horaria punta de ciclistas y vehículos a motor.

Además de obtener las intensidades horarias es necesario conocer como circulaban los ciclistas durante las mediciones puntuales, para lograr replicar lo más verídicamente el escenario actual. A continuación, la Fig. 64 se presenta una imagen que permite conocer la formación que lleva un pelotón en la hora de medición.



Fig. 64 Configuraciones de ciclistas observadas.

En la Tabla 22 se detallan todas las configuraciones observadas para los diferentes días. Se puede inferir de estos datos, que existen ciertas configuraciones con mayor frecuencia de aparición en cierto días de la semana, por ejemplo, es más probable encontrarse con pelotones grandes (más de 10 ciclistas) los días no laborales, esto se ajusta a que la mayoría de las peñas ciclistas se reúnen los días sábado principalmente para llevar a cabo esta práctica deportiva, por otro lado, podemos observar que para todos los días de medición, es recurrente observar ciclista individuales y o de dos recorriendo la ruta en los diferentes sentidos, esto es acorde con la información encontrada en el estado del arte de esta investigación. A continuación, se presentan las diferentes observaciones ciclistas.

| Configuración | Sábado Enero | Jueves Mayo | Sábado Mayo | Martes Agosto | Sábado Septiembre |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| | Ingreso Salida |
| 10 Línea | 2 | | 1 | | |
| 10 Paralelo | 3 | | | | 1 |
| Individual | 1 4 | 2 | 5 1 | 3 4 | 4 |
| 2 Línea | 1 1 | 1 | 2 | 1 | |
| 2 Paralelo | 1 | | 2 | | |
| 1+2 | 1 1 | | 1 | | |



| Configuración | Sábado Enero | | Jueves Mayo | | Sábado Mayo | | Martes Agosto | | Sábado Septiembre | |
|---------------|--------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|---------------|-----------|-------------------|-----------|
| | Ingreso | Salida | Ingreso | Salida | Ingreso | Salida | Ingreso | Salida | Ingreso | Salida |
| 2+1 | | | | 1 | | | | | | |
| 4 Línea | | | | | 1 | | | | | |
| 4 Paralelo | | | | | | | | 1 | 1 | 1 |
| 6 paralelo | 1 | 1 | | | | | 1 | | | |
| 2+2+2+1 | | 1 | | | | | | | | 1 |
| 6 Línea | | | | | | | | | 1 | 0 |
| 14 paralelo | | | | | | | | | | |
| 2+2+1 | | | | | | | | | | |
| 9 Línea | | | 1 | | | | | | | |
| 5 Línea | | | | 1 | | 3 | | | | |
| 8 paralelo | | | | | 1 | | | | | |
| 3 línea | | | | | | | | 1 | | |
| 12 paralelo | | | | | | | | | 1 | |
| 1+2+2+2 | | | | | | | | | 1 | |
| Total | 64 | 22 | 11 | 10 | 28 | 26 | 9 | 13 | 43 | 11 |

Tabla 22 Configuraciones de los pelotones ciclistas observadas.

Como se ha mencionado anteriormente, las bicicletas instrumentadas realizaron sus recorridos en 11 configuraciones diferentes, pero se observaron durante los diferentes días de medición otras configuraciones de ciclistas similares. Debido a que solo se cuenta con la caracterización de los pelotones de estudio, se procedió a relacionar las configuraciones observadas en campos con la configuración de estudio que más se asemeja a estos, esta similitud no permitirá ingresar al modelo de microsimulación todas las observaciones obtenidas. a continuación, se presenta las similitudes utilizaras.

| Configuración | Configuración similar |
|---------------|-----------------------|
| 9 Línea | 10 línea |
| 14 paralelo | 10 paralelo |
| 8 paralelo | 10 paralelo |
| 2+2+2+1 | 10 paralelo |
| 12 paralelo | 10 paralelo |
| 1+2+2+2 | 10 paralelo |
| 3 línea | 2 línea |
| 6 Línea | 4 línea |
| 5 Línea | 4 línea |
| 6 paralelo | 4 paralelo |
| 2+2+1 | 4 paralelo |

Tabla 23 Configuraciones más semejantes a las observadas en campo.

Esta similitud solo reestructura las configuraciones que recorrerán el tramo de estudio, ya que no modifica la cantidad de ciclistas que circulan por ella. En total, se obtuvieron las siguientes configuraciones ciclistas para los diferentes días de estudio durante los 15 minutos más cargados, estas configuraciones ciclistas serán ingresadas en el modelo de microsimulación incluyendo el flujo de vehículos a motor para lograr evaluar cómo influye la presencia de ciclistas en la funcionalidad de la carretera.



| Configuración | Sábado Enero | | Jueves Mayo | | Sábado Mayo | | Martes Agosto | | Sábado Septiembre | |
|---------------|--------------|-----------|-------------|----------|-------------|-----------|---------------|-----------|-------------------|-----------|
| | Ingreso | Salida | Ingreso | Salida | Ingreso | Salida | Ingreso | Salida | Ingreso | Salida |
| 10 Línea | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 Paralelo | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 |
| Individual | 1 | 4 | 0 | 2 | 5 | 1 | 3 | 4 | 4 | 0 |
| 2 Línea | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| 2 Paralelo | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1+2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2+1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 Línea | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 3 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 4 Paralelo | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Total | 62 | 23 | 12 | 9 | 30 | 23 | 7 | 12 | 42 | 14 |

Tabla 24 Configuraciones equivalentes para los cuartos de hora más cargados.

La segunda base de datos generadas contiene la información de las maniobras de adelantamientos obtenida de las bicicletas instrumentadas. Esta información fue segregada por configuración para poder observar la variación de diferentes parámetros medidos (velocidades relativas, tiempos de adelantamientos, etc.). A continuación, se presentan los adelantamientos observados validos luego del proceso de preprocesamiento.

| Pelotón | Configuración | Maniobras de adelantamientos validas |
|--------------|--------------------|--------------------------------------|
| 10 Ciclistas | Línea | 36 |
| | Paralelo | 30 |
| | En Cabeza | 33 |
| | En Cola | 41 |
| 4 ciclistas | Individual | 44 |
| | Dos en paralelo | 49 |
| | Dos en línea | 53 |
| | 1+2 | 24 |
| | 2+1 | 22 |
| | Cuatro en línea | 8 |
| | Cuatro en paralelo | 12 |

Tabla 25 Maniobras de adelantamientos realizadas en el tramo de estudio.

Se puede observar de en la Tabla 25 que se obtuvieron para el análisis de este estudio 140 adelantamientos a los pelotones de 10 ciclistas y 212 adelantamientos a pelotones de cuatro ciclistas. Para todas estas observaciones se presentan las caracterización de adelantamiento detallada en el punto "5.2.2.2 Estudio Semi-naturalístico". A continuación, se presenta una muestra de la base de datos obtenida.



| | A | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O |
|----|---------|------------|-----------------|--------------|---------------|------------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------------|
| | ID_TODO | Date | RoadSegment | N°_Ciclistas | Configuration | In_IDLaser | In_Camara | In_Idvideo | In_Duracion | In_Hfin | In_Hinicio | In_tiempo_aparicion_coche_video |
| 1 | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 1 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | 0:02:00 |
| 3 | 2 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 4 | 3 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 5 | 4 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | 0:02:07 |
| 6 | 5 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | 0:02:16 |
| 7 | 6 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 8 | 7 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 9 | 8 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 10 | 9 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 11 | 10 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | 0:02:23 |
| 12 | 11 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 13 | 12 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 14 | 13 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | 0:02:30 |
| 15 | 14 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | 0:02:41 |
| 16 | 15 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 17 | 16 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | 0:02:48 |
| 18 | 17 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 19 | 18 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 20 | 19 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 21 | 20 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 22 | 21 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 23 | 22 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 24 | 23 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 25 | 24 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 26 | 25 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 27 | 26 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 28 | 27 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 29 | 28 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 30 | 29 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 31 | 30 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | |
| 32 | 31 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | 0:05:45 |
| 33 | 32 | 03-05-2018 | R55_Vilamarxant | 2 | two in line | B2 | Camara3 | VIRB0083 | 0:23:56,000 | 9:00:46,000 | 8:36:50,000 | 0:05:55 |

Fig. 65 Base de datos obtenida producto el procesamiento de las bicicletas instrumentadas.

La base de datos final se presentará en la tabla 3 del Anejo I: Toma de datos. Toda la información obtenida en campo será utilizada para lograr caracterizar en el modelo de microsimulación la maniobra de adelantamiento a ciclistas, además los flujos vehiculares y bicicletas serán representada en la microsimulación en los diferentes escenarios modelados. Por lo tanto, toda esta información será considerada en el modelo de microsimulación para representar y modelar la situación actual del tramo de estudio.

5.3. Diseño del tramo de estudio en Aimsun

El desarrollo de la construcción del modelo de microsimulación del tramo de estudio se compone de varias subetapas complementarias para lograr replicar lo más veraz a la situación actual. El primer paso será obtener las características geométricas y operacionales del tramo de estudio (diseño en planta, alzado, marcas viales, limitaciones de velocidad, etc.), obtenidas las características se ingresarán al microsimulador Aimsun para lograr crear el modelo físico de la carretera.

5.3.1. Características geométricas y operacionales

Con el objetivo de simular el comportamiento de todos los vehículos en la CV- 50 entre el PK 76+550 al 83+500 es necesario crear un modelo en el microsimulador con las características geométricas y operacionales que nos permitan diagnosticar la situación actual del tramo de estudio. Este modelo será considerado el escenario base de este estudio, ya que posteriormente a partir de este diseño se aplicarán las propuestas de mejoras.



Para la construcción del modelo se requiere información del diseño geométrico, zonas de adelantamiento permitidas y las restricciones de velocidad a lo largo de la carretera. Para la obtención de esta información se ha recurrido a cartografía, ortofotos y verificado con la herramienta de Google Street View que cuenta con imágenes de mayo del 2018 junto con información procedente del proyecto Bike2lane. A continuación, se detallan las características del tramo de estudio.

5.3.1.1. Perfil en Planta

Para reproducir el perfil en planta del tramo de estudio, se cargó en el programa AIMSUN una ortofoto del Plan Nacional de Ortografía área (PNOA) de máxima actualidad a una escala de 1:50.000 en formato ECW, la cual permitirá dibujar sobre ella todos los elementos existentes.

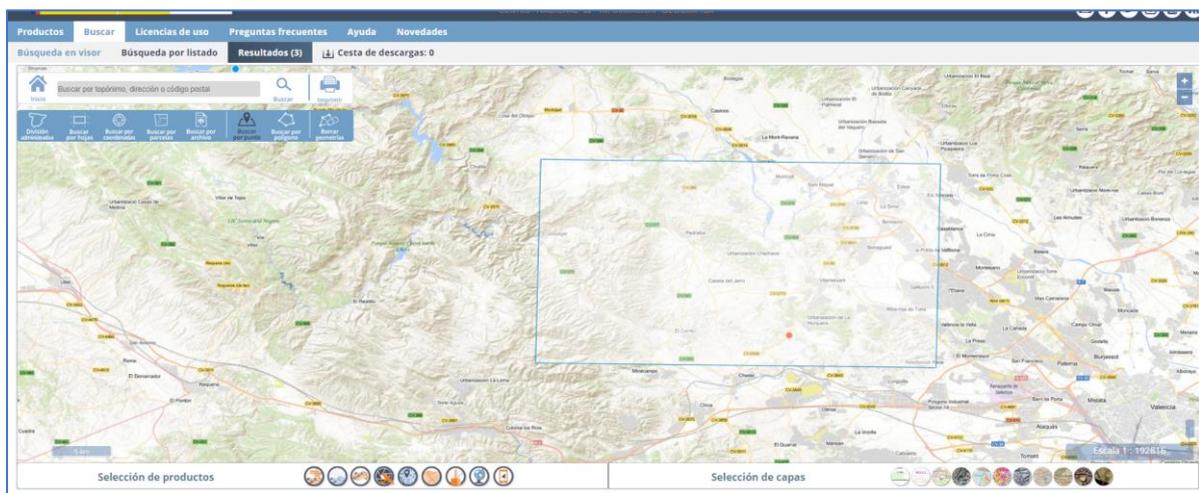


Fig. 66 Ortografía área del tramo de estudio (“Centro de Descargas del CNIG (IGN)”, 2019).

5.3.1.2. Sección transversal

En el caso de la sección transversal, se utilizará las imágenes de Google Street View como datos base y se verificará con información del proyecto Bike2lane.



Fig. 67 Características de la sección transversal del tramo de estudio.

A continuación, se presenta la sección transversal del tramo de estudio.



| Medidas representativas | | | PK Inicial | PK Final | Detalle |
|-------------------------|------------|-----------------|------------|----------|--|
| Arcén (m) | Carril (m) | Carril Bici (m) | | | |
| 1,5 | 3,5 | - | 76 + 550 | 82 + 239 | Arcén de entre 1 y 1,5 m según zonas. 1,5 mayormente |
| 1,5 | 3,5 | - | 82 + 239 | 82 + 377 | Intersección con arcén cebreado, pero espacio suficiente de 1,5 metros |
| 1,5 | 3,5 | - | 82 + 377 | 83 + 500 | Arcén de entre 1 y 1,5 m según zonas. 1,5 mayormente |

Tabla 26 Sección transversal del tramo de estudio.

Ya que la sección transversal presenta mayoritariamente un arcén de 1,5 metros y carriles de 3,5 metros se utilizará una sección de 7/10 y sin carriles bicis en el modelo de AIMSUN.

5.3.1.3. Perfil en alzado

Para obtener las diferentes elevaciones fue cargado el tramo de estudio en la herramienta ArcGIS junto con la cartografía elaborada por el Institut Cartogràfic Valencià que cubre íntegramente la Comunitat Valenciana. Realizada mediante generalización cartográfica de la serie CV05. Sistema Geodésico de Referencia ETRS89, proyección UTM en el huso 30. Código EPSG: 25830. Precisión planimétrica 10 metros.

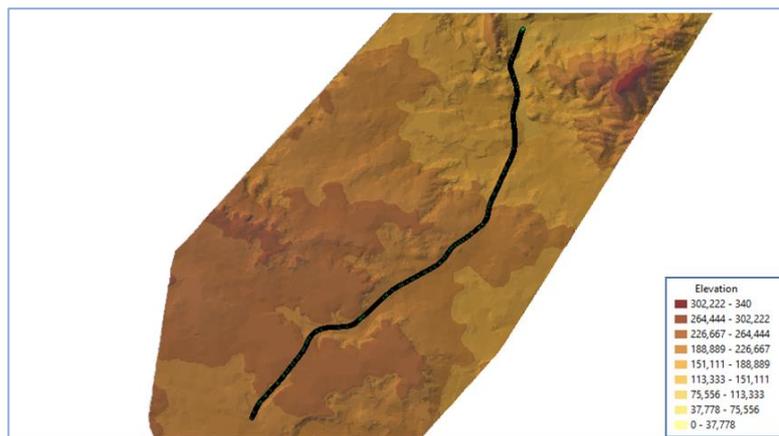


Fig. 68 Elevaciones tramo de estudio utilizando programa ArcGIS (Balseca, 2019).

El programa ArcGIS nos entrega las elevaciones cada 5 metros ya que se utilizó una cartografía con escala de 1:5000. Esta información ha permitido realizar la tramificación del tramo de estudio en subtramos de pendiente homogéneos. A continuación, se presentan los subtramos considerados para la modelación en AIMSUN y el perfil de elevaciones obtenidos.

| PK Inicial | PK Final | Altitud inicial | Altitud final | Tramo (km) |
|------------|----------|-----------------|---------------|------------|
| 76 + 550 | 77 + 630 | 210 | 235 | 1080 |
| 77 + 630 | 78 + 355 | 235 | 215 | 725 |
| 78 + 355 | 78 + 575 | 215 | 215 | 220 |
| 78 + 575 | 79 + 800 | 215 | 195 | 1225 |
| 79 + 800 | 80 + 255 | 195 | 205 | 455 |
| 80 + 255 | 81 + 100 | 205 | 185 | 845 |
| 81 + 100 | 81 + 285 | 185 | 185 | 185 |
| 81 + 285 | 81 + 815 | 185 | 160 | 530 |



| PK Inicial | PK Final | Altitud inicial | Altitud final | Tramo (km) |
|------------|----------|-----------------|---------------|------------|
| 81 + 815 | 81 + 980 | 160 | 163 | 165 |
| 81 + 980 | 82 + 655 | 163 | 144 | 675 |
| 82 + 655 | 83 + 500 | 144 | 136 | 845 |

Tabla 27 Elevaciones de los subtramos de estudio.

El tramo de 6,95 km aproximadamente presenta pendiente longitudinal media de -1,06%, la máxima pendiente que se observa en el tramo de estudio es de -4,07% presente en 530 metros aproximadamente, por lo que se considera en general una carretera llana (menor a 5%). Las diferentes altitudes serán ingresadas directamente al microsimulador y el estima directamente las pendientes por tramo.

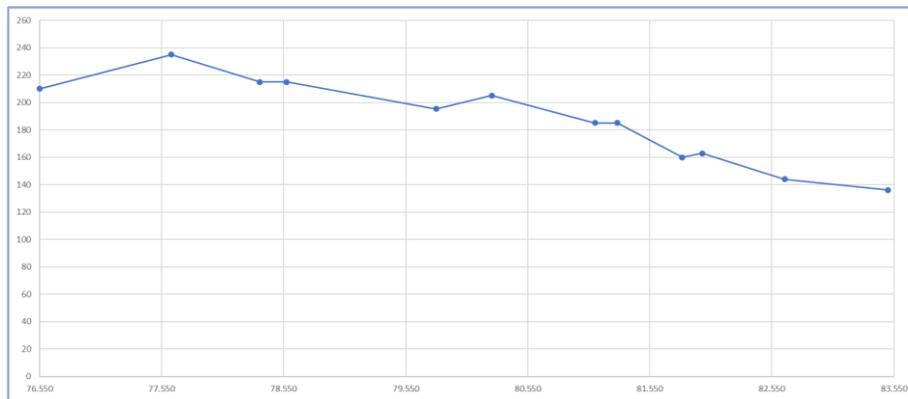


Fig. 69 Perfil de elevaciones tramo de estudio.

5.3.1.4. Limitaciones de velocidad

Una característica necesaria para la creación del modelo de simulación es conocer las limitaciones de velocidad que presenta la carretera, ya que la velocidad es una característica fundamental del flujo de tráfico.

La velocidad máxima permitida en el tramo de estudio fue modificada recientemente a 90 km/h para vehículos ligeros y de 80 km/h para vehículos pesados pero debido a que las observaciones se realizaron antes de estas modificaciones es que la velocidad máxima del tramo de estudio será de 100 km/h, se aplicará este criterio para lograr replicar las observaciones en campo, por otro lado, las maniobras de adelantamientos no superar estas velocidades máximas. Además, a lo largo del tramo se observan recomendaciones de disminución de velocidad para aumentar la seguridad del tramo, aunque hay que tener en cuenta que la utilización de señalética no es la solución para aumentar la seguridad, sino que debe estar considerado en el diseño de carretera. Estas recomendaciones de velocidad varían según el PK y el sentido de circulación. A continuación, se presentan las distintas limitaciones de velocidad para el tramo de estudio según sentido de circulación.

| Sentido | Limitación | Motivo | Obligatoriedad | PK Inicial | PK Final | Longitud Tramo (km) |
|---------|------------|-----------------|----------------|------------|----------|---------------------|
| S-N | 100 | Velocidad máx. | Si | 76 + 550 | 77 + 764 | 1,21 |
| | 70 | Curva peligrosa | No | 77 + 764 | 78 + 673 | 0,91 |
| | 100 | Velocidad máx. | Si | 78 + 673 | 80 + 592 | 1,92 |
| | 60 | Curva peligrosa | No | 80 + 592 | 81 + 049 | 0,46 |
| | 100 | Velocidad máx. | Si | 81 + 049 | 82 + 101 | 1,05 |
| | 80 | Intersección | Si | 82 + 101 | 82 + 185 | 0,08 |



| Sentido | Limitación | Motivo | Obligatoriedad | PK Inicial | PK Final | Longitud Tramo (km) |
|---------|------------|-----------------|----------------|------------|----------|---------------------|
| | 60 | Intersección | Si | 82 + 185 | 82 + 373 | 0,19 |
| | 100 | Velocidad máx. | Si | 82 + 373 | 82 + 774 | 0,40 |
| | 70 | Curva peligrosa | No | 82 + 774 | 83 + 121 | 0,35 |
| | 100 | Velocidad máx. | Si | 83 + 121 | 83 + 500 | 0,39 |
| N-S | 100 | Velocidad máx. | Si | 83 + 500 | 83 + 121 | 0,39 |
| | 70 | Curva peligrosa | No | 83 + 121 | 82 + 774 | 0,35 |
| | 100 | Velocidad máx. | Si | 82 + 774 | 82 + 503 | 0,27 |
| | 80 | Intersección | Si | 82 + 503 | 82 + 427 | 0,08 |
| | 60 | Intersección | Si | 82 + 427 | 82 + 206 | 0,22 |
| | 100 | Velocidad máx. | Si | 82 + 206 | 81 + 049 | 1,16 |
| | 100 | Velocidad máx. | Si | 81 + 049 | 80 + 592 | 0,45 |
| | 100 | Velocidad máx. | Si | 80 + 592 | 78 + 673 | 1,92 |
| | 70 | Curva peligrosa | No | 78 + 673 | 77 + 764 | 0,91 |
| | 100 | Velocidad máx. | Si | 77 + 764 | 76 + 693 | 1,07 |
| | 70 | Intersección | Si | 76 + 693 | 76 + 550 | 0,14 |

Tabla 28 Limitaciones de velocidad del tramo de estudio por sentido de circulación.

El programa de microsimulación solo permite ingresar reducciones de velocidad puntuales y no recomendaciones de reducción de velocidad, es por esto, que si consideramos incluir todas las recomendaciones de reducción de velocidad estaríamos condicionando la velocidad de circulación de la carretera. Por este motivo, solo se ingresarán al microsimulador la velocidad máxima de la carretera y las reducciones de velocidad obligatorias.

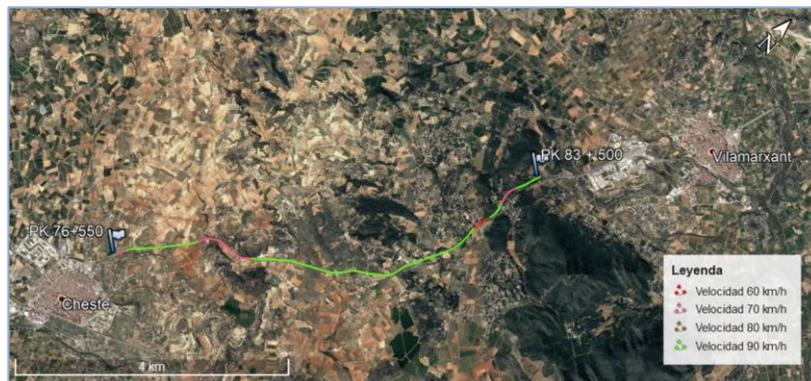


Fig. 70 Recomendaciones de Limitaciones de velocidad tramo de estudio sentido Norte - Sur.

5.3.1.5. Marcas viales.

La normativa de trazado, la instrucción 8.2 IC de marcar viales (Ministerio de Fomento, 2016a) contiene los criterios para determinar las zonas de prohibición de adelantamiento, por medio de la señalización horizontal. Para conocer las limitaciones de adelantamiento se ha analizado la demarcación horizontal del tramo de estudio por sentido de circulación, observando las siguientes limitaciones.

| Sentido | Demarcación | Longitud (km) | PK Inicial | PK Final |
|---|-------------|---------------|------------|----------|
| Sur – Norte Cheste - Villamarxant | Continua | 0,25 | 76 + 550 | 76 + 799 |
| | Segmentada | 0,55 | 76 + 799 | 77 + 346 |
| | Continua | 1,40 | 77 + 346 | 78 + 743 |
| | Segmentada | 1,12 | 78 + 743 | 79 + 858 |
| | Continua | 1,40 | 79 + 858 | 81 + 262 |



| Sentido | Demarcación | Longitud (km) | PK Inicial | PK Final |
|---|-------------|---------------|------------|----------|
| | Segmentada | 0,40 | 81 + 262 | 81 + 658 |
| | Continua | 1,86 | 81 + 658 | 83 + 514 |
| Norte – Sur Villamarxant - Cheste | Continua | 1,58 | 83 + 514 | 81 + 934 |
| | Segmentada | 0,44 | 81 + 934 | 81 + 499 |
| | Continua | 0,78 | 81 + 499 | 80 + 720 |
| | Segmentada | 0,25 | 80 + 720 | 80 + 469 |
| | Continua | 0,79 | 80 + 469 | 79 + 683 |
| | Segmentada | 1,13 | 79 + 683 | 78 + 550 |
| | Continua | 0,15 | 78 + 550 | 78 + 402 |
| | Segmentada | 0,24 | 78 + 402 | 78 + 162 |
| | Continua | 0,60 | 78 + 162 | 77 + 564 |
| | Segmentada | 0,77 | 77 + 564 | 76 + 799 |
| | Continua | 0,25 | 76 + 799 | 76 + 550 |

Tabla 29 Demarcación horizontal tramo de estudio.

En la Fig. 71 podemos observar que la mayoría del tramo de estudio presenta línea continua, es decir, existe prohibición de adelantamiento.

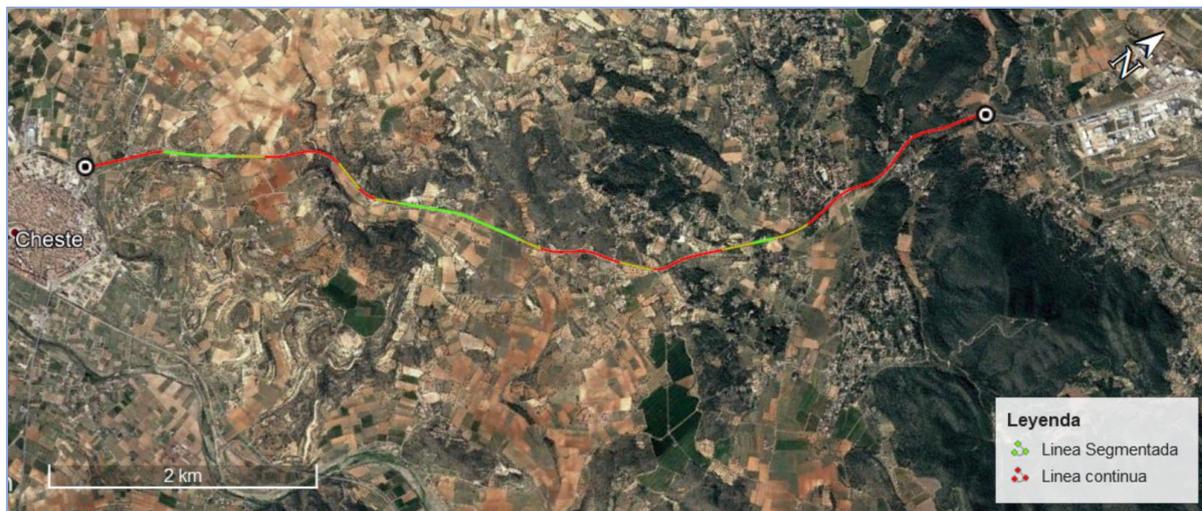


Fig. 71 Demarcación horizontal tramo de estudio.

Las líneas continuas en el modelo Aimsun se traducen en una prohibición de la maniobra de adelantamiento, por lo que al ingresar la demarcación horizontal existente estaríamos prohibiendo el adelantamiento a todos los tipos de vehículos (incluyendo bicicletas).

Recordando el objetivo de este proyecto, que es replicar el funcionamiento de las carreteras convencionales con presencia de ciclistas es necesario tener en cuenta el “Artículo 88” del Reglamento de Circulación (Real Decreto Legislativo 6/2015, 2015) que menciona que *“Está permitido el rebase de conductores de bicicletas, aunque para ello haya que ocupar parte de la calzada en reservada al sentido contrario, después haberse cerciorado de que se puede realizar la maniobra sin peligro”*. Teniendo en cuenta que se pueden producir adelantamiento a ciclistas, aunque la demarcación horizontal sea continua, es necesario introducir al modelo de microsimulación las líneas continuas en las zonas donde no se puedan efectuar las maniobras de manera segura, es decir, donde no se precise de una visibilidad



mínima que depende de la normativa, de la forma, dimensiones y las disposiciones de los elementos del trazado o cercanos a el que puedan afectar a la visibilidad de la carreteras.

Para identificar estas zona, se generaron los perfiles de visibilidades del tramo de estudio según el sentido de circulación mediante Google Street View. La metodología utilizada consistió en medir desde la posición del vehículo que efectuaría la maniobra de adelantamiento (en este caso vehículo con cámara de Google earth) y la máxima distancia que pueda divisar sin que luego desaparezca de su vista hasta finalizar dicha maniobra, aunque la cámara de Google earth se encuentre a mayor altura que el observador según normativa, es una buena aproximación de donde será realmente posible el adelantamiento a ciclistas. A continuación, se presentan los perfiles de visibilidad obtenidos.

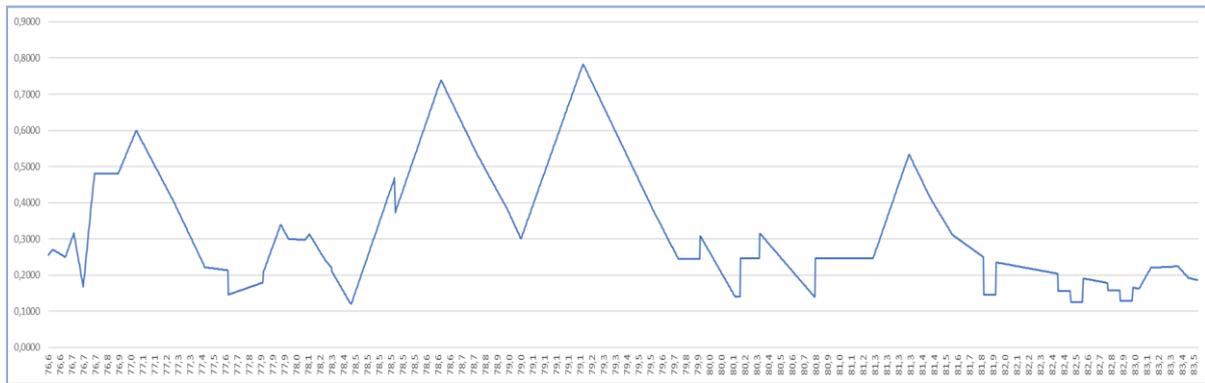


Fig. 72 Perfil de visibilidad sentido PK 76+550 a PK 83+500

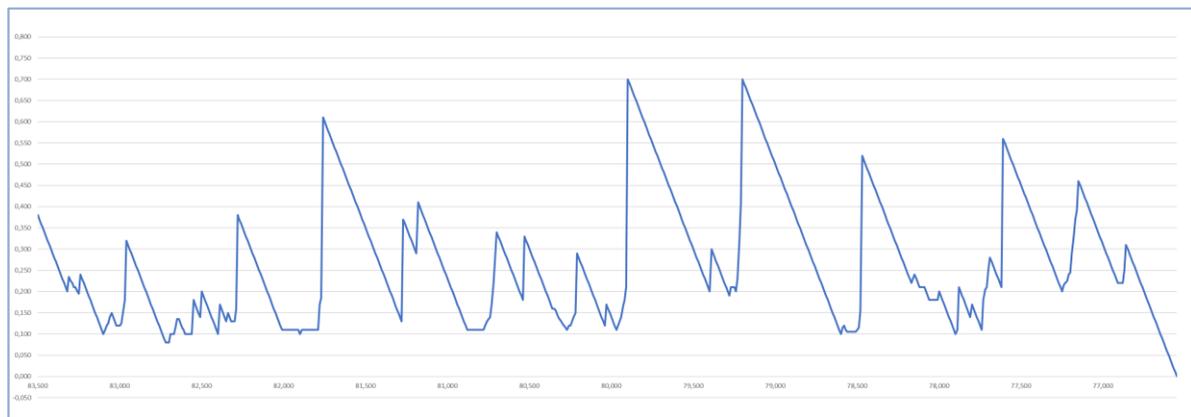


Fig. 73 Perfil de visibilidad sentido PK 83+500 a PK 76+550.

Obtenidos los diferentes perfiles de visibilidad se ha sobrepuesto líneas altas y bajas donde se puede observar donde está permitido adelantar actualmente (La línea azul más alta representa que está permitido realizar la maniobra de adelantamiento).

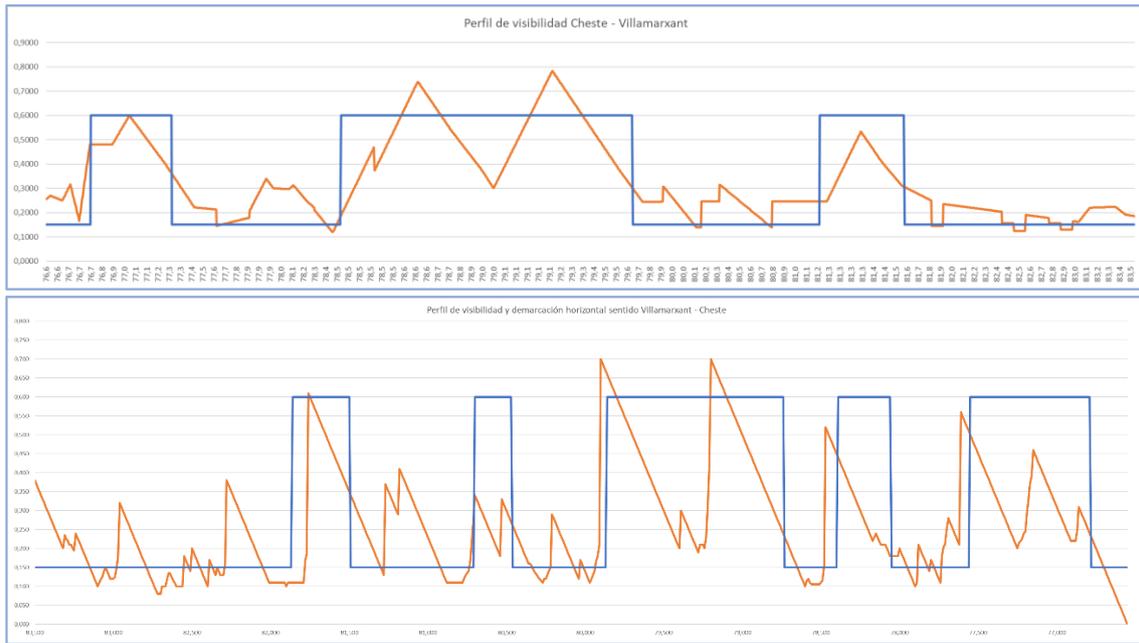


Fig. 74 Perfil de visibilidad y demarcación horizontal por sentido.

Podemos observar de estas figuras que existen una variación de visibilidad y prohibición de adelantamiento en todo el tramo de estudio, con esta información se propone investigar en que zonas se puede permitir un el adelantamiento seguro sin que afecte la funcionalidad actual de la carretera, esto es porque:

- La mayoría de las maniobras de adelantamiento se realizarán a los pelotones de ciclistas por su baja velocidad de circulación (máximo 30 m/h en el caso de bicicletas aisladas);
- La IMD del tramo de estudio es relativamente baja (4.911 veh);
- La mayoría de los vehículos circulan a una velocidad de flujo libre, con lo que existen pocos adelantamientos entre vehículos a motor;
- Solo se considerará modificar las marcas viales en el sentido que se encuentren los pelotones de ciclistas, para no favorecer en cierta medida la circulación de los vehículos en sentido opuesto.

Para identificar las zonas donde no es seguro realizar el adelantamiento por motivos de falta de visibilidad, se consideró utilizar la normativa la instrucción 8.2 IC de marcar viales (Ministerio de Fomento, 2016a), que menciona que la marca longitud continua se utiliza como consecuencia de la falta de visibilidad para adelantamiento, estableciendo según la velocidades máxima de circulación unas distancias mínimas de necesarias para comenzar la prohibición y terminar la misma. Las distancias que exige son las siguientes:

| Velocidad máxima (km/h) | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Distancia de visibilidad necesaria (DVN) para no iniciar la marca continua de prohibición de adelantamiento o para finalizarla en vías existentes (m). | 50 | 75 | 100 | 130 | 165 | 205 | 250 |
| Distancia de visibilidad necesaria (DVN) para finalizar la marca continua de prohibición de adelantamiento en vías de nuevo trazado (m). | 145 | 180 | 225 | 265 | 310 | 355 | 395 |



| Velocidad máxima (km/h) | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Distancia deseable entre dos marcas continuas de prohibición de adelantamiento en vías de nuevo trazado (m). | 160 | 200 | 245 | 290 | 340 | 385 | 435 |

Tabla 30 Distancias de visibilidad mínimas para aplicación de demarcación longitudinal (Ministerio de Fomento, 2016a).

Considerando la que velocidad de circulación de los diferentes pelotones es menor a 30 km/h, es que se consideró utilizar los rangos establecidos para la velocidad de 40 km/h. por lo tanto, se aplicará la prohibición de adelantamiento cuando la visibilidad disponible sea igual o inferior a 150 metros (manteniendo esta prohibición si existen algunas mínimas variaciones) y considerando los 160 metros mínimos entre las zonas de prohibición de adelantamiento. A continuación, se presentan las nuevas prohibiciones de adelantamiento a todos los vehículos, separadas por sentido de circulación.

| Inicio prohibición adelantamiento | Fin prohibición adelantamiento | Longitud (km) |
|-----------------------------------|--------------------------------|---------------|
| PK 83 + 150 | PK 82 + 980 | 0,170 |
| PK 82 + 790 | PK 82 + 300 | 0,490 |
| PK 82 + 050 | PK 81 + 870 | 0,180 |
| PK 81 + 430 | PK 81 + 280 | 0,150 |
| PK 80 + 920 | PK 80 + 730 | 0,190 |
| PK 80 + 390 | PK 80 + 220 | 0,170 |
| PK 80 + 070 | PK 79 + 930 | 0,140 |
| PK 78 + 650 | PK 78 + 480 | 0,170 |
| PK 78 + 070 | PK 77 + 740 | 0,330 |
| PK 76 + 700 | PK 76 + 550 | 0,150 |

Tabla 31 Propuesta de marcas viales sentido Villamarxant – Cheste.

| Inicio prohibición adelantamiento | Fin prohibición adelantamiento | Longitud (km) |
|-----------------------------------|--------------------------------|---------------|
| PK 76 + 550 | PK 76 + 7414 | 0,191 |
| PK 77 + 602 | PK 77 + 8669 | 0,265 |
| PK 78 + 301 | PK 78 + 4893 | 0,189 |
| PK 80 + 046 | PK 80 + 1963 | 0,150 |
| PK 80 + 601 | PK 80 + 7963 | 0,195 |
| PK 81 + 803 | PK 81 + 9518 | 0,148 |
| PK 82 + 401 | PK 82 + 9946 | 0,594 |

Tabla 32 Propuesta de marcas viales sentido Cheste - Villamarxant.



5.3.2. Pre-modelo de microsimulación

Una vez conocidas obtenidas las diferentes características geométricas y de operación del tramo de estudio, estas se ingresarán en su totalidad, ya que un error en el ingreso afectará directamente a la simulación. Para ingresar todas estas características se utilizaron diferentes herramientas del microsimulador, para así, reproducir por ejemplo el número de pistas, secciones, demarcaciones, pendientes longitudinales.

El primer paso en el microsimulador (Aimsun versión 8,4) es crear un nuevo proyecto seleccionando el sistema de coordenadas, sentido de circulación, nombre del proyecto y las características generales de microsimulación (se seleccionaron todas). La siguientes figura muestra las variables ingresadas.

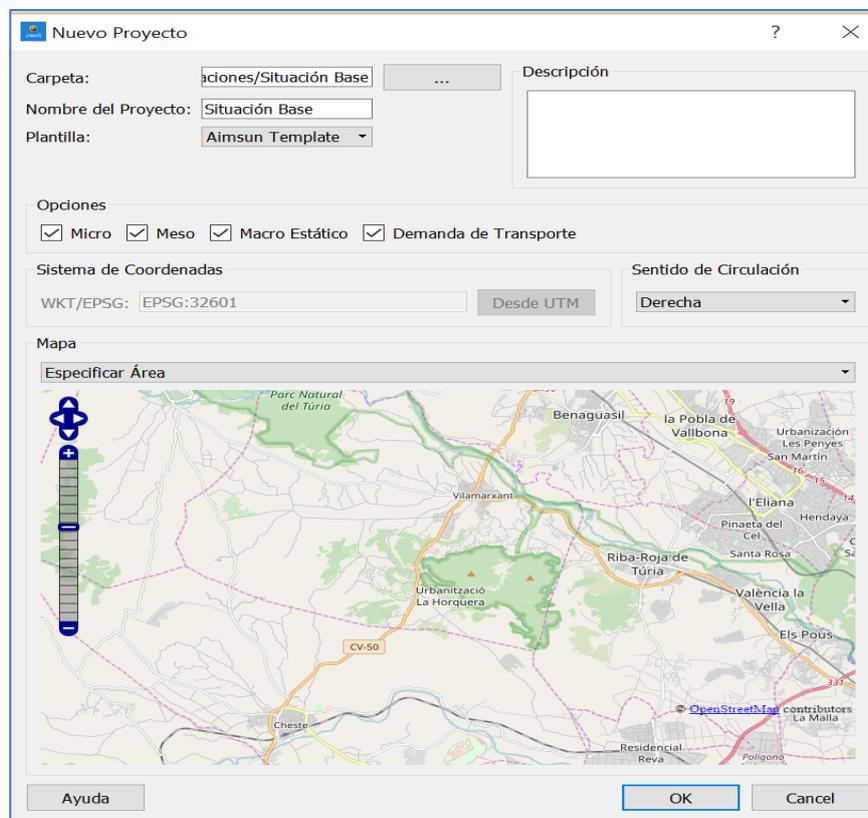


Fig. 75 Creación del modelo de microsimulación.

Ya creado el archivo de trabajo, se procedió a importar la ortofoto del Plan Nacional de Ortografía área (PNOA) que nos permitirá ingresar el trazado en planta del tramo de estudio. El tramo se inició en el PK 76+550 y finaliza en el PK 83+500. A continuación, se presenta los pasos seguidos y el tramo total a modelar.

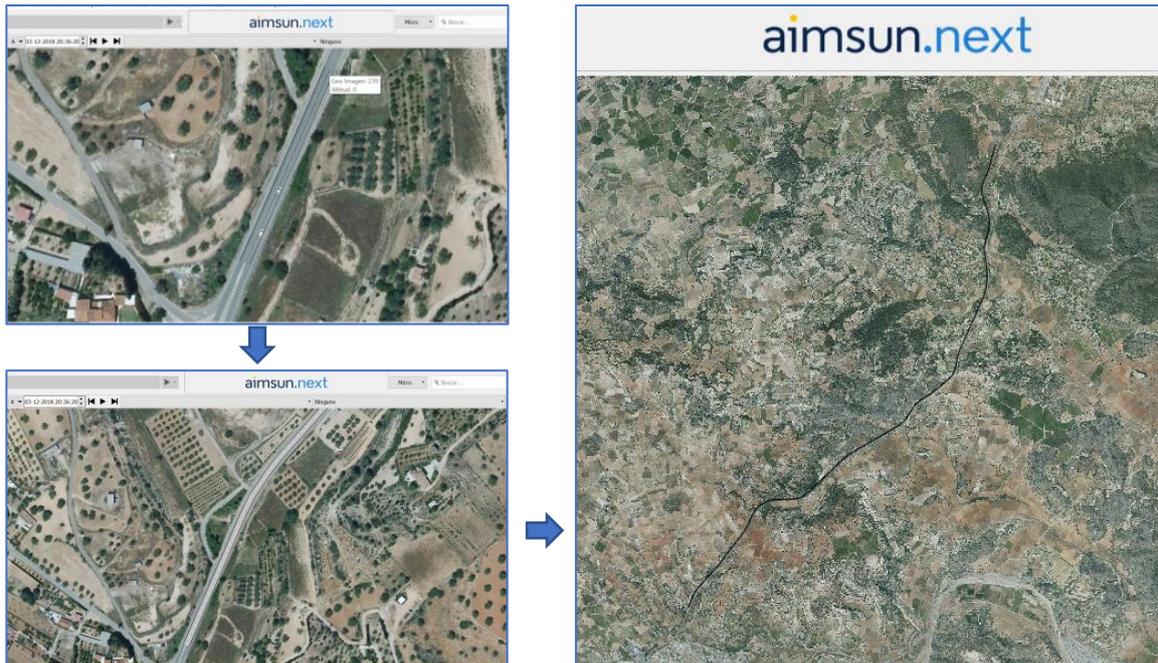


Fig. 76 Introducción del trazado en planta.

Trazado el diseño en planta de tramo de estudio es necesario ingresar las variables generales de la carretera, que condicionaran la circulación de todos los usuarios:

- Velocidad máxima: 100 km/h;
- Capacidad: 1700 veh/h (HCM 2016);
- Tipo de vía: carretera convencional (vía primaria en AIMSUN);
- Ancho de carril: 3,50 metros;
- Número de carriles: 1 por sentido.

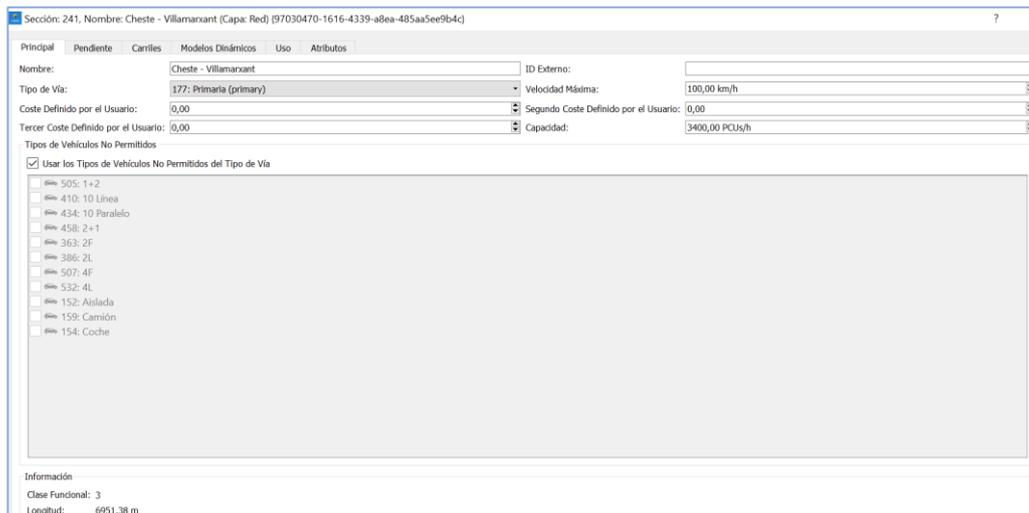


Fig. 77 Ingreso de características generales del tramo de estudio.

Todos los datos ingresados nos permitirán lograr el perfil en planta del tramo de estudio, ahora para seguir perfeccionando el modelo, se ingresarán las altitudes de los diferentes tramos obtenidos en el apartado 5.3.1.1 Perfil en alzado. Aimsun



permite ingresar las altitudes en ciertos puntos, entregando las pendientes a partir de estas altitudes.

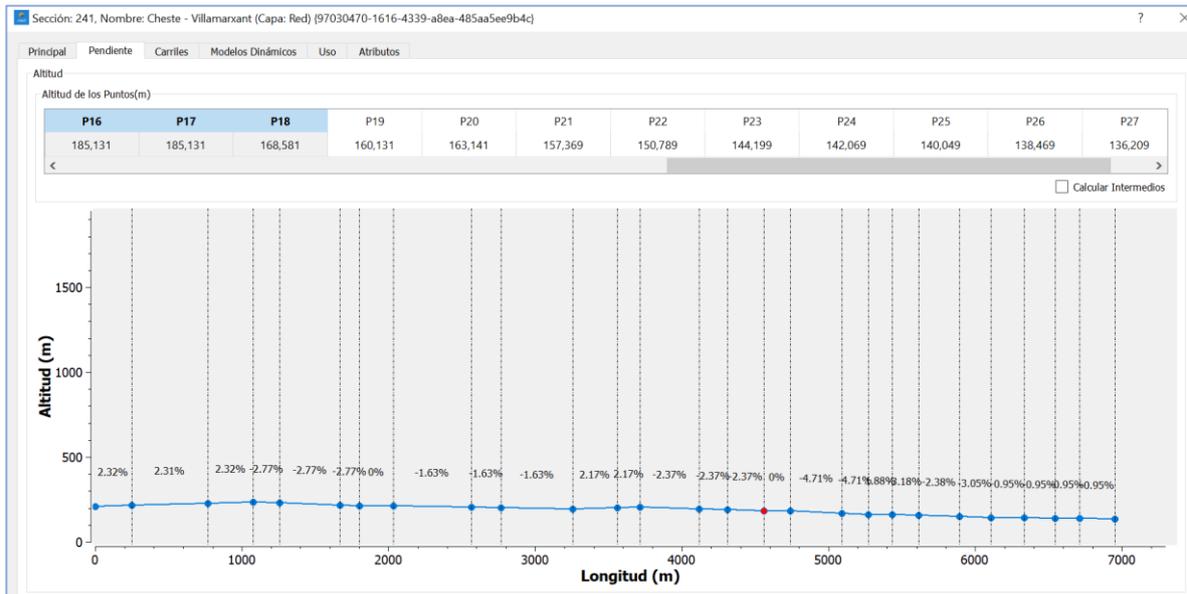


Fig. 78 Pendientes longitudinales del tramo de estudio.

Aimsun solo permite ingresar carriles con un sentido de circulación, por lo que para crear una carretera convencional (un carril por sentido) se deben generar dos sección con iguales características con 2 carriles por sentido, luego se aplicará la opción de sección espejo, esto significa que cada sección interactuará con una sección espejo que representa el carril en sentido contrario, además se debe ingresar que los carriles uno (carril izquierdo según sentido de circulación) solo permita la circulación de transporte público, esto provocará que el programa considere solo un el carril disponible por sentido . Se debe considerar que las dos secciones que se crearán deben tener las mismas características, ya que la sección única tendrá las características de la que se seleccionó como espejo.

| | |
|---------------------------|----------------------------|
| Sección Espejo: | 314: Villamarxant - Cheste |
| Distancia de Visibilidad: | 250,00 m |
| Factor de Visibilidad: | 1,75 |

Fig. 79 Creación de carreteras de un carril por sentido mediante sección espejo.

La distancia de visibilidad disponible en correspondencia con una zona de adelantamiento se define con el parámetro distancia de visibilidad (DV). Este valor corresponde a la distancia de visibilidad disponible en el final de la zona de adelantamiento. La distancia de visibilidad disminuye linealmente desde el punto de partida de dicha zona, donde es igual a DV más la longitud total de la zona de adelantamiento, hasta el punto final de la misma.

Una vez consideradas todas las características geométricas y operacionales del tramo de estudio se estuvo el siguiente modelo de microsimulación y obtenida la



base de datos de la toma de datos es posible comenzar la etapa de calibración del microsimulación.



Fig. 80 Modelo de microsimulación de la CV-50 entre el PK 76+550 a PK 83+500.

5.4. Calibración del modelo de microsimulación

Finalizada la construcción del modelo que replica la geometría y restricciones operacionales del tramo de estudio, se puede considerar que solo se tiene un modelo de tráfico básico, lo que quiere decir esto, es que sin una calibración adecuada no se puede asegurar que el modelo pueda replicar correctamente el comportamiento de los vehículos.

Por lo tanto, el proceso para 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, según afirma Barceló (Barceló, 2010). El objetivo de la calibración es que los valores asignados a las variables consideradas en el modelo sean tales que permitan reducir al mínimo las diferencias entre los valores obtenidos de las modelaciones (por ejemplo, tiempo de viaje, velocidad, etc.), y los que presenta la carretera real, de manera que la microsimulación represente el comportamiento de la carretera a modelar. En este caso, se calibrará el microsimulador para replicar la presencia de tráfico motorizado y ciclista en la carretera convencional CV-50 del PK 76+550 al PK 83+500.

La calibración de un modelo requiere de datos reales que nos permitan comparar los resultados de la modelación. El proceso de calibración será realizado en etapa, comenzando con la calibración de los parámetros globales, locales y de los vehículos a motor, separándolos según su nivel de detalle (macroscópico y microscópico). Una vez calibrado su funcionamiento se procederá a calibrar el comportamiento de los pelotones de ciclistas en el tramo de estudio según los resultados de la base de datos obtenida en el punto anterior (velocidad, tiempos de viaje, largo de pelotón, etc.)



(será un proceso iterativo). Todos los parámetros que no se especifiquen en los siguientes apartados se utilizarán los valores por defecto. A continuación, en la Fig. 81 se presenta un esquema del proceso de calibración que se realizará en esta investigación.

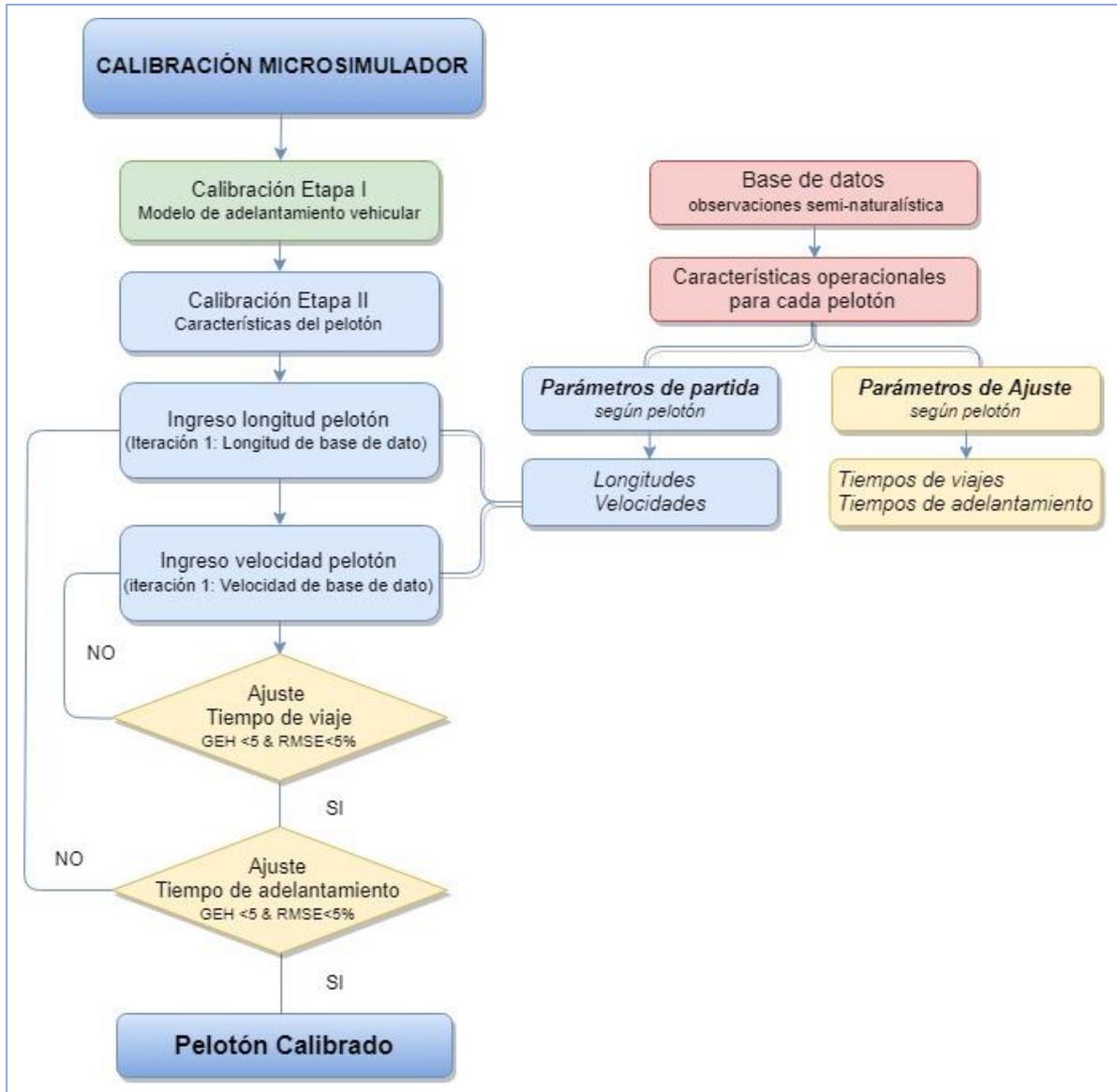


Fig. 81 Metodología de calibración microsimulador Aimsun.

Antes de comenzar a describir las diferentes etapas de calibración con sus respectivas subetapas, se cree necesario comprender cómo se obtuvieron los parámetros calibrados del modelo de adelantamiento en carreteras convencionales incluido en el microsimulador Aimsun creado en la tesis doctoral de Llorca (2015). Comprendido su funcionamiento, nos facilitará decidir si este modelo es aplicable para modelar el adelantamiento de vehículos de motor a pelotones de ciclistas.



5.4.1. Modelo de adelantamientos en carreteras convencionales

Como se ha mencionado en el estado del arte, Aimsun ha incluido un módulo específico para carreteras convencionales, donde el adelantamiento está permitido (Carlos Llorca et al., 2017). El modelo de adelantamiento incorpora 14 parámetros que incluyen y analizan el factor humano, la geometría de la vía y las características técnicas de los vehículos. Los 14 parámetros considerados en el modelo de adelantamiento son los siguientes:

- Umbral de tiempo de retardo por la decisión de adelantar (s);
- Umbral mínimo para la diferencia de velocidad (km/h);
- Umbral máximo para la diferencia de velocidad (km/h);
- Tamaño máximo del pelotón para querer adelantar (vehículos);
- Número máximo de adelantamientos simultáneos (pasos);
- Retardo entre adelantamientos simultáneos (s);
- Factor de reducción para el coche-siguiente;
- Aumento de la velocidad del vehículo durante el adelantamiento;
- Umbral para la máxima diferencia entre la velocidad estándar y la velocidad durante el adelantamiento (km/h);
- Tiempo restante hasta el final del tramo de carretera simulado (s);
- Margen de seguridad para la maniobra de adelantamiento (s);
- Sección espejo;
- Distancia de visibilidad en el extremo de la sección de adelantamiento (m);
- Factor de la distancia de visibilidad.

Los 10 primeros parámetros se relacionan con los modelos de comportamiento vehicular a través de toda la red. Estos parámetros no están definidos ni en forma local ni en forma específica para cada tipo de vehículo. Son utilizados para todos los vehículos, en toda la red y durante toda la simulación, el undécimo se relaciona con el tipo de vehículo considerado y los tres parámetros restantes con los tramos individuales de la carretera.

The screenshot shows the 'Seguimiento de Vehículos' (Vehicle Following) and 'Cambio de Carril' (Lane Change) configuration panels in the Aimsun software. The 'Seguimiento de Vehículos' panel includes settings for 'Modelo de Seguimiento de Vehículos a Dos Carriles' (Two-lane vehicle following model), with parameters for 'Número de Vehículos' (4), 'Distancia Máxima' (100,00 m), 'Diferencia Máxima de Velocidad' (50,00 km/h), 'Diferencia Máxima de Velocidad en Rampa' (70,00 km/h), and 'Consideración de la Diferencia de Velocidad' (Relativa). The 'Cambio de Carril' panel includes 'Variabilidad de la Distancia de Zona' (40%), 'Modelo de Adelantamiento en Vías de Dos Sentidos y Dos Carriles' (checked), and various parameters for lane change behavior such as 'Umbral del Tiempo de Demora' (240,00 seg), 'Número de Adelantamientos Simultáneos Permitidos' (10), 'Umbral de la Diferencia de Velocidad Mínima' (10,00 km/h), 'Demora entre Adelantamientos Simultáneos' (3,00 seg), 'Umbral de la Diferencia de Velocidad Máxima' (35,00 km/h), 'Factor de Sensibilidad para el Modelo Reducido de Seguimiento de Vehículos' (0,65), 'Posición Máxima' (1), 'Factor de Mejora de la Velocidad en el Adelantamiento' (1,10), 'Umbral del Tiempo de Viaje Restante' (0,00 seg), and 'Umbral de la Diferencia de Velocidad para la Mejora de la Velocidad en el Adelantamiento' (15,00 km/h). Below these are 'Velocidades de Cola' (Queue Velocities) for 'Velocidad de Formación de Cola' (1,00 m/s) and 'Velocidad de Salida de Cola' (4,00 m/s), and a checkbox for 'Modelos de Comportamiento' (External Behavior Models).

Fig. 82 Modelo de adelantamiento en carreteras convencionales.



La calibración inicial de los parámetros se realizó de forma conjunta entre la UPV y TSS. Para ello, se emplearon más de 1752 maniobras de adelantamiento en España, observadas en el proyecto de investigación PASSING. Aunque este modelo fue calibrado para la maniobra de adelantamiento a vehículos a motor, los principios de este modelo (deseo, decisión y ejecución) se cumplirán al considerar adelantar otro vehículo, ya que el adelantamiento se basa en el comportamiento de las personas frente la presencia de un vehículo más lento, por lo tanto, se considera correcta la utilización de este modelo calibrado en la tesis doctoral de Llorca para modelar el adelantamiento a ciclistas.

En el caso del adelantamiento a ciclistas el deseo de adelantar siempre estará presente ya que la diferencia entre la velocidad deseada de los vehículos y la velocidad real en la mayoría será mayor al umbral calibrado (35 km/h) (debido a la baja velocidad de los ciclistas). Ahora en el caso de la decisión de realizar la maniobra de adelantamiento, esta dependerá de la posibilidad de adelantamiento (línea continua) y la distancia de visibilidad existente, debido a que en el caso de los adelantamiento a ciclista está permitido realizar el adelantamiento en línea continua mientras no se afecte la seguridad de los ciclistas, se consideró la utilización de línea continua solo en zonas donde la distancia de visibilidad sea menor a 150 metros y no encuentren a una distancia menor a 160 metros para reflejar de manera más realista el adelantamiento a ciclistas. Además, de que este permitido adelantar o no, se debe incluir en la decisión de adelantar diferentes variables (tiempo de la maniobra de adelantamiento, tiempo de colisión y tiempo de señal), pero estas variables dependen de las características geométricas del tramo y del vehículo que realiza la maniobra en vez del vehículo que se adelanta.

En resumen, se reafirma que el modelo calibrado por Llorca permitirá replicar el adelantamiento a ciclistas. Los siguientes apartados explican cómo se realizarán las diferentes etapas de la calibración del modelo.

5.4.2. Metodología de calibración etapa I

La primera etapa consiste en aplicar los parámetros calculados en la Tesis Doctoral de Llorca (2015), en la que se tomaron datos reales de carreteras convencionales y de maniobras de adelantamientos cercanos a Valencia. Se utilizarán estos parámetros calibrados ya que el modelo de adelantamiento se adapta a las características del tramo de estudio (carretera convencional en la provincia de Valencia) por lo que el comportamiento será muy cercano a la realidad del tramo de estudio. A continuación, se presentarán los diferentes parámetros utilizados separados por su nivel de modelación.



| Nivel de definición | Vehículo | Sección | Experimento |
|------------------------|---|------------------------------------|--|
| Parámetros existentes | V_{max} θ A_{max} Deceleración normal | Longitud Slimit | Reactiontime |
| Parámetros específicos | Safetymargin | MirrorsectionID ASD SDfactor | delayTh mindV maxdV maxRank maxSimul delaySimul RCF PVSE PVSETh remainingtimeTh |

Fig. 83 Parámetros microsimulador (Carlos Llorca, 2015).

5.4.3. Metodología de calibración etapa II

Terminada la primera etapa de calibración se buscará ajustar con el menor error las velocidades y longitudes de los pelotones con los datos obtenidos en campo. Para facilitar la comprensión de este punto se dividirá su desarrollo en la metodología y la creación de la base de datos, adaptación del modelo e ingreso de la demanda.

Esta etapa comienza ajustando las diferentes configuraciones de pelotones (once configuraciones diferentes), esta calibración será un proceso iterativo para lograr ajustar los tiempos de adelantamiento y viaje a partir de las velocidades y longitudes dinámicas de los pelotones.

El primer paso de esta etapa calibración será obtener los datos de partida. Estos datos de partida provienen de las bicicletas instrumentadas y servirán como la primera aproximación para comenzar la calibración.

Tras el procesamiento de la información que se explicará más adelante, se obtendrán los largos dinámico del pelotón (inicial) y velocidad de circulación del pelotón (criterio de ajuste). Con la combinación de estos dos parámetros se buscará replicar los tiempos de viaje de las bicicletas y tiempos de adelantamientos.

Calculados los parámetros de entrada y parámetros de ajuste (velocidad del pelotón, tiempo de viaje y tiempo de adelantamiento), se procederá a ingresar los atributos del pelotón al microsimulador (hasta el momento aún no se ha ingresado ninguna característica al microsimulador). Las diferentes configuraciones serán representadas en el microsimulador como un vehículo único con sus características (velocidades, aceleraciones, dimensiones, etc.).

Creado el vehículo con las características de cada pelotón (Se crearán tantos tipos de vehículos como configuraciones de pelotón estudiadas) se procederá a comprobar los tiempos de viaje generados por estos vehículos por separado y se comparará con los tiempos de viaje obtenidos en campo. Este será el primer proceso iterativo hasta ajustar el tiempo de viaje del pelotón que minimiza el error cuadrático medio y el parámetro estadístico GEH (recibe su nombre por el inventor Geoffrey E. Havers, esta fórmula empírica es utilizada en la modelización del tráfico para



comparar los conjuntos de volúmenes de tráfico modelados y reales, en este caso, los tiempos de viaje y de adelantamientos.

$$GEH = \sqrt{\frac{(V2 - V1)^2}{0.5(V1 + V2)}}$$
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

Fig. 84 Parámetro estadísticos para comparar valores observados y simulados (Imad, Tarek, Nasser, & Eyad, 2009).

Para la calibración de un modelo de transporte un GEH inferior a 5.0 define una adecuada correspondencia entre vehículos observados y simulados, un GEH en el rango 5.0 - 10.0 indica un ajuste moderado, mientras que los valores superiores a 10.0 indican una alta probabilidad de tener problemas en el punto de toma de información o representación del modelo (Imad et al., 2009).

Una vez calibrado el tiempo de viaje del pelotón, se procederá a comprobar si los tiempos de adelantamientos de los vehículos a motor son similares a los tiempos obtenidos en datos. Este proceso se realizará de la misma forma como se obtuvieron en gabinete, es decir, se obtendrá el tiempo cuando el vehículo llega al pelotón y cuando supera a este, replicando el trabajo de gabinete realizado para obtener los tiempos de adelantamiento (el tiempo cuando el vehículo desaparece de la bicicleta al final del pelotón y cuando aparecerá en la primera bicicleta).

Para obtener los tiempos de adelantamientos producido según configuración se han estimados los tamaños muestrales con un nivel de confianza del 95% y un 5% de error muestra para considerar que los resultados obtenidos son representativos según la cantidad total de adelantamientos observados.

$$n = \frac{N \times Z_a^2 \times p \times q}{d^2 \times (N - 1) + Z_a^2 \times p \times q}$$

Fig. 85 Formula estimación del tamaño muestral de una muestra conocida

Este será un proceso iterativo hasta ajustar el tiempo el tiempo de adelantamiento, pero a diferencia del paso anterior, cada vez que se ajuste el largo del pelotón será necesario volver al paso anterior para comprobar que se ajuste además el tiempo de viaje del pelotón. Este proceso finalizará cuando el tiempo de adelantamiento se minimice el error cuadrático medio y se obtengan GEH menores a 5.

Por último, se comprobará si existen diferencias significativas entre los valores obtenidos y los medidos en campo, se aplicará la prueba de Kruskal-Wallis o la prueba ANOVA dependiendo de la normalidad de la muestra. La prueba ANOVA determinará si hay diferencias significativas entre las medias. Si las hay, las Pruebas de Rangos Múltiples le dirán cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La Prueba Kruskal-Wallis es evalúa la hipótesis de que las medianas dentro



de cada uno de los 2 niveles de son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango (rank) promedio para los datos de cada nivel, Si el p-valor es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza. Para obtener estos resultados se utilizará el programa STATGRAPHICS.

Ya calibrada los tiempos de viaje y tiempos de adelantamiento de las diferentes configuraciones se considera que la configuración esta calibrada y es representativa según las observaciones en campo, cabe destacar, que todos estos pasos son procesos iterativos y que deben ser realizado para cada configuración por separado. Y los resultados de este proceso se encuentra en el punto 6.1 de este documento

Para comenzar el proceso de calibración es necesario determinar cuáles serán los parámetros de partida y los parámetros de ajuste. En el siguiente apartado se explicará cómo se ha obtenido los parámetros para las diferentes configuraciones

5.4.3.1. Creación de la base de datos

Para lograr realizar la metodología antes mencionada es necesario la utilización de las observaciones en campo (se observa en la figura 81). Estos datos de partida fueron los obtenidos desde las diferentes bicicletas instrumentadas. A continuación, se describen la obtención de los diferentes parámetros que serán necesarios para la etapa dos de la calibración del modelo.

Como se ha mencionado anteriormente, los pelotones de ciclistas varían su tamaño, forma y velocidad relativa durante todo su trayecto, es por esto, que se han realizado diferentes mediciones, variando la configuración del pelotón. Como se ha mencionado, las diferentes configuraciones son:

| Pelotón | Configuración | Notación | Nº de Ciclistas. |
|--------------|--------------------|-------------|------------------|
| 4 Ciclistas | Individual | 1L | 1 |
| | Dos en Línea | 2L | 2 |
| | Cuatro en línea | 4L | 4 |
| | Dos en paralelo | 2F | 2 |
| | Cuatro en paralelo | 4F | 4 |
| | 2+1 | 2+1 | 3 |
| | 1+2 | 1+2 | 3 |
| 10 ciclistas | Línea única | SF | 10 |
| | Líneas paralelas | PL | 10 |
| | Cola | 4 SF + 6 PL | 10 |
| | Cabeza | 6 PL + 4 SF | 10 |

Tabla 33 Configuraciones de pelotón observadas.

Para esta etapa del proyecto se ha decidido utilizar solo las maniobras reales de circulación de los pelotones, esto quiere decir, que no se modelaran las configuraciones en cola y cabeza ya que estas configuraciones fueron realizadas a modo de estudio. Estas configuraciones lo que buscaron representar como es la evolución del pelotón durante un recorrido y no es una configuración que se utiliza



habitualmente. A continuación, se presenta la obtención de los diferentes parámetros de partida diferenciando por configuración del pelotón:

- **Tiempos de recorrido del pelotón:** Los tiempos de viaje de los pelotones variarán según la configuración asignada. Esta información se obtuvo revisando los diferentes videos realizadas. La metodología aplicada consiste en apuntar el tiempo al ingresar al tramo de estudio y al salir del tramo de estudio, además se ha destacado el sentido de circulación del pelotón. El tiempo de viaje obtenidos, es el tiempo que tardan las diferentes configuraciones en recorrer los 6.95 km del tramo de estudio.

En el caso de configuración individual se realizaron dos observaciones por día para recabar más información y principalmente para optimizar los tiempos de espera de los ciclistas. Por otro lado, para las demás configuraciones se tiene información de estos tiempos en las dos bicicletas instrumentadas. Los tiempos de viaje obtenidos serán el promedio de las diferentes pasadas. A continuación, se presentan los resultados segregados por configuración. El detalle de esta información se encuentra en la tabla 4 del Anejo 1: Toma de datos.

| Pelotón | Configuración | Sentido | Observaciones | Tiempo de viaje (s) |
|---------------------|--------------------|-----------|---------------|---------------------|
| 10 Ciclistas | Línea | Norte-Sur | 2 | 1.383,000 |
| | Paralelo | Sur-Norte | 4 | 1.000,61 |
| 4 Ciclistas | Individual | Sur-Norte | 8 | 807,73 |
| | Dos en paralelo | Norte-Sur | 4 | 1.044,10 |
| | Dos en línea | Norte-Sur | 4 | 1.134,45 |
| | 1+2 | Norte-Sur | 4 | 1.110,18 |
| | 2+1 | Sur-Norte | 4 | 911,83 |
| | Cuatro en paralelo | Sur-Norte | 4 | 932,88 |
| | Cuatro en línea | Norte-Sur | 4 | 1.154,00 |

Tabla 34 Tiempo de viaje de las diferentes configuraciones según sentido.

Velocidad del pelotón: Sin importar la configuración de los pelotones, estos variarán su velocidad a lo largo de todo su recorrido, ya sea por un aumento en las pendientes, cansancio, la meteorología adversa, entre otros. Las bicicletas instrumentadas cuentan con láseres que permiten obtener las velocidades de los vehículos que se comparten un espacio y tiempo determinado, en este caso, cuando se produce el adelantamiento, el láser guarda la información de la velocidad relativa y la velocidad de bicicleta. Cabe mencionar que todos los láseres han sido configurados para detectar las velocidades a una distancia menor de 4 metros para evitar que detecte la velocidad de un vehículo que circula en el sentido contrario de circulación de la bicicleta.

Para obtener la velocidad de circulación de las diferentes configuraciones, se ha calculado a partir del tiempo de viaje y la distancia del tramo de estudio. Se utilizará esta información como dato de partida, pero además se tendrá en cuenta las velocidad promedio obtenidas por el láser, aunque estas son un promedio de velocidades puntuales durante la maniobra de adelantamiento. A continuación, se presenta las velocidad de las diferentes configuraciones



diferenciadas por sentido de circulación, además, en la tabla tres del Anejo 1: toma de datos se muestran los tiempos con los cuales se obtuvieron las velocidades promedio.

| Pelotón | Configuración | Sentido | Observaciones | Promedio Velocidad Bicicleta (km/h) |
|--------------|--------------------|-----------|---------------|-------------------------------------|
| 10 Ciclistas | Línea | Norte-Sur | 4 | 18,09 |
| | Paralelo | Sur-Norte | 8 | 25,01 |
| 4 Ciclistas | individual | Sur-Norte | 8 | 30,98 |
| | Dos en paralelo | Norte-Sur | 4 | 23,97 |
| | Dos en línea | Norte-Sur | 4 | 22,06 |
| | 1+2 | Norte-Sur | 4 | 22,54 |
| | 2+1 | Sur-Norte | 4 | 27,44 |
| | Cuatro en línea | Sur-Norte | 4 | 26,83 |
| | Cuatro en paralelo | Norte-Sur | 4 | 21,69 |

Tabla 35 Velocidades de los ciclistas según la configuración del pelotón

- **Tiempos de adelantamientos:** La base de datos creada con la información de las bicicletas instrumentadas presenta los diferentes tiempos observados durante la maniobra de adelantamiento (detallados en la Fig. 59). Para obtener los tiempos de adelantamientos se ha separado por configuración y se han considerado las maniobras validas más las maniobras donde estaba la información de los tiempos, pero tenían problemas con los láseres, por ejemplo, esto se realizó debido a la falta de observaciones en algunas configuraciones para poder aumentar la muestra.

Los tiempos considerados para obtener los tiempos de adelantamiento serán los observados cuando el vehículo a motor circula paralelo a las bicicletas instrumentadas (a unos segundos de desaparecer de la visión de la cámara trasera y al aparecer en la cámara delantera). Como se observa en la Fig. 86 se generaron las bases de datos por una misma persona para evitar errores en las observación ya que se deben mirar los dos cámaras.



Fig. 86 Obtención de tiempos de inicio y fin de adelantamiento.

Una vez obtenidos todos los tiempos de adelantamientos, se restarán los tiempos obtenidos por la cámara delantera y la cámara trasera para así obtener el tiempo total de adelantamiento. Este tiempo, es el tiempo que los vehículos a motor y pelotones circulan paralelamente. Como ya se ha mencionado este procedimiento se ha realizado para todas las maniobras de adelantamientos. Cabe destacar, que este procedimiento no pudo ser realizado para las configuraciones "Individual" y "Dos en paralelo" ya que estas



configuraciones solo contaban con una bicicleta instrumentada, por lo que, para términos de calibración será considerado como un vehículo con las características del pelotón. A continuación, se presentan los resultados obtenidos por configuración, además, en la tabla 3 del Anejo I: toma de datos se presentan los tiempos de adelantamientos de todas las observaciones.

| Pelotón | Configuración | Medía (s) |
|--------------|---------------|-----------|
| 10 ciclistas | Línea | 3,97 |
| | Paralelo | 2,03 |
| 4 ciclistas | 4 Línea | 2,10 |
| | 4 Paralelo | 1,38 |
| | 1+2 | 1,73 |
| | 2+1 | 1,17 |
| | 2 Línea | 1,98 |
| | Individual | - |
| | 2 paralelo | - |

Tabla 36 Tiempos de adelantamientos por tipo de configuración.

- Longitud dinámica del pelotón:** Para lograr representar en el modelo las diferentes configuraciones ciclistas, se determinó la longitud dinámica de las diferentes configuraciones, según las velocidades relativas al inicio y fin de la maniobra y el tiempo de adelantamiento. Este cálculo considera que los adelantamientos a ciclistas son un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado o desacelerado, al igual que los modelos utilizados por AIMSUN para el adelantamiento vehicular y que a medida que el vehículo a motor en movimiento, el pelotón también lo está; es por esto de a este largo se llama longitud dinámica del pelotón. Las fórmulas utilizadas para estimar las diferentes longitudes de pelotón son las siguientes.

| | |
|--|--|
| $a = \frac{Vr \text{ final} - Vr \text{ inicial}}{T}$ $d = Vr \text{ inicial} \times T + \frac{a \times T^2}{2}$ | <p>Donde:</p> <p>a: Aceleración (m/s²) Vr inicial: Velocidad relativa al inicio del adelantamiento (m/s) Vr final: Velocidad relativa al final del adelantamiento (m/s) T: Tiempo total del adelantamiento (s) d: Longitud del pelotón (m)</p> |
|--|--|

Tabla 37 Fundamentos para estimar la longitud del pelotón.

Las velocidades relativas se obtuvieron de los laser que llevaban las bicicletas instrumentadas y los tiempos de adelantamiento fueron obtenidos a través de la observación de videos de las cámaras delanteras y trasera de las bicicletas instrumentadas. La estimaciones de las diferentes longitudes dinámicas se realizaron para todos los datos disponibles del tramo de estudio. Los largos del pelotón obtenidos son los siguientes, además, en la tabla 3 del Anejo I: toma de datos se presentan los largos dinámicos obtenidos de todas las observaciones.

| Pelotón | Configuración | Medía |
|--------------|---------------|-------|
| 10 ciclistas | Línea | 53,01 |
| | Paralelo | 19,89 |
| 4 ciclistas | 4 Línea | 16,06 |
| | 4 Paralelo | 14,87 |



| Pelotón | Configuración | Medía |
|---------|---------------|-------|
| | 1+2 | 20,42 |
| | 2+1 | 12,85 |
| | 2 Línea | 28,02 |
| | Individual | 1,70 |
| | 2 paralelo | 1,70 |

Tabla 38 Longitud dinámicas de los pelotones.

Para la microsimulación se utilizará un largo y velocidad de circulación fijo para lograr representar de una forma más exacta cada pelotón.

5.4.3.2. Adaptación del microsimulador

La mayoría de los microsimuladores de tráfico más usados se centran en la interacción y comportamiento de los vehículos a motor, siendo posible incluir bicicletas, pero empleando los mismos modelos de comportamientos utilizados para representar el tráfico de vehículos motorizados.

En este punto de la investigación aún no hemos ingresado las características para comenzar a realizar las calibraciones, debido a que es necesario lograr adaptar lo más posible el modelo existente para obtener la interacción entre vehículos a motor y ciclistas observada en campo. Durante el desarrollo de la investigación se han mencionado varias consideraciones que se aplicarán al modelo para representar de una manera más realista el adelantamientos a bicicletas. A continuación, se mencionan estas consideraciones:

- Fue necesario acotar las zonas de prohibido adelantamientos del tramo de estudio para lograr cumplir con el artículo 88, que menciona que *“Está permitido el rebase de conductores de bicicletas, aunque para ello haya que ocupar parte de la calzada en reservada al sentido contrario, después haberse cerciorado de que se puede realizar la maniobra sin peligro”*, ya que el microsimulador no permite realizar ningún adelantamiento cuando existe una línea continua (se ha considerado el prohibido adelantamiento cuando la distancia de visibilidad es menor a 150 m);
- Se han considerado solo las limitaciones de velocidad obligatorias del tramo de estudio para evitar condicionar la circulación de los vehículos debido a que el programa no permite ingresar restricciones de velocidad recomendadas;
- El microsimulador no permite ingresar un grupo de bicicletas que circulen como pelotones (una bicicleta tras otra), por esto, los pelotones de ciclistas se representarán mediante un vehículo único que contiene todas las bicicletas unidas que circularán con la velocidad media del pelotón y sus dimensiones serán obtenidas según los tiempos de adelantamientos de los diferentes pelotones;

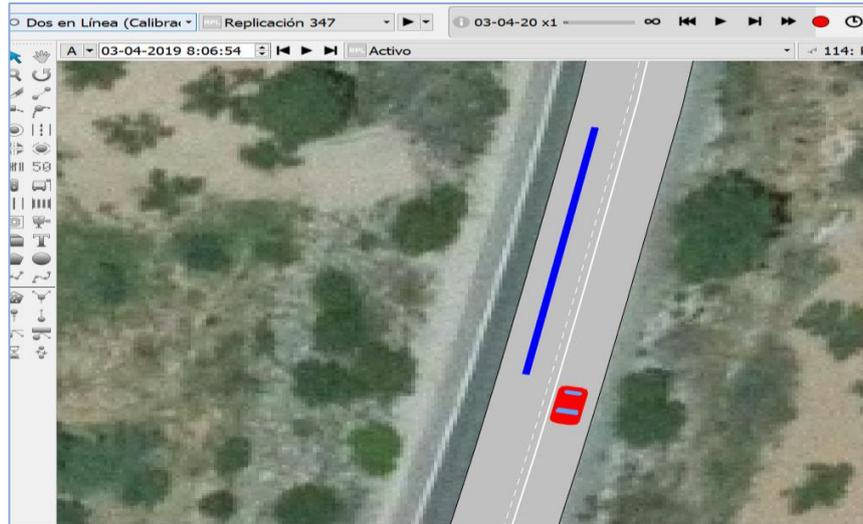


Fig. 87 Representación de un pelotón de 10 ciclistas circulando en línea (azul), vehículo a motor (rojo).

- El microsimulador no permite ingresar el arcén de las carreteras, por lo que los pelotones deberán compartir el carril de circulación. Además, los vehículos a motor deberán ocupar el carril contrario para efectuar la maniobra de adelantamiento, pero esto se justifica con las observaciones realizadas en campo donde cerca del 90% de los adelantamientos realizados a los pelotones de 10 ciclistas invade el carril contrario y el 69% de los adelantamientos realizados a los pelotones de 4 ciclistas invade el carril contrario, obteniendo un como resultado global que el 75% de los adelantamientos realizados invade el carril, dicho de otra manera, 3 de cada 4 vehículos a motor invade el carril contrario durante la maniobra de adelantamiento.

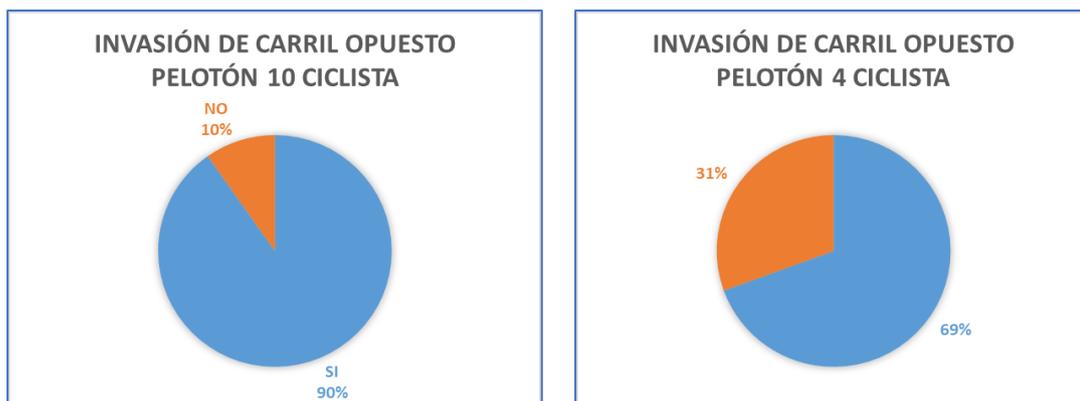


Fig. 88 Porcentaje de adelantamientos que invaden el carril contrario durante la maniobra de adelantamiento.

A pesar de todas las restricciones que ha presentado el programa se ha logrado replicar la carretera y adaptar la circulación de pelotones de ciclistas sin afectar la funcionalidad de los vehículos a motor, esto es principalmente, por la orografía de la carretera, la alta velocidad de circulación, baja presencia de tráfico pesado y la IMD media que presenta el tramo de estudio.



5.4.3.3. Ingreso de la demanda del escenario calibración etapa II

Ya ingresadas en el microsimulador todas las adaptaciones al programa es posible comenzar el proceso de calibración mencionado. Las características para calibrar serán la velocidad de las bicicletas, tiempos de viaje de los pelotones y tiempos de adelantamientos. A continuación, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta un resumen de los parámetros a calibrar.

| Pelotón | Configuración | Velocidad Bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | Longitud pelotón (m) | Tiempo de adelantamiento (s) | Maniobras analizadas |
|--------------|--------------------|----------------------------|---------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|
| 10 Ciclistas | Línea | 18,09 | 1.383,00 | 53,01 | 3,97 | 25 |
| | Paralelo | 25,01 | 1.000,61 | 19,89 | 2,03 | 66 |
| 4 Ciclistas | Individual | 30,98 | 807,73 | 1,70 | - ² | - |
| | Dos en paralelo | 23,97 | 1.044,10 | 1,70 | - | - |
| | Dos en línea | 22,06 | 1.134,45 | 28,02 | 1,98 | 90 |
| | 1+2 | 22,54 | 1.110,18 | 20,42 | 1,73 | 40 |
| | 2+1 | 27,44 | 911,83 | 12,85 | 1,17 | 54 |
| | Cuatro en paralelo | 26,83 | 932,88 | 14,87 | 1,38 | 48 |
| | Cuatro en línea | 21,69 | 1.154,00 | 16,06 | 2,10 | 30 |

Tabla 39 Características operacionales de los pelotones a calibrar.

Otro punto importante en la etapa de calibración es la demanda vehicular con la que se va a calibrar el modelo, en este caso, se contaba con una observación puntual realizada el mismo día de las observaciones realizadas a los pelotones de 4 ciclistas (jueves 3 de mayo), por lo tanto, para estas configuraciones se ingresó la demanda obtenida para ese día. En el caso de las configuraciones de 10 ciclistas, esta observación se realizó un sábado, por lo que, utilizó la demanda observada el sábado del mes de mayo para tener una relación con las otras configuraciones, cabe destacar que las observaciones obtenidas para los sábados son muy similares entre sí, por lo que decidir este día no tendría influencia en los resultados de la calibración. Hay que mencionar, que solo se ha considerado sólo los vehículos ligeros en el caso del día laboral debido a que los tiempos de adelantamientos obtenidos de las bases de datos no consideraron este tipo de vehículo por el poco tiempo de adelantamiento.

| Sentido | Sábado | Laboral |
|---------------|--------|---------|
| Entrada CV-50 | 124 | 128 |
| Salida CV-50 | 112 | 148 |

Tabla 40 Demanda de vehículos a motor según día de modelación.

El primer paso para la calibración del modelo de adelantamiento a ciclista será la creación de diferentes vehículos con las longitudes dinámicas y velocidades obtenidas de la base de datos y resumidas en la tabla 39.

² No se cuenta con esta información debido a que las configuraciones individual y dos en paralelo contaban con solo un láser que interactuaba con los vehículos a motor, por esto, solo se calibrará su velocidad y tiempo de viaje.

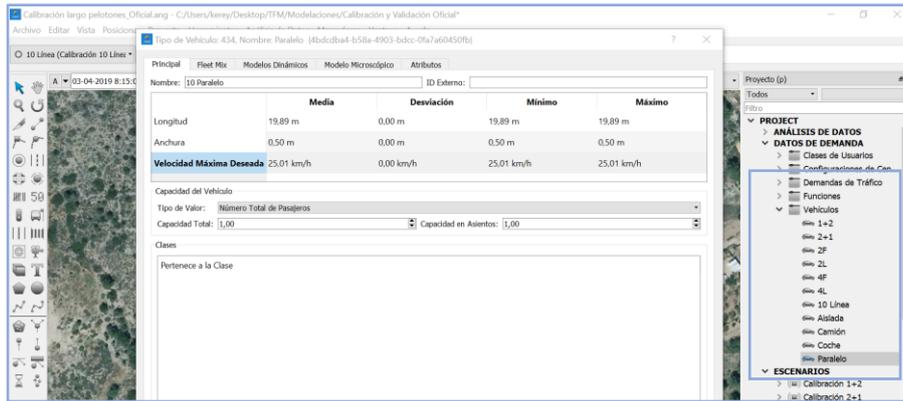


Fig. 89 Creación de las configuraciones ciclistas con datos de partida.

Una vez creado los diferentes vehículo que representarán a cada configuración por separado, se procederá a ajustar la velocidad primeramente para lograr replicar el tiempo de viaje observado en campo. El programa permite obtener la media de todas las replicación realizadas. En este caso, se utilizará la información solo de la sección y sentido a modelar. La información obtenidas en todas las replicaciones será respaldada en un archivo Excel donde se estimarán los diferentes parámetros estadísticos.

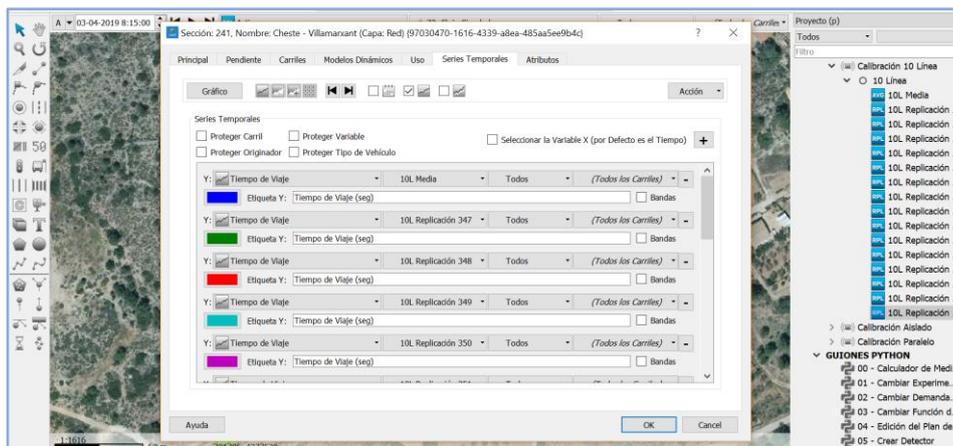


Fig. 90 Resultados obtenidos durante la calibración de los pelotones ciclistas.

Una vez comprobado que el tiempo de viaje de la configuración presenta un GEH menor a cinco y un error cuadrático medio menor al 5% se procederá a ajustar el tiempo de adelantamiento (diferencia del tiempo al inicio y fin de la circulación en paralelo de los vehículos). Actualmente el microsimulador Aimsun no permite obtener esta información de forma automática, por lo que es necesario detener la microsimulación cuando el vehículo comienza y termina la maniobra para obtener la velocidad en ese instante.

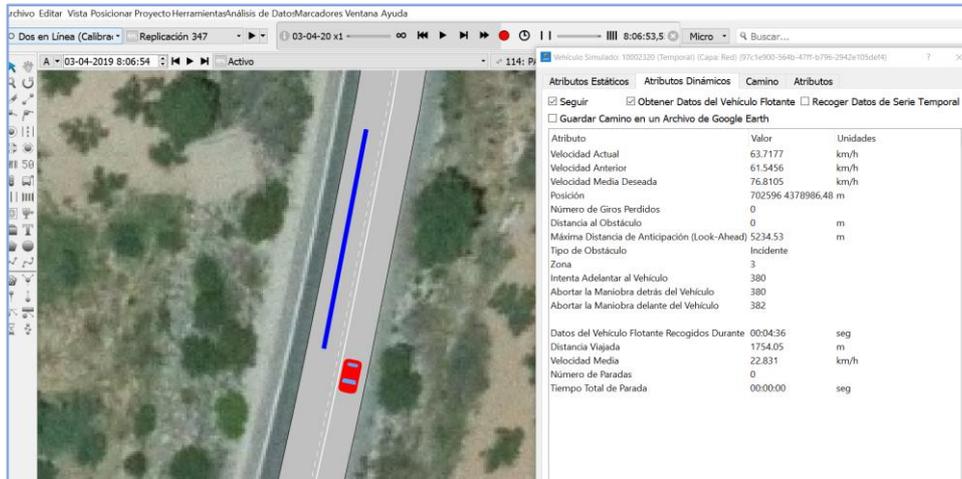


Fig. 91 Obtención de las velocidades de adelantamiento mediante microsimulación

Para lograr estimar el tiempo de adelantamiento del vehículo a motor al pelotón se aplicará la ecuación de movimiento rectilíneo uniformemente acelerado o desacelerado mencionado en la Tabla 37. Esta ecuación, requiere las velocidades durante la maniobra de adelantamiento del vehículos a motor, velocidad del pelotón (velocidad calibrada en el paso anterior) y el largo de este (parámetro ingresado en las características del pelotón). Se considerará el tiempo de adelantamiento medio obtenido de todas las observaciones, la cantidad de adelantamientos observados será la necesaria para cubrir un tamaño muestral de observaciones en campo con un nivel de confianza del 95%. La cantidad de observaciones realizadas para las diferentes configuraciones tendrá relación directa con las observaciones en campo.

Obtenido del tiempo de adelantamiento medio se estimará el GEH y el error cuadrático medio con respecto de los parámetros a calibrar. Si el tiempo de adelantamiento no se ajusta, se procederá a modificar el largo del pelotón. El largo que se ingresará será el obtenido al aplicar la ecuación de movimiento rectilíneo uniformemente acelerado considerando las velocidades iniciales y finales medias del vehículos a motor obtenidas en el escenario microsimulado.

El nuevo largo estimado será ingresado en el microsimulador y se procederá a realizar el proceso de calibración desde el inicio de la etapa II, debido a que el cambio del largo del pelotón pueda influir en el tiempo de viaje de este. Verificada la calibración del tiempo de viaje, se procederá a revisar las maniobras de adelantamientos para lograr obtener este valor con la metodología explicada. Este procedimiento se realizará tantas veces sea necesario para todas las configuraciones por separado

En el apartado 6.1 "Calibración del modelo de microsimulador" se presentarán los resultados obtenidos para cada configuración por separado, además, se mencionará los parámetros estadísticos resultantes de cada calibración y se verificará si existe diferencias significativas entre los parámetros calibrados y los obtenidos.



5.5. Validación del modelo de microsimulación

Finalizada la calibración, la validación responde a la cuestión de si la simulación ofrece una representación precisa o no y permite proporcionar información acerca de la capacidad del modelo de representar una variedad de situaciones. La validación del modelo compara el modelo calibrado con otro conjunto de datos distintos al empleado en la calibración. Se pueden mencionar tres formas de validar un modelo.

- Utilización de los mismo indicadores, pero en otro periodo de modelación;
- Utilización de los mismo indicadores en una red diferentes;
- Utilización de otros indicadores en la misma red y periodo.

Debido a que el alcance de esta investigación es la carretera CV-50 del PK-76+550 al PK 83+500, se realizará el proceso de validación manteniendo la red y los indicadores obtenidos, pero se modificará la demanda utilizada.

Para la etapa de validación se utilizarán nuevamente dos demandas, diferenciando entre días laborales y de fin de semana, con la diferencia que ahora las configuraciones de 4 ciclistas serán validadas para los fines de semana y de forma contraria las configuraciones de 10 ciclistas serán validadas para los días laborales. De esta forma se podrá garantizar que los parámetros obtenidos para las diferentes configuraciones son válidos para el tramo de estudio sin importar el día de circulación. Las demandas utilizadas para los diferentes pelotones se encuentran en la Tabla 42 de este documento.

El modelo de microsimulación será el mismo que se ha utilizado para las calibraciones, con la diferencia que ahora no se modificarán las características de los pelotones (valores obtenidos en la calibración), sino que se modificará la demanda de vehículos a motor y se verificará el impacto que tiene los tiempos de viaje y de adelantamientos de los diferentes pelotones obtenidos en campo.

Para la validación se comprobarán la misma cantidad de maniobras de adelantamientos observadas en el proceso de calibración y se realizarán 15 repeticiones por iteración. Se utilizarán los mismo parámetros de comprobación utilizados en la calibración (GEH y error cuadrático medio), además se ingresarán los valores obtenidos en todas las repeticiones finales en el programa STATGRAPHICS para conocer si existen diferencias significativas entre los resultados modelos y observados en campo. En el Anejo III: Validación del modelo se presentarán las tablas con los resultados obtenidos en STATGRAPHICS para así solo mencionar en el informe si es que son significativas las muestras o no.

Los resultados de la validación del modelo se presentarán en el apartado 6.2 "Validación del modelo de microsimulación".



5.6. Escenarios modelados

El modelo calibrado permite replicar la presencia de bicicletas en carreteras convencionales. En este apartado se explicarán los diferentes escenarios que nos permitirán estudiar la interacción entre los vehículos motorizados y ciclistas.

Este apartado se explicará cómo se creará el escenario base, criterios generales utilizados para modelación (replicaciones, horas de simulación, calentamiento), los resultados que se utilizarán para los diferentes análisis y los escenarios para comprobar si influye la presencia de bicicletas en la funcionalidad de las carreteras.

Una vez comprobada la influencia de las bicicletas se procederá a seleccionar un tipo de solución, la cual será evaluada en diferentes escenarios. Definida la propuesta se comparará con el escenario sin soluciones para lograr conocer sus resultados. El desarrollo de los análisis y estudio de la propuesta será llevado a cabo en los siguientes apartados. A continuación, se explicarán las diferentes estrategias a modelar y como serán llevadas a cabo.

5.6.1. Escenario Base

En los siguientes puntos se presentará como se creará el escenario base de este modelo. Se diferenciará según la demanda a vehículos y su ingreso en el modelo.

5.6.1.1. *Demanda de vehículos a motor y bicicletas del escenario base*

Para comenzar con los escenarios a modelar es necesario primeramente de una demanda de vehículos a motor y de bicicletas. Se consideraron la demanda obtenida en campo para el tramo de estudio (ver Tabla 21). Se seleccionó modelar el día que presenta mayor demanda de vehículos y de bicicletas (sábado 27 de enero). Considerando como criterio que, si se observan problemas de funcionalidad durante el día más cargado, se procederá a modelar los otros días observados en campo, para así lograr estimar desde que relación entre tráfico ciclista y motor se comienza a afectar la funcionalidad. En caso de que el escenario con mayor cantidad de vehículos observados no cause una influencia en la funcionalidad se procederá a elevar la demanda para lograr analizar la interacción entre esos dos vehículos.

Se ingresará al modelo la demanda correspondiente a 4 veces el cuarto más cargado del sábado 27 de enero del 2017 (4 x HP), además solo se analizará el sentido más cargado debido a que la estimación del nivel de servicio es direccional, es decir, se considera cada sentido de circulación por separado, siguiendo las recomendaciones de Luttinen et al. (2003) y se realiza en segmentos con características uniformes.

En el caso de la demanda ciclista solo será ingresado en el sentido analizado ya que lo que se busca es conocer como estos influyen en la circulación de los vehículos a motor, en otras palabras, solo se considerarán vehículos a motor en el sentido opuesto y en el sentido analizado vehículos a motor y bicicletas. A continuación, se presentan las demandas de vehículos utilizadas en el escenario base.



| Mes | Día | Hora de inicio | Hora de fin | Flujo ciclista | | Entrada vehículos | | Salida vehículos | |
|-------|--------|----------------|-------------|----------------|--------|-------------------|---------|------------------|---------|
| | | | | Ingreso | Salida | Ligeros | Pesados | Ligeros | Pesados |
| Enero | Sábado | 9:26:52 | 10:26:52 | 3248 | 92 | 200 | 4 | 112 | 0 |

Tabla 41 Demanda del escenario base de simulación.

Se ha seleccionado realizar todas las modelaciones en sentido de “Entrada de vehículos” que corresponde a los vehículos que ingresan al tramo de estudio (los vehículos que circulan desde Cheste a Villamarxant) ya que presenta 248 ciclistas y 204 vehículos a motor. La distribución de los ciclistas seguirá las configuraciones observadas en campo.

| Configuración | Cheste - Villamarxant | Villamarxant - Cheste |
|---------------|-----------------------|-----------------------|
| 10 Línea | 8 | 0 |
| 10 Paralelo | 12 | 4 |
| Individual | 4 | 12 |
| 2 Línea | 4 | 4 |
| 2 Paralelo | 4 | 0 |
| 1+2 | 0 | 4 |
| 2+1 | 4 | 0 |
| 4 Línea | 0 | 0 |
| 4 Paralelo | 4 | 4 |
| Total | 248 | 92 |

Tabla 42 configuraciones de los ciclistas a modelar en el escenario base.

Podemos observar una gran diferencia en la presencia ciclistas por sentido, reafirmando el sentido de simulación seleccionado.

5.6.1.2. Ingreso de demanda.

El primer paso es el ingreso de la demanda de vehículos a motor. Para esto se crearán dos centroides para la asignación de la demanda. Se han diferenciado las demandas por tipo de vehículos (ligero y pesado).

La demanda se ingresa según par origen – destino, es este caso son viajes desde o hacia Cheste o Villamarxant. Además, se debe ingresar la hora de inicio y duración de la demanda. A continuación, en la Fig. 92 se presentan las matrices origen-destino generadas para los vehículos a motor.

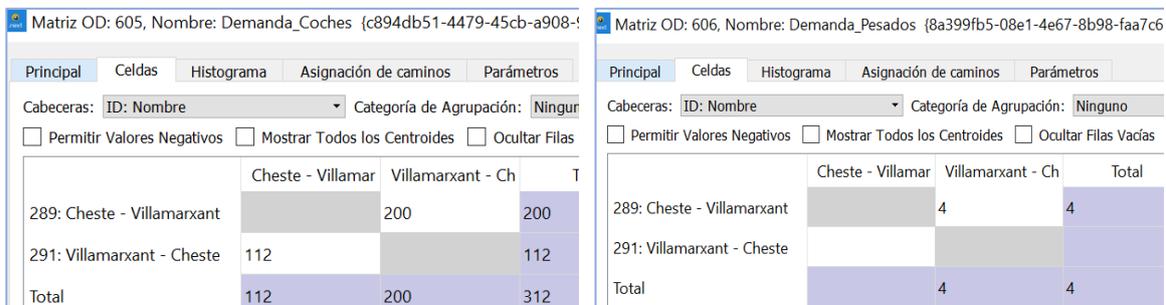


Fig. 92 Demanda vehicular ingresada en AIMSUN.

³ Valores obtenidos al realizar la similitud de las observaciones de estudio y las observadas en campo



En el caso de los pelotones ciclista fue ingresado de la misma forma de los vehículos a motor, pero este ingreso generó conflictos en la modelación ya que el programa ingresaba la demanda de bicicletas de forma aleatoria y se producían colas desde los inicio de la red solo de bicicletas, es por esto, que se optó por ingresar la demanda de ciclistas mediante la opción de transporte público.

Esto permitió ingresar los pelotones con la misma frecuencia de entrada que se había observado en campo y además permite seleccionar su recorrido (este opción luego servirá para re-rotar a los ciclistas por las propuesta creada).

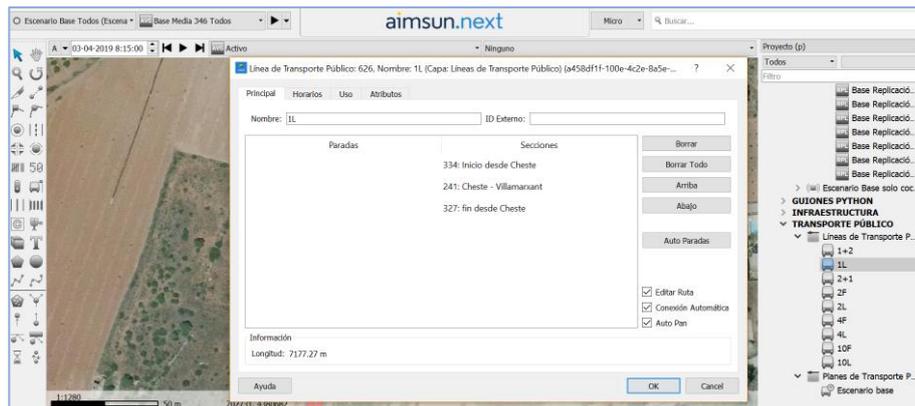


Fig. 93 Ingreso de pelotones ciclistas en el escenario base

Las frecuencias de paso son aproximadamente cada 30 segundos y se debe considerar que la bicicleta individual se ingresará primero para que no se encuentre con ninguna otra bicicleta para evitar que se agrupen los diferentes pelotones.

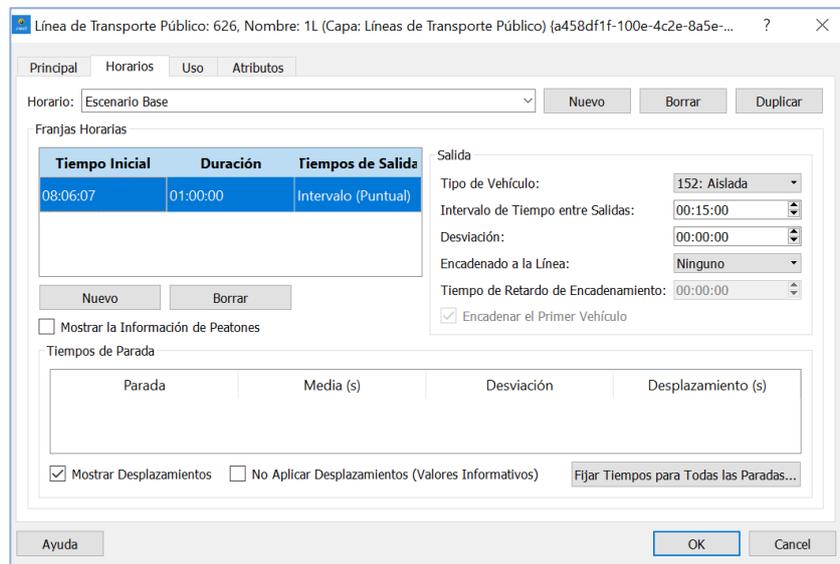


Fig. 94 Frecuencia de paso de ciclistas individuales

Podemos observar de la Fig. 94 la creación de las diferentes líneas de transporte público es posible ingresar el tipo de vehículos, de este modo, es posible generar tantas líneas de transporte público como configuraciones estudiadas. Además, podemos ingresar el tiempo inicial de paso, la duración de cada línea de transporte público y su frecuencia, en este caso será de 15 minutos ya que se observaron 4



ciclistas individuales durante una hora, por ejemplo. Una vez creadas todas las líneas de transporte público, se debe crear en el programa un plan de transporte público, esto es la similitud de una matriz de viajes, con la diferencias que el transporte público ingresa de forma no aleatoria.

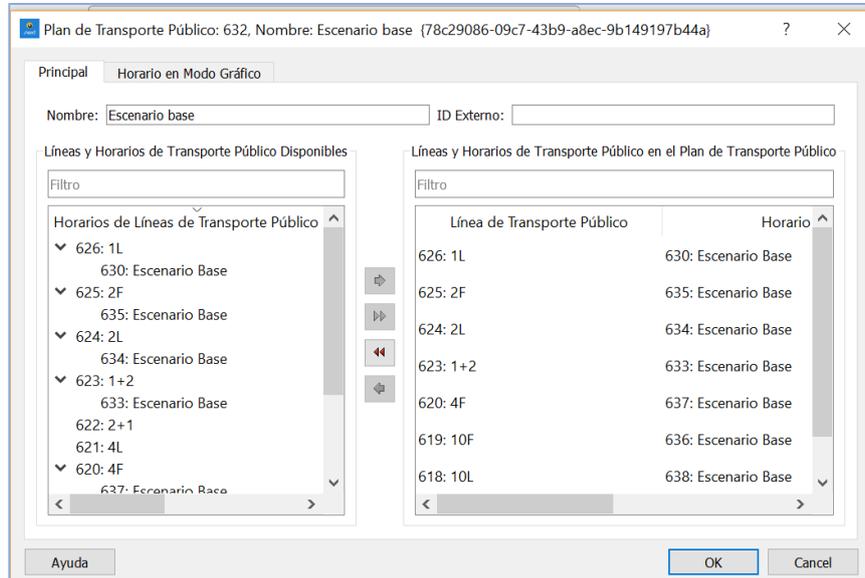


Fig. 95 Demanda de ciclistas ingresada en AIMSUN

Estas demandas se activarán en los escenarios dinámicos de modelación permitiendo estudiar la interacción entre la demanda de tráfico a motor y bicicletas.

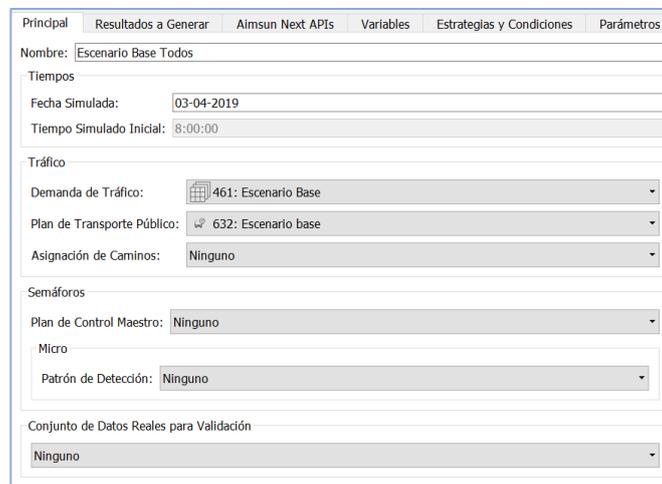


Fig. 96 Escenario base creado con las demandas ingresadas

5.6.1.3. Variaciones de la demanda

En caso de que el escenario base propuesto no genere una influencia significativa en la funcionalidad del tramo se considerará elevar la demanda de vehículos a motor en el sentido de análisis, estas variaciones de la demanda permitirán estudiar como la presencia de bicicletas influye en la funcionalidad del tramo de estudio.



Se ha considerado mantener la demanda de bicicletas debido a que este valor es el más alto de todos los días observado y no se cuenta más información, además la demanda de bicicletas presenta menos variaciones horarias que la de los vehículos a motor. Por último, no ha se aumentado el tráfico opuesto ya que se analizará un sentido de circulación y el aumento de estos solo provocará apresurar la saturación de la carretera. Las diferentes variaciones de la demanda se presentan a continuación

| Escenario | Factor demanda | Tráfico normal | | Pelotones |
|-----------------------|----------------|----------------|--------|-----------|
| | | Ligero | Pesado | |
| Escenario Base | 100% | 200 | 4 | 248 |
| Escenario Base x 150% | 150% | 300 | 6 | 248 |
| Escenario Base x 200% | 200% | 400 | 8 | 248 |
| Escenario Base x 250% | 250% | 500 | 10 | 248 |
| Escenario Base x 300% | 300% | 600 | 12 | 248 |
| Escenario Base x 350% | 350% | 700 | 14 | 248 |
| Escenario Base x 400% | 400% | 800 | 16 | 248 |
| Escenario Base x 450% | 450% | 900 | 18 | 248 |
| Escenario Base x 500% | 500% | 1000 | 20 | 248 |
| Escenario Base x 550% | 550% | 1100 | 22 | 248 |
| Escenario Base x 600% | 600% | 1200 | 24 | 248 |
| Escenario Base x 650% | 650% | 1300 | 26 | 248 |
| Escenario Base x 700% | 700% | 1400 | 28 | 248 |
| Escenario Base x 750% | 750% | 1500 | 30 | 248 |
| Escenario Base x 800% | 800% | 1600 | 32 | 248 |

Tabla 43 Variaciones de la demanda vehicular.

5.6.2. Escenarios Base sin bicicletas

Para lograr evaluar la real influencia en la funcionalidad producto de la presencia de bicicletas en el tramo de estudio, se procederá a realizar los mismo escenarios considerados con presencia de ciclistas. De este modo, será posible conocer la necesidad de una mejora en el tramo de estudio.

De los escenarios con y sin presencia de bicicletas se obtendrán los mismo parámetros para así facilitar su análisis. Para la creación de este escenario en el microsimulador se desactivará el plan de transporte público para evitar el ingreso de ciclistas en la red.

5.6.3. Consideraciones generales de los escenarios

Una vez definida la demanda a modelar es necesario explicar algunas consideraciones generales utilizadas en el modelo que permitirán unos resultados más confiables:

- **Número de iteraciones:** Se realizan 15 replicaciones para cada simulación. En cada replicación varia aleatoriamente el número de vehículos introducidos, siempre en un número cercano al definido. En un modelo de microsimulación, la mayoría de las variables de entrada son valores aleatorios que están dentro de una distribución predefinida en el programa. 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. En la Tesis Doctoral de Llorca (2015) se comprobó que con 15 replicaciones de cada caso es suficiente para tener en cuenta la variabilidad de los datos.

- **Período de calentamientos:** Para calcular correctamente las simulaciones en Aimsun se debe tener en cuenta el período de calentamiento. Su uso asegura una hora de calentamiento en el modelo, es decir, que al empezar las simulaciones ya llevan circulando vehículos en el modelo durante una hora. El calentamiento utilizado considerará solo la demanda de vehículos a motor, para evitar las colas producidas por los ciclistas antes de tiempo y lograr evaluar su real impacto.
- **Hora de simulación:** Se ingresará la demanda de vehículos durante una hora, pero se considerarán dos horas de simulación, esto es, debido a la extensión de la red, las velocidades de circulación de los pelotones y que se considerarán diferentes demandas de vehículos provoca que no todos los vehículos ingresados terminen el recorrido en una hora, generando resultado incorrectos (debido a que los resultados se generan según los vehículos que salen de la red). Por lo tanto, para obtener un resultado que considere todos los vehículos es que se desechará para el análisis además de la hora de calentamiento los primeros 15 minutos y desde ahí se contabilizarán una hora de resultados. Además, se ha observado que luego de la hora 15 de simulación (sin calentamiento) ya los vehículos por salir no son significativos.

5.6.4. Variables a analizar

Para analizar las diferencias entre escenarios, se considerarán dos fuentes de información de resultados:

5.6.4.1. Series temporales

Se utilizarán las series temporales de la sección total modelada que nos entrega los resultados medios para las diferentes secciones de la red. Esta información se entrega una vez finalizada la simulación segregada cada 15 minutos. Se obtendrán de cada simulación los siguientes parámetros:

- Número de adelantamientos realizados por cada vehículo;
- Emisiones de CO² (g/km);
- Tiempo de viaje (s);
- Velocidad media de circulación (veh/h);
- Cola máxima (veh);
- Intensidad (veh/h);

La estimación de las emisiones de CO² se utilizará el modelo de emisión de contaminantes de Panís et al. (2016) que el programa incluye por defecto. Para la activación de este modelo se debe seleccionar para los diferentes tipos de vehículos la emisión que generará (valores ingresados por defecto) (según si es vehículo ligero



o pesado), en el caso, de los pelotones no se seleccionará ninguno tipo de vehículos ya que los beneficios de la circulación de ciclista es la no emisión de CO².

5.6.4.2. Detectores

El ingreso de detectores en el microsimulador permite conocer el estado de la red en un punto específico. En total se ingresarán 5 detectores en toda la red (ver Fig. 97) que nos permitirán evaluar la funcionalidad de la red en diferentes puntos. Se ubicaron en puntos donde había un cambio de pendiente, después de restricciones de adelantamiento o cambios de geometría.

Para obtener la información de estos detectores se utilizará una macro que nos entrega el tiempo de paso de cada vehículo, el tipo de vehículos, la velocidad de paso y el tiempo de paso. Con estos parámetros es posible obtener información que no entregan las series temporales. Se debe considerar que la macro entrega todos los vehículos por lo tanto se deben eliminar los vehículos que están en el periodo de calentamiento y fuera de la hora de análisis, además se debe ordenar la información de los detectores por replicación, ubicación y tiempo de paso.

Una vez ordenada la base de datos, se procederá a estimar el intervalo de paso de cada vehículos, con este intervalo se puede conocer si el vehículo se encuentra en cola. Según el HCM (2016) un vehículo se considera en cola, si el intervalo con el vehículo que le sigue es menor a 3 segundos. Por lo tanto, todos los vehículos que tengan un intervalo menor a 3 segundos será considerado como vehículo en cola.

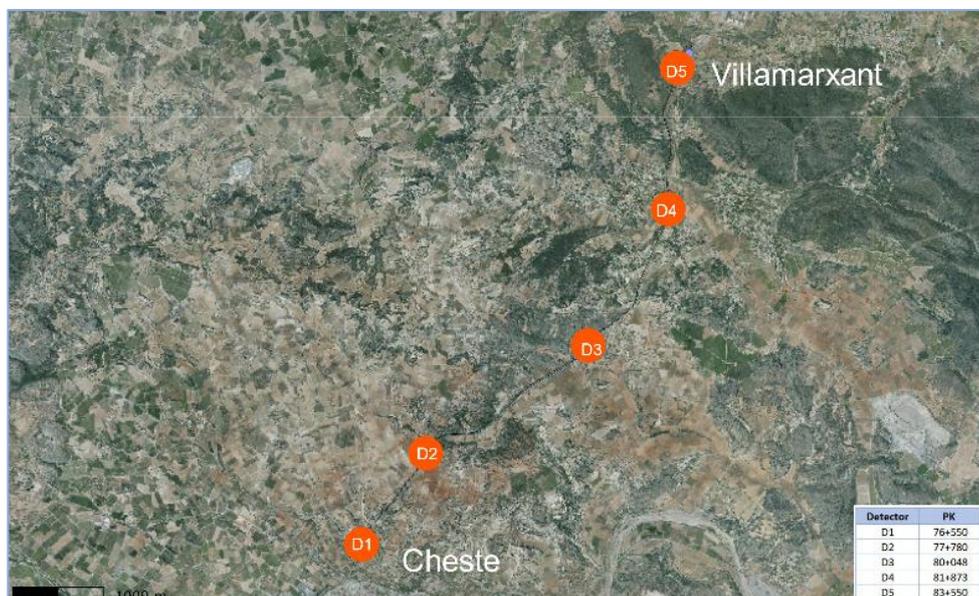


Fig. 97 Ubicación de detectores en el tramo de estudio.

Una vez estimado si el vehículos se encuentra en cola se generarán diferentes tablas dinámicas para estimar el porcentaje de vehículos en cola respecto el total, velocidades medias puntuales y las intensidades.



6. Análisis de resultados

En los siguientes apartados se analizarán los resultados obtenidos para calibración y validación del modelo y para los diferentes escenarios modelados.

6.1. Calibración del modelo de microsimulación

Como se ha mencionado en el apartado 5.4 “*Calibración del modelo de microsimulación*”, el proceso de calibración será realizado en etapas, comenzando con la calibración de los parámetros globales, locales y de los vehículos a motor, separándolos según su nivel de detalle (macroscópico y microscópico) para luego continuar con la etapa II que consta de la calibración de las características operacionales de los pelotones. A continuación, se presentan la calibración del modelo de microsimulación del tramo de estudio.

6.1.1. Calibración etapa I

Los resultados de la etapa I fueron separados en nivel microscópico y macroscópico se presentan a continuación:

6.1.1.1. Nivel microscópico

En el nivel microscópico se ingresan los parámetros que simulan el movimiento del vehículo de forma individual basado en diferentes modelos (modelo de adelantamiento, cambio de carro, vehículo siguiente, etc.). En este nivel se utilizarán los parámetros calibrados por Llorca que tienen relación con la maniobra de adelantamiento. Para ingresar estos valores se debe diferenciar si son parámetros relacionados con los atributos del vehículo (ligero o pesado) o son parámetros globales (experimento) que se relacionan con los modelos de comportamiento vehicular a través de toda la red. Llorca consideró los siguientes parámetros a nivel microscópico:

- **Máxima aceleración de cada vehículo:** Llorca no consideró que fuera necesario modificarlo (valor por defecto), pues su efecto no se limita al modelo de adelantamiento, sino al funcionamiento general del modelo. Este parámetro considera un valor medio, mínimo, máximo y una desviación para diferenciar los vehículos.

| Tipo de vehículo | Media (m/s ²) | Desviación (m/s ²) | Mínimo (m/s ²) | Máximo (m/s ²) |
|------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Ligero | 4 | 0,2 | 3,6 | 4,4 |
| Pesado | 1 | 0,5 | 0,6 | 1,8 |

Tabla 44 Valores por defecto de la aceleración máxima.

- **Velocidad máxima deseada a cada vehículo:** Esta velocidad se define como la velocidad media de los vehículos que circulan sin restricciones



debido a la interferencia de otros vehículos, únicamente condicionada por la geometría, meteorología y restricción de acceso. Para este parámetro se ha calibrado en el estudio de Llorca considerando una velocidad máxima de 100 km/h.

| Tipo de vehículo | Media (km/h) | Desviación (km/h) | Mínimo (km/h) | Máximo (km/h) |
|--------------------------------------|--------------|-------------------|---------------|---------------|
| Ligero | 100 | 9 | 70 | 150 |
| Pesado | 83 | 4 | 50 | 95 |
| Máxima permitida en el tramo estudio | | | | 100 |

Tabla 45 Valores por defecto de la velocidad máxima (Carlos Llorca, 2015).

- **Factor de aceptación de velocidad por tipo vehículo:** Este factor se considera para la estimación de la velocidad deseada de un vehículo para circular a flujo libre. Esta velocidad deseada es la mínima entre la velocidad máxima deseada y la multiplicación entre este factor y la velocidad máxima permitida. Este parámetros es por tipo de vehículo y Llorca lo ha calibrado.

| Tipo de vehículo | Media (m/s ²) | Desviación (m/s ²) | Mínimo (m/s ²) | Máximo (m/s ²) |
|------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Ligero | 1,05 | 0,1 | 0,85 | 1,25 |
| Pesado | 1,00 | 0,05 | 0,95 | 1,05 |

Tabla 46 Factor de aceptación de la velocidad por tipo de vehículo (Carlos Llorca, 2015).

- **Factor de reducción del modelo de seguimiento RCF:** Según explica Llorca (2015), detectó que un aumento en dicho valor suponía un importante aumento en el tiempo de la maniobra de adelantamiento. El valor que minimizaba las diferencias entre el tiempo medio de adelantamiento observado y simulado fue el de 0,65 (Carlos Llorca, 2015). Este parámetro se encuentra dentro del modelo de adelantamiento como un parámetro global;
- **Factor de ampliación de la velocidad durante el adelantamiento PSVE y Umbral para la ampliación de la velocidad durante el adelantamiento PVSETh:** Llorca (2015) observó que ambos factores no tenían influencia significativa en los tiempos de adelantamiento. Por lo que, el primero de ellos tiene un valor de 1,1, ya que, solo el 5% de los conductores finalizaba la maniobra con una velocidad superior al 10% de la velocidad máxima permitida. El segundo se ha dejado el valor por defecto del programa (15 km/h);
- **Margen de seguridad para el adelantamiento Safetymargin:** Estos valores se determinaron según la comparación en la aceptación de huecos, en este caso se utilizarán los parámetros calibrados por Lucia Monterosso en el 2015, debido a que con estos parámetros se logra una mayor cantidad de adelantamientos. Partiendo de los resultados del análisis del estudio experimental.

| Media (s) | Desviación (s) | Mínimo (s) | Máximo (s) |
|-----------|----------------|------------|------------|
| 3 | 0,2 | 1 | 5 |

Tabla 47 Margen de seguridad para el adelantamiento (Monterosso, 2015).



Además, se tomó SDfactor como 1.75, considerando así a los conductores que adelantan sin presencia de vehículos opuestos (Carlos Llorca, 2015).

Los diferentes parámetros mencionados son ingresados en diferentes secciones del microsimulador (atributos del vehículo y parámetros globales o experimento). En el caso de los atributos del tipo de vehículo son ingresados en la pantalla principal o dentro del modelos dinámicos.

La imagen muestra dos ventanas de configuración del software. La ventana superior, titulada 'Tipo de Vehículo: 154, Nombre: Coche', muestra los atributos del vehículo en una tabla con columnas para Media, Desviación, Mínimo y Máximo. La ventana inferior, titulada 'Parámetros por Defecto del Experimento', muestra los parámetros de configuración en una tabla similar.

| | Media | Desviación | Mínimo | Máximo |
|--------------------------|-------------|------------|------------|-------------|
| Longitud | 4,00 m | 0,50 m | 3,50 m | 4,50 m |
| Anchura | 2,00 m | 0,00 m | 2,00 m | 2,00 m |
| Velocidad Máxima Deseada | 100,00 km/h | 9,00 km/h | 70,00 km/h | 150,00 km/h |

| | Media | Desviación | Mínimo | Máximo |
|-------------------------------|------------|------------|-----------|------------|
| Aceptación de Velocidad | 1,05 | 0,10 | 0,85 | 1,25 |
| Espacio Libre | 1,00 m | 0,30 m | 0,50 m | 1,50 m |
| Tiempo Máximo de Ceda el Paso | 10,00 segs | 2,50 segs | 5,00 segs | 15,00 segs |
| Aceptación de Guiado | 100,00 % | 0,00 % | 100,00 % | 100,00 % |
| Valor del Tiempo | 0,00 \$/h | 0,00 \$/h | 0,00 \$/h | 0,00 \$/h |

Fig. 98 Parámetros considerados en el microsimulador para los vehículos ligeros.

6.1.1.2. Nivel macroscópico

En el nivel macroscópico se analizan las relaciones deterministas de flujo, velocidad y densidad del tráfico. Las variables que se ingresan tienen directa relación con la maniobra de adelantamiento y son ingresadas como parámetros globales en el microsimulador (sección experimento).

La calibración a nivel macroscópico se ha basado en los análisis llevados a cabo por Llorca, C., al igual que en la fase de calibración a nivel microscópico. En el análisis de sus resultados se usó un intervalo de agregación de 15 min, conforme a lo establecido en HCM (2016) (Carlos Llorca, 2015). Los parámetros del modelo de adelantamiento calibrados por Llorca son los siguientes:

- **Posición máxima:** En España no está permitido adelantar a un vehículo que ya es siendo adelantado, por lo que este parámetro tendrá un valor igual a 1;
- **Umbral del tiempo de viaje restante:** Debido a que el experimento se lleva cabo en un tramo CV-50, este parámetro tendrá un valor de cero;
- **Número de adelantamientos simultáneos permitidos:** En España no se contempla la posibilidad de adelantamientos entre vehículos a motor simultáneos, por lo que este parámetro Llorca lo estableció igual a 1 pero como este estudio se basa en adelantamientos a pelotones ciclistas y estos si realizan adelantamientos simultáneos según las observaciones desde las bicicletas instrumentada es que este parámetro se estableció con un valor igual a 10 ya que este número fue la mayor cantidad de adelantamiento realizados a los pelotones;
- **Demora entre adelantamientos simultáneos:** Este parámetro no fue considerado por Llorca ya que no se permitía realizar adelantamientos



simultáneos, pero en este caso se considerará un valor igual a 3 segundos que es el tiempo promedio entre maniobras de adelantamientos simultáneas observadas en las observaciones de campo.

Las siguientes variables tienen relación directa con el deseo de adelantar, este siempre se compara al restar la velocidad real y la velocidad deseada, los parámetros son los siguientes:

- **Umbral de la diferencia de la velocidad mínima:** Si la diferencia entre la velocidad real y la velocidad deseada es inferior a este umbral, el deseo de adelantar es negativo. Este parámetro fue calibrado por Llorca considerando que el valor indicado era de 10 km/h;
 - **Umbral de la diferencia de la velocidad máxima:** Si la diferencia entre la velocidad real y la velocidad deseada es superior a este umbral el deseo de adelantar es positivo. Este parámetro fue calibrado por Llorca considerando que el valor indicado era de 35 km/h;
- Umbral de tiempo de demora:** Para diferencias de velocidad entre los dos umbrales anterior, el deseo de adelantar dependerá del tiempo acumulado en cola (umbral de tiempo de demora). Este parámetro fue calibrado por Llorca considerando que el valor indicado era de 240 s.

Fig. 99 Parámetros utilizados para aplicar el modelo de adelantamiento desarrollado por Llorca.

Todos estos parámetros fueron ingresados al microsimulador para lograr representar a nivel microscópico los movimientos de forma individual de los vehículos y a nivel macroscópico para reflejar el comportamiento global de los vehículos.

6.1.2. Calibración etapa II

En este apartado se presentan los resultados de la etapa II de la calibración del modelo. Los resultados se agruparán según configuración y tipo de ajuste (tiempo de viaje y tiempo de adelantamiento). La metodología aplicada es la explicada en el apartado 5.4.3 “Metodología de calibración etapa II” de este documento.

Para cada iteración se obtiene del microsimulador la velocidad media y tiempo de viaje medio de la configuración ingresada. Obtenidos los promedios se procederá a estimar el GEH, la Varianza y el error cuadrático medio (RMSE).

6.1.2.1. Configuración Individual

El ciclista individual fue calibrado en el sentido sur – norte para un día laboral con la demanda correspondiente a este día (ver Tabla 40). Se ingresó en el programa la



longitud de la bicicleta utilizada para la toma de datos (1,7 metros), el tiempo de viaje a calibrar será de 807,73 s. Los resultados del proceso de calibración son los siguientes:

| Iteración | Longitud (m) | Velocidad ingresada | Replicaciones | Velocidad bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE |
|-----------------|--------------|---------------------|---------------|----------------------------|---------------------|---------------|--------------|-------------|
| 1 | 1,7 | 30,98 | 15 | 30,95 | 808,67 | 0,0332 | 0,889 | 0,94 |
| 2 | 1,7 | 30,99 | 15 | 30,96 | 808,3 | 0,0201 | 0,328 | 0,57 |
| 3 | 1,7 | 31,00 | 15 | 30,97 | 808,09 | 0,0128 | 0,132 | 0,36 |
| 4 | 1,7 | 31,01 | 15 | 30,98 | 807,90 | 0,0061 | 0,030 | 0,17 |
| 5 | 1,7 | 31,02 | 1 | 30,99 | 807,56 | 0,0059 | 0,028 | 0,05 |
| | | | 2 | 30,99 | 807,57 | 0,0055 | 0,025 | |
| | | | 3 | 30,98 | 807,74 | 0,0004 | 0,000 | |
| | | | 4 | 31,02 | 806,74 | 0,0347 | 0,975 | |
| | | | 5 | 31,00 | 807,15 | 0,0203 | 0,333 | |
| | | | 6 | 30,99 | 807,57 | 0,0055 | 0,025 | |
| | | | 7 | 30,98 | 807,85 | 0,0043 | 0,015 | |
| | | | 8 | 30,98 | 807,73 | 0,0001 | 0,000 | |
| | | | 9 | 30,92 | 809,28 | 0,0546 | 2,411 | |
| | | | 10 | 30,99 | 807,42 | 0,0108 | 0,094 | |
| | | | 11 | 31,02 | 806,76 | 0,0340 | 0,936 | |
| | | | 12 | 31,02 | 806,75 | 0,0344 | 0,955 | |
| | | | 13 | 30,94 | 808,86 | 0,0398 | 1,283 | |
| | | | 14 | 30,90 | 809,79 | 0,0725 | 4,255 | |
| | | | 15 | 31,00 | 807,34 | 0,0136 | 0,150 | |
| Promedio | | | | 30,98 | 807,68 | 0,0224 | 0,002 | 0,05 |

Tabla 48 Calibración del tiempo de viaje del ciclista individual.

Para lograr calibrar el tiempo de viaje de los ciclistas individuales fueron necesarias 75 replicaciones. El tiempo de viaje obtenido fue de 807,68 s con una velocidad de circulación media de 30,98 (km/h) y una longitud de 1,7 metros.

Estos resultados presentan un RMSE del 0,05 y un GEH de 0,0224 respecto a los valores a calibrar cumpliendo con un error menor al 5% y un GEH menor a 5. Por último, se han ingresado los valores obtenidos del tiempo de viaje de todas las replicaciones finales en el programa STATGRAPHICS para conocer si existen diferencias significativas entre los resultados modelos y observados en campo.

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 0,000106667 | 1 | 0,000106667 | 0,00 | 0,9911 |
| Intra grupos | 11,4819 | 14 | 0,820135 | | |
| Total (Corr.) | 11,482 | 15 | | | |

Tabla 49 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de viaje ciclista individual.

La Tabla 49 ANOVA descompone la varianza del tiempo de viaje en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro-de-grupos. la razón-f, que en este caso es igual a 0,00013006, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-p de la razón-f es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de tiempo entre un nivel de dato (valor modelado y real) y otro, con un nivel del 5% de significación.



6.1.2.2. Configuración dos en paralelo

Los ciclistas circulando dos en paralelo fueron calibrado en el sentido norte – sur para un día laboral con la demanda correspondiente a este día (ver Tabla 40). Se ingresó en el programa la longitud de la bicicleta utilizada para la toma de datos (1,7 metros), el tiempo de viaje a calibrar será de 1044,10 s. Los resultados del proceso de calibración son los siguientes:

| Iteración | Longitud (m) | Velocidad ingresada | Replicaciones | Velocidad bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE |
|-----------|--------------|---------------------|-----------------|----------------------------|---------------------|---------------|-------------|-------------|
| 1 | 1,7 | 23,97 | 1 | 23,96 | 1044,55 | 0,0139 | 0,20 | 0,21 |
| | | | 2 | 23,97 | 1044,02 | 0,0025 | 0,01 | |
| | | | 3 | 23,97 | 1044,01 | 0,0028 | 0,01 | |
| | | | 4 | 23,93 | 1045,75 | 0,0510 | 2,72 | |
| | | | 5 | 23,97 | 1044,01 | 0,0028 | 0,01 | |
| | | | 6 | 23,97 | 1044,01 | 0,0028 | 0,01 | |
| | | | 7 | 23,97 | 1044,01 | 0,0028 | 0,01 | |
| | | | 8 | 23,97 | 1044,01 | 0,0028 | 0,01 | |
| | | | 9 | 23,97 | 1044,01 | 0,0028 | 0,01 | |
| | | | 10 | 23,94 | 1045,13 | 0,0318 | 1,06 | |
| | | | 11 | 23,97 | 1044,01 | 0,0028 | 0,01 | |
| | | | 12 | 23,94 | 1045,4 | 0,0402 | 1,68 | |
| | | | 13 | 23,97 | 1044,06 | 0,0013 | 0,00 | |
| | | | 14 | 23,97 | 1044,01 | 0,0028 | 0,01 | |
| | | | 15 | 23,97 | 1044,05 | 0,0016 | 0,00 | |
| | | | Promedio | 23,96 | 1044,31 | 0,0110 | 0,04 | 0,21 |

Tabla 50 Calibración del tiempo de viaje del ciclista dos en paralelo (2F)

Para lograr calibrar el tiempo de viaje de los ciclistas individuales fueron necesarias 15 replicaciones. El tiempo de viaje obtenido fue de 1044,31 s con una velocidad de circulación media de 23,96 (km/h) y una longitud de 1,7 metros.

Estos resultados presentan un RMSE del 0,21 y un GEH de 0,01 respecto a los valores a calibrar cumpliendo con un error menor al 5% y un GEH menor a 5. Por último, se han ingresado los valores obtenidos del tiempo de viaje de todas las replicaciones finales en el programa STATGRAPHICS para conocer si existen diferencias significativas entre los resultados modelos y observados en campo.

| Dato | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|----------|----------------|----------------|
| Modelado | 15 | 8,26667 |
| Real | 1 | 12,0 |

Estadístico = 0,657718 Valor-P = 0,417366

Tabla 51 Prueba de Kruskal-Wallis de calibración dos en paralelo

Mediante el análisis estadístico se obtuvo que la muestra obtenida no presenta normalidad, por esto, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis que evalúa la hipótesis de que las medianas de tiempo (tiempo de viaje) dentro de cada uno de los 2 niveles de dato son iguales. de cada nivel. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.



6.1.2.3. Configuración 1 + 2

La configuración de 1 + 2 fue calibrado en el sentido norte – sur para un día laboral con la demanda correspondiente a este día (ver Tabla 40). Se ingresó en el programa la longitud la dinámica obtenida desde la base de datos de 20,42 metros, el tiempo de viaje a calibrar será de 1.110,18 s y un tiempo de adelantamiento de 1,727 s.

Una vez calibrada el tiempo de viaje se procederá a calibrar el tiempo de adelantamiento. Los resultados del proceso de calibración son los siguientes:

| Calibración tiempo de viaje | | | | | | | | | Calibración tiempo de adelantamiento | | |
|-----------------------------|-----------|----------------|-----|--------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------------------|--------|---------|
| Iteración | Largo (m) | Vel. ingresada | Rep | Vel obtenida | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE | TA (s)* | GEH Ta | RMSE Ta |
| 1 | 20,42 | 22,54 | 15 | 22,52 | 1.111,03 | 0,03 | 0,72 | 0,85 | - | - | - |
| 2 | 20,42 | 22,55 | 15 | 22,53 | 1.110,56 | 0,01 | 0,14 | 0,38 | - | - | - |
| 3 | 20,42 | 22,56 | 15 | 22,54 | 1.110,16 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 1,95 | 0,22 | 0,36 |
| 4 | 18,00 | 22,56 | 15 | 22,55 | 1.109,91 | 0,01 | 0,07 | 0,27 | - | - | - |
| 5 | 18,00 | 22,55 | 1 | 22,55 | 1.109,75 | 0,01 | 0,19 | 0,22 | 1,73 | 0,16 | 0,26 |
| | | | 2 | 22,55 | 1.109,75 | 0,01 | 0,19 | | | | |
| | | | 3 | 22,54 | 1.110,07 | 0,00 | 0,01 | | | | |
| | | | 4 | 22,53 | 1.110,52 | 0,01 | 0,11 | | | | |
| | | | 5 | 22,55 | 1.109,75 | 0,01 | 0,19 | | | | |
| | | | 6 | 22,54 | 1.110,48 | 0,01 | 0,09 | | | | |
| | | | 7 | 22,52 | 1.111,4 | 0,04 | 1,48 | | | | |
| | | | 8 | 22,53 | 1.110,54 | 0,01 | 0,13 | | | | |
| | | | 9 | 22,52 | 1.111,08 | 0,03 | 0,81 | | | | |
| | | | 10 | 22,55 | 1.109,75 | 0,01 | 0,19 | | | | |
| | | | 11 | 22,55 | 1.109,75 | 0,01 | 0,19 | | | | |
| | | | 12 | 22,53 | 1.110,56 | 0,01 | 0,14 | | | | |
| | | | 13 | 22,52 | 1.111,29 | 0,03 | 1,23 | | | | |
| | | | 14 | 22,55 | 1.109,75 | 0,01 | 0,19 | | | | |
| | | | 15 | 22,55 | 1.109,75 | 0,01 | 0,186 | | | | |
| Promedio | | | | 22,54 | 1.110,40 | 0,02 | 0,05 | 0,22 | | | |

*TA: tiempo de adelantamiento

Tabla 52 Calibración del tiempo de viaje y adelantamiento de la configuración 1+2

De la *TA: tiempo de adelantamiento

Tabla 52 podemos observar que para una misma longitud hay más de una iteración, esto se debe a que con los datos de partida de esta configuración no se ha logrado calibrar el tiempo de viaje, además, aunque se ha calibrado el tiempo de viaje en la iteración 3, se debió continuar el proceso debido a que el tiempo de adelantamiento obtenido no cumplía con los criterios de calibración. En la iteración 4 fue necesario ingresar un nuevo largo obtenido a partir de las velocidades medias observadas durante el adelantamiento, siendo necesario volver a al inicio de la etapa II de calibración para verificar los criterios.

Para la realización de la etapa II fueron observadas 20 maniobras para cumplir con el tamaño muestral necesario con un nivel de confianza del 95% de los datos obtenidos en campo. Todas las maniobras observadas fueron anotadas las velocidades al inicio y fin de la maniobra para lograr estimar el tiempo de adelantamiento, además fue estimado el GEH y el RMSE medio. Los resultados finales de esta etapa son los siguientes.

En el Anejo II: Calibración del microsimulador tabla 5 se encuentran todas las observaciones realizadas a la maniobra de adelantamiento.



| Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón | largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|----------|----------|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| 85,94 | 85,94 | 22,54 | 0,01800 | 1,022 | 1,7270 | 0,60 | 0,26 |
| 46,87 | 61,91 | 22,54 | 0,01800 | 2,034 | | 0,22 | |
| 57,84 | 59,90 | 22,54 | 0,01800 | 1,784 | | 0,04 | |
| 50,40 | 59,51 | 22,54 | 0,01800 | 1,999 | | 0,20 | |
| 52,74 | 65,81 | 22,54 | 0,01800 | 1,764 | | 0,03 | |
| 53,84 | 50,27 | 22,54 | 0,01800 | 2,195 | | 0,33 | |
| 47,40 | 76,89 | 22,54 | 0,01800 | 1,636 | | 0,07 | |
| 49,12 | 61,89 | 22,54 | 0,01800 | 1,966 | | 0,18 | |
| 53,36 | 64,06 | 22,54 | 0,01800 | 1,791 | | 0,05 | |
| 56,75 | 67,42 | 22,54 | 0,01800 | 1,639 | | 0,07 | |
| 58,52 | 69,16 | 22,54 | 0,01800 | 1,569 | | 0,12 | |
| 58,74 | 70,66 | 22,54 | 0,01800 | 1,537 | | 0,15 | |
| 64,64 | 74,90 | 22,54 | 0,01800 | 1,372 | | 0,29 | |
| 47,99 | 64,99 | 22,54 | 0,01800 | 1,908 | | 0,13 | |
| 44,87 | 78,35 | 22,54 | 0,01800 | 1,658 | | 0,05 | |
| 47,51 | 61,01 | 22,54 | 0,01800 | 2,043 | | 0,23 | |
| 52,13 | 66,39 | 22,54 | 0,01800 | 1,765 | | 0,03 | |
| 58,06 | 70,86 | 22,54 | 0,01800 | 1,546 | | 0,14 | |
| 52,72 | 63,20 | 22,54 | 0,01800 | 1,829 | | 0,08 | |
| 60,61 | 71,75 | 22,54 | 0,01800 | 1,485 | | 0,19 | |

Tabla 53 Resultado del ajuste del tiempo de adelantamiento de la configuración 1+2

En total para lograr calibrar esta configuración fueron necesarias 75 replicaciones y la observación de 40 maniobras de adelantamientos. El tiempo de viaje obtenido fue de 1.110,4 s con una velocidad de circulación media de 22,54 (km/h), una longitud de 18 metros que genera un tiempo de adelantamiento medio de 1,727 s.

Los resultados de la Tabla 52 muestran que el tiempo de viaje presentan un RMSE del 0,05 y un GEH de 0,022 respecto a los valores a calibrar, en el caso, del tiempo de adelantamiento se ha obtenido un RMSE de 0,26 y un GEH de 0,16. Cumpliendo la calibración con un error menor al 5% y un GEH menor a 5.

Por último, se han ingresado los valores obtenidos del tiempo de viaje y tiempo de adelantamiento de todas las replicaciones en el programa STATGRAPHICS para conocer si existen diferencias significativas entre los resultados modelos y observados en campo.

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 0,00925042 | 1 | 0,00925042 | 0,03 | 0,8765 |
| Intra grupos | 5,16849 | 14 | 0,369178 | | |
| Total (Corr.) | 5,17774 | 15 | | | |

Tabla 54 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de viaje de la configuración 1 +2

La tabla 54 descompone la varianza de tiempo de viaje en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 0,0250568, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de tiempo entre un nivel de dato (valor modelado y real) y otro, con un nivel del 5% de significación.



| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 9,52381 E-9 | 1 | 9,52381 E-9 | 0,00 | 0,9997 |
| Intra grupos | 1,39378 | 19 | 0,0733569 | | |
| Total (Corr.) | 1,39378 | 20 | | | |

Tabla 55 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de adelantamiento configuración 1 +2

La razón-F, que en este caso es igual a 1,29828 E-7, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de tiempo de adelantamiento entre un nivel de dato (observado y modelado) y otro, con un nivel del 5% de significación.

6.1.2.4. Configuración 2 + 1

La configuración de 2 + 1 fue calibrado en el sentido sur – norte para un día laboral con la demanda correspondiente a este día (ver Tabla 40). Se ingresó en el programa la longitud la dinámica obtenida desde la base de datos de 12,85 metros, el tiempo de viaje a calibrar será de 911,83 s y un tiempo de adelantamiento de 1,1739 s.

Una vez calibrada el tiempo de viaje se procederá a calibrar el tiempo de adelantamiento. Los resultados del proceso de calibración son los siguientes:

| Calibración tiempo de viaje | | | | | | | | | Calibración tiempo de adelantamiento | | |
|-----------------------------|-----------|----------------|-----|---------------|---------------------|-----------------|---------------|-------|--------------------------------------|--------|----------|
| Iteración | Largo (m) | Vel. ingresada | Rep | Vel. obtenida | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE | TA (s) | GEH Ta | RMS E Ta |
| 1 | 12,85 | 27,44 | 15 | 27,43 | 912,24 | 0,01 | 0,17 | 0,414 | - | - | - |
| 2 | 12,85 | 27,45 | 15 | 27,45 | 911,81 | 0,00 | 0,00 | 0,016 | 1,000 | 0,22 | 0,28 |
| 3 | 15,00 | 27,45 | 15 | 27,44 | 911,83 | 0,00 | 0,00 | 0,004 | 1,169 | 0,21 | 0,25 |
| 4 | 15,06 | 27,45 | 1 | 27,44 | 911,83 | 0,00 | 0,00 | 0,284 | 1,174 | 0,21 | 0,26 |
| | | | 2 | 27,42 | 912,61 | 0,03 | 0,61 | | | | |
| | | | 3 | 27,43 | 912,35 | 0,02 | 0,27 | | | | |
| | | | 4 | 27,45 | 911,66 | 0,01 | 0,03 | | | | |
| | | | 5 | 27,45 | 911,66 | 0,01 | 0,03 | | | | |
| | | | 6 | 27,45 | 911,66 | 0,01 | 0,03 | | | | |
| | | | 7 | 27,45 | 911,66 | 0,01 | 0,03 | | | | |
| | | | 8 | 27,45 | 911,70 | 0,00 | 0,02 | | | | |
| | | | 9 | 27,45 | 911,66 | 0,01 | 0,03 | | | | |
| | | | 10 | 27,45 | 911,66 | 0,01 | 0,03 | | | | |
| | | | 11 | 27,45 | 911,66 | 0,01 | 0,03 | | | | |
| | | | 12 | 27,45 | 911,66 | 0,01 | 0,03 | | | | |
| | | | 13 | 27,45 | 911,66 | 0,01 | 0,03 | | | | |
| | | | 14 | 27,45 | 911,66 | 0,01 | 0,03 | | | | |
| | | | 15 | 27,45 | 911,66 | 0,01 | 0,03 | | | | |
| | | | | | | Promedio | 27,445 | | | | |

*TA: tiempo de adelantamiento

Tabla 56 Calibración del tiempo de viaje y adelantamiento de la configuración 2+1

De la Tabla 56 podemos observar que para una misma longitud hay más de una iteración, esto se debe a que con los datos de partida de esta configuración no se ha logrado calibrar el tiempo de viaje, además, aunque se había calibrado el tiempo de viaje en la iteración 2, se debió continuar el proceso debido a que el tiempo de adelantamiento obtenido no cumplía con los criterios de calibración. En la iteración 3 y 4 fue necesario ingresar un nuevo largo obtenido a partir de las velocidades



medias observadas durante el adelantamiento, siendo necesario volver al inicio de etapa II para verificar los criterios.

Para la realización de la etapa dos fueron observadas 18 maniobras para cumplir con el tamaño muestral necesario con un nivel de confianza del 95% de los datos obtenidos en campo. Todas las maniobras observadas fueron anotadas las velocidades al inicio y fin de la maniobra para lograr estimar el tiempo de adelantamiento, además fue estimado el GEH y el RMSE medio. Los resultados finales de esta etapa son los siguientes. En el Anejo II: Calibración del microsimulador tabla 6 se encuentran todas las observaciones realizadas a la maniobra de adelantamiento.

| Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón | largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|----------|----------|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| 102,51 | 102,51 | 27,44 | 0,015 | 0,72 | 1,1740 | 0,46 | 0,25 |
| 78,88 | 78,89 | 27,44 | 0,015 | 1,05 | | 0,11 | |
| 56,80 | 68,80 | 27,44 | 0,015 | 1,53 | | 0,31 | |
| 63,81 | 76,19 | 27,44 | 0,015 | 1,27 | | 0,09 | |
| 71,73 | 83,49 | 27,44 | 0,015 | 1,08 | | 0,09 | |
| 54,12 | 77,77 | 27,44 | 0,015 | 1,41 | | 0,21 | |
| 72,31 | 77,77 | 27,44 | 0,015 | 1,14 | | 0,03 | |
| 54,85 | 68,06 | 27,44 | 0,015 | 1,59 | | 0,36 | |
| 53,14 | 78,73 | 27,44 | 0,015 | 1,41 | | 0,21 | |
| 71,29 | 82,67 | 27,44 | 0,015 | 1,09 | | 0,07 | |
| 52,84 | 78,13 | 27,44 | 0,015 | 1,43 | | 0,22 | |
| 72,72 | 84,63 | 27,44 | 0,015 | 1,06 | | 0,11 | |
| 78,96 | 91,43 | 27,44 | 0,015 | 0,94 | | 0,23 | |
| 51,99 | 77,46 | 27,44 | 0,015 | 1,45 | | 0,24 | |
| 73,36 | 85,88 | 27,44 | 0,015 | 1,04 | | 0,13 | |
| 63,54 | 75,57 | 27,44 | 0,015 | 1,29 | | 0,10 | |
| 95,36 | 100,39 | 27,44 | 0,015 | 0,77 | | 0,41 | |
| 91,19 | 91,19 | 27,44 | 0,015 | 0,85 | | 0,32 | |

Tabla 57 Resultado del ajuste del tiempo de adelantamiento de la configuración 2+1

En total para lograr calibrar esta configuración fueron necesarias 60 replicaciones y la observación de 54 maniobras de adelantamientos. El tiempo de viaje obtenido fue de 911,84 s con una velocidad de circulación media de 27,445 (km/h), una longitud de 27,45 metros que genera un tiempo de adelantamiento medio de 1,1740 s.

Los resultados de la tabla 56 muestra que el tiempo de viaje presenta un RMSE del 0,004 y un GEH de 0,007 respecto a los valores a calibrar, en el caso, del tiempo de adelantamiento se ha obtenido un RMSE de 0,255 y un GEH de 0,2059. Cumpliendo la calibración con un error menor al 5% y un GEH menor a 5. Por último, se han ingresado los valores obtenidos del tiempo de viaje y tiempo de adelantamiento de todas las replicaciones en el programa STATGRAPHICS para conocer si existen diferencias significativas entre los resultados modelos y observados en campo.

| DATO | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|----------|----------------|----------------|
| Modelado | 15 | 8,16667 |
| Real | 1 | 13,5 |

Estadístico = 1,74292 Valor-P = 0,186766

Tabla 58 Prueba de Kruskal-Wallis de calibración del tiempo de viaje de la configuración 2+1



Mediante el análisis estadístico se obtuvo que la muestra obtenida no presenta normalidad, por esto, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 0,00899317 | 1 | 0,00899317 | 0,07 | 0,7968 |
| Intra grupos | 2,77702 | 21 | 0,132239 | | |
| Total (Corr.) | 2,78601 | 22 | | | |

Tabla 59 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de adelantamiento configuración 2+1

La razón-F, que en este caso es igual a 0,07, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de tiempo de adelantamiento entre un nivel de dato (observado y modelado) y otro, con un nivel del 5% de significación.

6.1.2.5. Configuración dos en línea

La configuración de dos en línea (2L) fue calibrado en el sentido norte – sur para un día laboral con la demanda correspondiente a este día (ver Tabla 40). Se ingresó en el programa la longitud la dinámica obtenida desde la base de datos de 28,02 metros, el tiempo de viaje a calibrar será de 1.134,45 s y un tiempo de adelantamiento de 1,983 s.

Una vez calibrada el tiempo de viaje se procederá a calibrar el tiempo de adelantamiento. Los resultados del proceso de calibración son los siguientes:

| Iteración | Largo (m) | Vel. ingresada | Calibración tiempo de viaje | | | | | | Calibración tiempo de adelantamiento | | |
|-----------|-----------|----------------|-----------------------------|--------------|---------------------|-------------|--------------|-------------|--------------------------------------|--------|---------|
| | | | Rep | Vel obtenida | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE | TA (s) | GEH Ta | RMSE Ta |
| 1 | 28,02 | 22,06 | 15 | 22,05 | 1.134,85 | 0,01 | 0,16 | 0,40 | 2,27 | 0,2637 | 0,4878 |
| 2 | 28,02 | 22,07 | 15 | 22,05 | 1.134,77 | 0,01 | 0,10 | 0,32 | - | - | - |
| 3 | 28,02 | 22,08 | 15 | 22,06 | 1.134,29 | 0,00 | 0,03 | 0,16 | - | - | - |
| 4 | 24,50 | 22,08 | 15 | 22,06 | 1.134,43 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 1,99 | 0,1842 | 0,3585 |
| 5 | 24,47 | 22,08 | 1 | 22,03 | 1.135,95 | 0,04 | 2,26 | 0,02 | 1,983 | 0,1842 | 0,3581 |
| | | | 2 | 22,05 | 1.134,79 | 0,01 | 0,12 | | | | |
| | | | 3 | 22,05 | 1.134,74 | 0,01 | 0,09 | | | | |
| | | | 4 | 22,08 | 1.133,37 | 0,03 | 1,16 | | | | |
| | | | 5 | 22,06 | 1.134,27 | 0,01 | 0,03 | | | | |
| | | | 6 | 22,02 | 1.136,59 | 0,06 | 4,59 | | | | |
| | | | 7 | 22,08 | 1.133,37 | 0,03 | 1,16 | | | | |
| | | | 8 | 22,07 | 1.133,91 | 0,02 | 0,29 | | | | |
| | | | 9 | 21,98 | 1.138,61 | 0,12 | 17,32 | | | | |
| | | | 10 | 22,08 | 1.133,58 | 0,03 | 0,75 | | | | |
| | | | 11 | 22,03 | 1.135,86 | 0,04 | 1,99 | | | | |
| | | | 12 | 22,06 | 1.134,40 | 0,00 | 0,00 | | | | |
| | | | 13 | 22,08 | 1.133,37 | 0,03 | 1,16 | | | | |
| | | | 14 | 22,03 | 1.135,74 | 0,04 | 1,67 | | | | |
| | | | 15 | 22,08 | 1.133,37 | 0,03 | 1,16 | | | | |
| | | | Promedio | 22,06 | 1134,43 | 0,03 | 0,001 | 0,02 | | | |

*TA: tiempo de adelantamiento

Tabla 60 Calibración del tiempo de viaje y adelantamiento de la configuración 2L



De la Tabla 60 podemos observar que para una misma longitud hay más de una iteración, esto se debe a que con los datos de partida de esta configuración no se ha logrado calibrar el tiempo de viaje, además, aunque se había calibrado el tiempo de viaje en la iteración 3, se debió continuar el proceso debido a que el tiempo de adelantamiento obtenido no cumplía con los criterios de calibración. En la iteración 4 y 5 fue necesario ingresar un nuevo largo obtenido a partir de las velocidades medias observadas durante el adelantamiento, siendo necesario volver al inicio de la etapa II para verificar los criterios.

Para la realización de la etapa dos fueron observadas 30 maniobras para cumplir con el tamaño muestral necesario con un nivel de confianza del 90% de los datos obtenidos en campo. Todas las maniobras observadas fueron anotadas las velocidades al inicio y fin de la maniobra para lograr estimar el tiempo de adelantamiento, además fue estimado el GEH y el RMSE medio. Los resultados finales de esta etapa son los siguientes. En el Anejo II: Calibración del microsimulador tabla 7 se encuentran todas las observaciones realizadas a la maniobra de adelantamiento.

| Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón | largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|----------|----------|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| 58,87 | 72,30 | 22,06 | 0,02 | 2,02 | 1,983 | 0,03 | 0,36 |
| 61,04 | 72,36 | 22,06 | 0,02 | 1,97 | | 0,01 | |
| 65,69 | 70,99 | 22,06 | 0,02 | 1,90 | | 0,06 | |
| 43,56 | 67,89 | 22,06 | 0,02 | 2,62 | | 0,42 | |
| 41,28 | 67,49 | 22,06 | 0,02 | 2,73 | | 0,48 | |
| 51,66 | 64,21 | 22,06 | 0,02 | 2,46 | | 0,32 | |
| 47,75 | 77,47 | 22,06 | 0,02 | 2,17 | | 0,13 | |
| 65,62 | 74,23 | 22,06 | 0,02 | 1,84 | | 0,10 | |
| 63,27 | 73,06 | 22,06 | 0,02 | 1,91 | | 0,05 | |
| 58,37 | 74,48 | 22,06 | 0,02 | 1,99 | | 0,00 | |
| 57,18 | 72,44 | 22,06 | 0,02 | 2,06 | | 0,05 | |
| 57,78 | 72,74 | 22,06 | 0,02 | 2,04 | | 0,04 | |
| 59,22 | 74,34 | 22,06 | 0,02 | 1,97 | | 0,01 | |
| 59,66 | 74,78 | 22,06 | 0,02 | 1,95 | | 0,02 | |
| 72,08 | 79,71 | 22,06 | 0,02 | 1,64 | | 0,26 | |
| 48,97 | 67,23 | 22,06 | 0,02 | 2,44 | | 0,31 | |
| 70,07 | 72,38 | 22,06 | 0,02 | 1,79 | | 0,14 | |
| 41,73 | 69,47 | 22,06 | 0,02 | 2,63 | | 0,42 | |
| 56,34 | 73,71 | 22,06 | 0,02 | 2,05 | | 0,05 | |
| 58,99 | 76,15 | 22,06 | 0,02 | 1,94 | | 0,03 | |
| 60,73 | 78,08 | 22,06 | 0,02 | 1,86 | | 0,09 | |
| 47,42 | 85,38 | 22,06 | 0,02 | 1,99 | | 0,00 | |
| 56,37 | 69,21 | 22,06 | 0,02 | 2,16 | | 0,13 | |
| 48,28 | 87,59 | 22,06 | 0,02 | 1,92 | | 0,04 | |
| 53,93 | 90,38 | 22,06 | 0,02 | 1,76 | | 0,16 | |
| 71,91 | 96,44 | 22,06 | 0,02 | 1,42 | | 0,43 | |
| 89,25 | 89,25 | 22,06 | 0,02 | 1,31 | | 0,52 | |
| 89,66 | 89,66 | 22,06 | 0,02 | 1,30 | | 0,53 | |
| 83,32 | 89,66 | 22,06 | 0,02 | 1,37 | | 0,48 | |
| 44,17 | 77,31 | 22,06 | 0,02 | 2,28 | | 0,20 | |

Tabla 61 Resultado del ajuste del tiempo de adelantamiento de la configuración 2L

En total para lograr calibrar esta configuración fueron necesarias 75 replicaciones y la observación de 90 maniobras de adelantamientos. El tiempo de viaje obtenido fue



de 1134,43 s con una velocidad de circulación media de 22,06 (km/h), una longitud de 24,47 metros que genera un tiempo de adelantamiento medio de 1,983 s.

Los resultados de la Tabla 60 presentan para el tiempo de viaje un RMSE del 0,002 y un GEH de 0,03 respecto a los valores a calibrar, en el caso, del tiempo de adelantamiento se obtenido un RMSE de 0,3581 y un GEH de 0,1842. Cumpliendo la calibración con un error menor al 5% y un GEH menor a 5.

Por último, se han ingresado los valores obtenidos del tiempo de viaje y tiempo de adelantamiento de todas las replicaciones en el programa STATGRAPHICS para conocer si existen diferencias significativas entre los resultados modelos y observados en campo.

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 0,11137 | 1 | 0,11137 | 0,05 | 0,8284 |
| Intra grupos | 31,9542 | 14 | 2,28244 | | |
| Total (Corr.) | 32,0655 | 15 | | | |

Tabla 62 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de viaje de la configuración 2L

La razón-F, que en este caso es igual a 0,0487944, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de tiempo de adelantamiento entre un nivel de dato (observado y modelado) y otro, con un nivel del 5% de significación.

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 3,87097 E-8 | 1 | 3,87097 E-8 | 0,00 | 0,9996 |
| Intra grupos | 3,86023 | 29 | 0,133111 | | |
| Total (Corr.) | 3,86023 | 30 | | | |

Tabla 63 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de adelantamiento configuración 2L

La razón-F, que en este caso es igual a 2,90807E-7, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de tiempo de adelantamiento entre un nivel de dato (observado y modelado) y otro, con un nivel del 5% de significación.

6.1.2.6. Configuración cuatro en línea

La configuración de cuatro en línea (4L) fue calibrado en el sentido norte – sur para un día laboral con la demanda correspondiente a este día (ver Tabla 40). Se ingresó en el programa la longitud la dinámica obtenida desde la base de datos de 16,06 metros, el tiempo de viaje a calibrar será de 1.154 s y un tiempo de adelantamiento de 2,1 s.

Una vez calibrada el tiempo de viaje se procederá a calibrar el tiempo de adelantamiento. Los resultados del proceso de calibración son los siguientes:



| Iteración | Largo (m) | Vel. ingresada | Rep | Vel obtenida | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RSME | TA (s)[1] | GEH Ta | RSME Ta |
|-----------------|-----------|----------------|-----|--------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|--------|---------|
| 1 | 16,06 | 21,69 | 15 | 21,68 | 1.154,03 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 1,49 | 0,466 | 0,683 |
| 2 | 23,22 | 21,69 | 15 | 21,68 | 1.154,41 | 0,01 | 0,17 | 0,41 | 2,16 | 0,222 | 0,357 |
| 3 | 22,53 | 21,690 | 1 | 21,64 | 1.156,43 | 0,07 | 5,90 | 0,330 | 2,10 | 0,2193 | 0,34 |
| | | | 2 | 21,67 | 1.154,77 | 0,02 | 0,59 | | | | |
| | | | 3 | 21,69 | 1.153,75 | 0,01 | 0,06 | | | | |
| | | | 4 | 21,69 | 1.153,92 | 0,00 | 0,01 | | | | |
| | | | 5 | 21,69 | 1.153,75 | 0,01 | 0,06 | | | | |
| | | | 6 | 21,69 | 1.153,75 | 0,01 | 0,06 | | | | |
| | | | 7 | 21,69 | 1.153,75 | 0,01 | 0,06 | | | | |
| | | | 8 | 21,68 | 1.154,45 | 0,01 | 0,20 | | | | |
| | | | 9 | 21,66 | 1.155,49 | 0,04 | 2,22 | | | | |
| | | | 10 | 21,65 | 1.155,77 | 0,05 | 3,13 | | | | |
| | | | 11 | 21,69 | 1.153,75 | 0,01 | 0,06 | | | | |
| | | | 12 | 21,69 | 1.153,75 | 0,01 | 0,06 | | | | |
| | | | 13 | 21,69 | 1.153,84 | 0,00 | 0,03 | | | | |
| | | | 14 | 21,67 | 1.154,71 | 0,02 | 0,50 | | | | |
| | | | 15 | 21,69 | 1.153,75 | 0,01 | 0,06 | | | | |
| Promedio | | | | 21,68 | 1154,33 | 0,02 | 0,11 | 0,33 | | | |

Tabla 64 Calibración del tiempo de viaje y adelantamiento de la configuración 4L

De la Tabla 64 podemos observar, aunque se había calibrado el tiempo de viaje en la iteración 1, se debió continuar el proceso debido a que el tiempo de adelantamiento obtenido no cumplía con los criterios de calibración. En la iteración 2 y 3 fue necesario ingresar un nuevo largo obtenido a partir de las velocidades medias observadas durante el adelantamiento, siendo necesario volver al inicio de la etapa II para verificar los criterios.

Para la realización de la etapa II fueron observadas 8 maniobras para cumplir con el tamaño muestral necesario con un nivel de confianza del 95% de los datos obtenidos en campo. Todas las maniobras observadas fueron anotadas las velocidades al inicio y fin de la maniobra para lograr estimar el tiempo de adelantamiento, además fue estimado el GEH y el RMSE medio. Los resultados finales de esta etapa son los siguientes. En el Anejo II: Calibración del microsimulador tabla 8 se encuentran todas las observaciones realizadas a la maniobra de adelantamiento.

| Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón | largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|----------|----------|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| 43,87 | 67,59 | 21,68 | 0,02 | 2,38 | 2,1 | 0,19 | 0,34 |
| 73,35 | 78,03 | 21,68 | 0,02 | 1,50 | | 0,45 | |
| 40,71 | 68,18 | 21,68 | 0,02 | 2,48 | | 0,25 | |
| 58,99 | 72,41 | 21,68 | 0,02 | 1,84 | | 0,18 | |
| 60,41 | 73,39 | 21,68 | 0,02 | 1,79 | | 0,22 | |
| 63,52 | 60,94 | 21,68 | 0,02 | 2,00 | | 0,07 | |
| 48,68 | 61,17 | 21,68 | 0,02 | 2,44 | | 0,23 | |
| 54,09 | 58,00 | 21,68 | 0,02 | 2,36 | | 0,17 | |

Tabla 65 Resultado del ajuste del tiempo de adelantamiento de la configuración 4L

En total para lograr calibrar esta configuración fueron necesarias 45 replicaciones y la observación de 24 maniobras de adelantamientos. El tiempo de viaje obtenido fue de 1.154,33 s con una velocidad de circulación media de 21,68 (km/h), una longitud de 22,53 metros que genera un tiempo de adelantamiento medio de 2,1 segundos.



Los resultados de la Tabla 64 presenta para el tiempo de viaje un RMSE del 0,33 y un GEH de 0,02 respecto a los valores a calibrar, en el caso, del tiempo de adelantamiento se ha obtenido un RMSE de 0,34 y un GEH de 0,2193. Cumpliendo la calibración con un error menor al 5% y un GEH menor a 5.

Por último, se han ingresado los valores obtenidos del tiempo de viaje y tiempo de adelantamiento de todas las replicaciones en el programa STATGRAPHICS para conocer si existen diferencias significativas entre los resultados modelos y observados en campo.

| DATO | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|----------|----------------|----------------|
| Modelado | 15 | 8,4 |
| Real | 1 | 10,0 |

Estadístico = 0,115385 Valor-P = 0,734095

Tabla 66 Prueba de Kruskal-Wallis de calibración del tiempo de viaje de la configuración 4L

Mediante el análisis estadístico se obtuvo que la muestra obtenida no presenta normalidad, por esto, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza, al igual que la calibración del tiempo de adelantamiento.

6.1.2.7. Configuración cuatro en paralelo

La configuración de cuatro en paralelo (4F) fue calibrado en el sentido sur – norte para un día laboral con la demanda correspondiente a este día (ver Tabla 40). Se ingresó en el programa la longitud la dinámica obtenida desde la base de datos de 14,87 metros, el tiempo de viaje a calibrar será de 932,875 s y un tiempo de adelantamiento de 1,375 s. Una vez calibrada el tiempo de viaje se procederá a calibrar el tiempo de adelantamiento. Los resultados del proceso de calibración son los siguientes:

| Iteración | Largo (m) | Vel. ingresada | Rep | Vel obtenida | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RSME | TA (s)[1] | GEH Ta | RSME Ta |
|-----------------|-----------|----------------|-----|--------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|--------|---------|
| 1 | 14,87 | 26,83 | 15 | 26,82 | 933,06 | 0,01 | 0,03 | 0,18 | 1,132 | 0,306 | 0,376 |
| 2 | 18,00 | 26,83 | 15 | 26,81 | 933,39 | 0,02 | 0,27 | 0,515 | - | - | - |
| 3 | 18,00 | 26,84 | 15 | 26,82 | 932,99 | 0,00 | 0,01 | 0,115 | 1,382 | 0,266 | 0,359 |
| 4 | 17,91 | 26,84 | 15 | 26,82 | 932,99 | 0,00 | 0,01 | 0,115 | 1,376 | 0,266 | 0,356 |
| 5 | 17,90 | 26,84 | 1 | 26,84 | 932,38 | 0,02 | 0,25 | 0,120 | 1,375 | 0,266 | 0,356 |
| | | | 2 | 26,84 | 932,38 | 0,02 | 0,25 | | | | |
| | | | 3 | 26,76 | 935,29 | 0,08 | 5,83 | | | | |
| | | | 4 | 26,84 | 932,38 | 0,02 | 0,25 | | | | |
| | | | 5 | 26,84 | 932,38 | 0,02 | 0,25 | | | | |
| | | | 6 | 26,82 | 933,06 | 0,01 | 0,03 | | | | |
| | | | 7 | 26,74 | 935,72 | 0,09 | 8,09 | | | | |
| | | | 8 | 26,83 | 932,59 | 0,01 | 0,08 | | | | |
| | | | 9 | 26,76 | 935,33 | 0,08 | 6,03 | | | | |
| | | | 10 | 26,84 | 932,38 | 0,02 | 0,25 | | | | |
| | | | 11 | 26,81 | 933,27 | 0,01 | 0,16 | | | | |
| | | | 12 | 26,79 | 934,20 | 0,04 | 1,76 | | | | |
| | | | 13 | 26,84 | 932,38 | 0,02 | 0,25 | | | | |
| | | | 14 | 26,82 | 933,06 | 0,01 | 0,03 | | | | |
| | | | 15 | 26,84 | 932,38 | 0,02 | 0,25 | | | | |
| Promedio | | | | 26,82 | 932,99 | 0,03 | 0,01 | 0,12 | | | |

Tabla 67 Calibración del tiempo de viaje y adelantamiento de la configuración 4F



De la Tabla 67 podemos observar, aunque se había calibrado el tiempo de viaje en la iteración 1, se debió continuar el proceso debido a que el tiempo de adelantamiento obtenido no cumplía con los criterios de calibración. En la iteración 2, 4 y 5 fue necesario ingresar un nuevo largo obtenido a partir de las velocidades medias observadas durante el adelantamiento, siendo necesario volver al inicio de la etapa II para verificar los criterios.

Para la realización de la etapa dos fueron observadas 12 maniobras para cumplir con el tamaño muestral necesario con un nivel de confianza del 95% de los datos obtenidos en campo. Todas las maniobras observadas fueron anotadas las velocidades al inicio y fin de la maniobra para lograr estimar el tiempo de adelantamiento, además fue estimado el GEH y el RMSE medio. Los resultados finales de esta etapa son los siguientes. En el Anejo II: Calibración del microsimulador tabla 9 se encuentran todas las observaciones realizadas a la maniobra de adelantamiento.

| Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón | largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|----------|----------|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|--------|
| 52,29 | 64,69 | 26,82 | 0,02 | 2,03 | 1,3753 | 0,51 | 0,3562 |
| 54,72 | 67,56 | 26,82 | 0,02 | 1,88 | | 0,39 | |
| 92,57 | 92,57 | 26,82 | 0,02 | 0,98 | | 0,36 | |
| 86,46 | 89,88 | 26,82 | 0,02 | 1,05 | | 0,29 | |
| 52,75 | 78,65 | 26,82 | 0,02 | 1,66 | | 0,23 | |
| 71,99 | 84,37 | 26,82 | 0,02 | 1,25 | | 0,10 | |
| 74,44 | 86,44 | 26,82 | 0,02 | 1,20 | | 0,15 | |
| 83,17 | 88,75 | 26,82 | 0,02 | 1,09 | | 0,26 | |
| 50,40 | 73,95 | 26,82 | 0,02 | 1,82 | | 0,35 | |
| 71,66 | 83,47 | 26,82 | 0,02 | 1,27 | | 0,09 | |
| 83,70 | 71,51 | 26,82 | 0,02 | 1,27 | | 0,09 | |
| 91,61 | 91,61 | 26,82 | 0,02 | 0,99 | | 0,35 | |

Tabla 68 Resultado del ajuste del tiempo de adelantamiento de la configuración 4F

En total para lograr calibrar esta configuración fueron necesarias 75 replicaciones y la observación de 48 maniobras de adelantamientos. El tiempo de viaje obtenido fue de 932,99 s con una velocidad de circulación media de 26,822 (km/h), una longitud de 17,90 metros que genera un tiempo de adelantamiento medio de 1,375 segundos.

Los resultados de la Tabla 67 presentan para el tiempo de viaje un RMSE del 0,12 y un GEH de 0,03 respecto a los valores a calibrar, en el caso, del tiempo de adelantamiento se ha obtenido un RMSE de 0,356 y un GEH de 0,2658. Cumpliendo la calibración con un error menor al 5% y un GEH menor a 5.

Por último, se han ingresado los valores obtenidos del tiempo de viaje y tiempo de adelantamiento de todas las replicaciones en el programa STATGRAPHICS para conocer si existen diferencias significativas entre los resultados modelos y observados en campo.

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 0,152763 | 1 | 0,152763 | 0,10 | 0,7559 |
| Intra grupos | 21,2856 | 14 | 1,5204 | | |
| Total (Corr.) | 21,4383 | 15 | | | |

Tabla 69 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de viaje de la configuración 4F



La razón-F, que en este caso es igual a 0,100475, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de tiempo de adelantamiento entre un nivel de dato (observado y modelado) y otro, con un nivel del 5% de significación.

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 6,41026E-7 | 1 | 6,41026E-7 | 0,00 | 0,9983 |
| Intra grupos | 1,52269 | 11 | 0,138427 | | |
| Total (Corr.) | 1,52269 | 12 | | | |

Tabla 70 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de adelantamiento configuración 4F

La razón-F, que en este caso es igual a 0,0000046308, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de tiempo de adelantamiento entre un nivel de dato (observado y modelado) y otro, con un nivel del 5% de significación.

6.1.2.8. Configuración diez en paralelo

La configuración de diez en paralelo (10F) fue calibrado en el sentido sur – norte para un día festivo con la demanda correspondiente a este día (ver Tabla 40). Se ingresó en el programa la longitud la dinámica obtenida desde la base de datos de 19,89 metros, el tiempo de viaje a calibrar será de 1.000,61 s y un tiempo de adelantamiento de 2,0323 s.

Una vez calibrada el tiempo de viaje se procederá a calibrar el tiempo de adelantamiento. Los resultados del proceso de calibración son los siguientes:

| Iteración | Largo (m) | Vel. ingresada | Rep | Vel obtenida | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RSME | TA (s)[1] | GEH Ta | RSME Ta |
|-----------|-----------|----------------|-----------------|--------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|--------|---------|
| 1 | 19,89 | 25,01 | 15 | 24,98 | 1.001,73 | 0,04 | 1,25 | 1,12 | - | - | - |
| 2 | 19,89 | 25,02 | 15 | 25,00 | 1.000,98 | 0,01 | 0,13 | 0,367 | - | - | - |
| 3 | 19,89 | 25,03 | 15 | 25,01 | 1.000,44 | 0,01 | 0,03 | 0,173 | 1,496 | 0,482 | 0,694 |
| 4 | 26,99 | 25,02 | 15 | 25,01 | 1.000,69 | 0,03 | 0,01 | 0,077 | 1,878 | 0,309 | 0,487 |
| 5 | 29,48 | 25,02 | 15 | 25,00 | 1.000,84 | 0,03 | 0,05 | 0,227 | - | - | - |
| 6 | 29,48 | 25,03 | 1 | 25,03 | 999,80 | 0,03 | 0,66 | 0,093 | 2,032 | 0,275 | 0,466 |
| | | | 2 | 25,03 | 999,80 | 0,03 | 0,66 | | | | |
| | | | 3 | 24,96 | 1.002,73 | 0,07 | 4,48 | | | | |
| | | | 4 | 25,03 | 1.000,00 | 0,02 | 0,38 | | | | |
| | | | 5 | 25,03 | 999,80 | 0,03 | 0,66 | | | | |
| | | | 6 | 25,01 | 1.000,75 | 0,00 | 0,02 | | | | |
| | | | 7 | 25,03 | 999,91 | 0,02 | 0,49 | | | | |
| | | | 8 | 24,96 | 1.002,63 | 0,06 | 4,07 | | | | |
| | | | 9 | 25,00 | 1.000,86 | 0,01 | 0,06 | | | | |
| | | | 10 | 24,97 | 1.002,16 | 0,05 | 2,39 | | | | |
| | | | 11 | 25,00 | 1.000,88 | 0,01 | 0,07 | | | | |
| | | | 12 | 25,03 | 999,80 | 0,03 | 0,66 | | | | |
| | | | 13 | 25,01 | 1.000,71 | 0,00 | 0,01 | | | | |
| | | | 14 | 25,03 | 999,80 | 0,03 | 0,66 | | | | |
| | | | 15 | 25,03 | 999,80 | 0,03 | 0,66 | | | | |
| | | | Promedio | 25,01 | 1.000,52 | 0,03 | 0,01 | 0,09 | | | |

Tabla 71 Calibración del tiempo de viaje y adelantamiento de la configuración 10F



De la Tabla 71 podemos observar que para una misma longitud hay más de una iteración, esto se debe a que con los datos de partida de esta configuración no se ha logrado calibrar el tiempo de viaje, además, aunque se había calibrado el tiempo de viaje en la iteración 3, se debió continuar el proceso debido a que el tiempo de adelantamiento obtenido no cumplía con los criterios de calibración. En la iteración 4 y 5 fue necesario ingresar un nuevo largo obtenido a partir de las velocidades medias observadas durante el adelantamiento, siendo necesario volver al inicio de la etapa II para verificar los criterios.

Para la realización de la etapa dos fueron observadas 22 maniobras para cumplir con el tamaño muestral necesario con un nivel de confianza del 95% de los datos obtenidos en campo. Todas las maniobras observadas fueron anotadas las velocidades al inicio y fin de la maniobra para lograr estimar el tiempo de adelantamiento, además fue estimado el GEH y el RMSE medio. Los resultados finales de esta etapa son los siguientes. En el Anejo II: Calibración del microsimulador tabla 10 se encuentran todas las observaciones realizadas a la maniobra de adelantamiento.

| Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón | largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|----------|----------|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|-------|
| 53,35 | 72,63 | 25,01 | 0,029 | 2,79 | | 0,49 | |
| 60,25 | 69,87 | 25,01 | 0,029 | 2,65 | | 0,40 | |
| 92,26 | 92,26 | 25,01 | 0,029 | 1,58 | | 0,34 | |
| 59,20 | 81,98 | 25,01 | 0,029 | 2,33 | | 0,20 | |
| 71,05 | 88,63 | 25,01 | 0,029 | 1,94 | | 0,07 | |
| 73,79 | 88,63 | 25,01 | 0,029 | 1,89 | | 0,10 | |
| 75,35 | 88,63 | 25,01 | 0,029 | 1,86 | | 0,12 | |
| 77,73 | 88,63 | 25,01 | 0,029 | 1,82 | | 0,15 | |
| 48,13 | 82,30 | 25,01 | 0,029 | 2,64 | | 0,40 | |
| 70,46 | 95,99 | 25,01 | 0,029 | 1,82 | 2,032 | 0,15 | 0,466 |
| 47,25 | 80,59 | 25,01 | 0,029 | 2,73 | | 0,45 | |
| 70,24 | 88,18 | 25,01 | 0,029 | 1,96 | | 0,05 | |
| 87,73 | 87,73 | 25,01 | 0,029 | 1,69 | | 0,25 | |
| 106,60 | 106,60 | 25,01 | 0,029 | 1,30 | | 0,57 | |
| 111,53 | 100,31 | 25,01 | 0,029 | 1,31 | | 0,56 | |
| 102,37 | 102,37 | 25,01 | 0,029 | 1,37 | | 0,51 | |
| 50,72 | 86,68 | 25,01 | 0,029 | 2,43 | | 0,27 | |
| 79,89 | 79,89 | 25,01 | 0,029 | 1,93 | | 0,07 | |
| 79,89 | 79,89 | 25,01 | 0,029 | 1,93 | | 0,07 | |
| 75,18 | 98,69 | 25,01 | 0,029 | 1,71 | | 0,23 | |
| 53,42 | 93,82 | 25,01 | 0,029 | 2,18 | | 0,10 | |
| 45,43 | 79,89 | 25,01 | 0,029 | 2,82 | | 0,51 | |

Tabla 72 Resultado del ajuste del tiempo de adelantamiento de la configuración 10F

En total para lograr calibrar esta configuración fueron necesarias 90 replicaciones y la observación de 66 maniobras de adelantamientos. El tiempo de viaje obtenido fue de 1000,52 s con una velocidad de circulación media de 25,01 (km/h), una longitud de 29,48 metros que genera un tiempo de adelantamiento medio de 2,0323 s.

Los resultados de la Tabla 71 presentan para el tiempo de viaje un RMSE del 0,09 y un GEH de 0,03 respecto a los valores a calibrar, en el caso, del tiempo de adelantamiento se ha obtenido un RMSE de 0,466 y un GEH de 0,275. Cumpliendo la calibración con un error menor al 5% y un GEH menor a 5.



Por último, se han ingresado los valores obtenidos del tiempo de viaje y tiempo de adelantamiento de todas las replicaciones en el programa STATGRAPHICS para conocer si existen diferencias significativas entre los resultados modelos y observados en campo.

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 0,000326667 | 1 | 0,000326667 | 0,00 | 0,9867 |
| Intra grupos | 15,9358 | 14 | 1,13827 | | |
| Total (Corr.) | 15,9361 | 15 | | | |

Tabla 73 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de viaje de la configuración 10F

La razón-F, que en este caso es igual a 0,000286985, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de tiempo de adelantamiento entre un nivel de dato (observado y modelado) y otro, con un nivel del 5% de significación.

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
| Entre grupos | 0,00000185051 | 1 | 0,00000185051 | 0,00 | 0,9978 |
| Intra grupos | 4,79778 | 21 | 0,228466 | | |
| Total (Corr.) | 4,79778 | 22 | | | |

Tabla 74 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de adelantamiento configuración 10F

La razón-F, que en este caso es igual a 0,00000809974, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de tiempo de adelantamiento entre un nivel de dato (observado y modelado) y otro, con un nivel del 5% de significación.

6.1.2.9. Configuración diez en línea

La configuración de diez en línea (10L) fue calibrado en el sentido norte – sur para un día festivo con la demanda correspondiente a este día (ver Tabla 40). Se ingresó en el programa la longitud la dinámica obtenida desde la base de datos de 53,01 metros, el tiempo de viaje a calibrar será de 1.383 s y un tiempo de adelantamiento de 3,9722 s.

Una vez calibrada el tiempo de viaje se procederá a calibrar el tiempo de adelantamiento. Los resultados del proceso de calibración son los siguientes:



| Iteración | Largo (m) | Vel. ingresada | Rep | Vel obtenida | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RSME | TA (s)[1] | GEH Ta | RSME Ta |
|-----------------|-----------|----------------|-----|--------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|--------|---------|
| 1 | 53,01 | 18,09 | 15 | 18,08 | 1.384,19 | 0,03 | 1,42 | 1,19 | - | - | - |
| 6 | 53,01 | 18,10 | 1 | 18,07 | 1.385,07 | 0,06 | 4,28 | 0,470 | 3,973 | 0,429 | 1,005 |
| | | | 2 | 18,10 | 1.382,59 | 0,01 | 0,17 | | | | |
| | | | 3 | 18,10 | 1.382,59 | 0,01 | 0,17 | | | | |
| | | | 4 | 18,10 | 1.382,59 | 0,01 | 0,17 | | | | |
| | | | 5 | 18,08 | 1.384,10 | 0,03 | 1,21 | | | | |
| | | | 6 | 18,10 | 1.382,59 | 0,01 | 0,17 | | | | |
| | | | 7 | 18,06 | 1.385,68 | 0,07 | 7,18 | | | | |
| | | | 8 | 18,10 | 1.382,59 | 0,01 | 0,17 | | | | |
| | | | 9 | 18,10 | 1.382,70 | 0,01 | 0,09 | | | | |
| | | | 10 | 18,08 | 1.383,90 | 0,02 | 0,81 | | | | |
| | | | 11 | 18,10 | 1.382,59 | 0,01 | 0,17 | | | | |
| | | | 12 | 18,10 | 1.382,59 | 0,01 | 0,17 | | | | |
| | | | 13 | 18,09 | 1.383,58 | 0,02 | 0,34 | | | | |
| | | | 14 | 18,10 | 1.382,59 | 0,01 | 0,17 | | | | |
| | | | 15 | 18,10 | 1.382,59 | 0,01 | 0,17 | | | | |
| Promedio | | | | 18,09 | 1.383,47 | 0,02 | 0,22 | 0,47 | | | |

Tabla 75 Calibración del tiempo de viaje y adelantamiento de la configuración 10L

De la Tabla 75 podemos observar que en la primera iteración no logra ajustar adecuadamente el tiempo de viaje. En la iteración dos se modifica la velocidad y se mantiene la longitud inicial, dando como resultado la configuración calibrada.

Para la realización de la etapa dos fueron observadas 25 maniobras para cumplir con el tamaño muestral necesario con un nivel de confianza del 95% de los datos obtenidos en campo. Todas las maniobras observadas fueron anotadas las velocidades al inicio y fin de la maniobra para lograr estimar el tiempo de adelantamiento, además fue estimado el GEH y el RMSE medio. Los resultados finales de esta etapa son los siguientes.

| Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón | largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|----------|----------|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| 47,04 | 71,14 | 18,09 | 0,0530 | 4,6544 | 3,9731 | 0,33 | 1,00 |
| 97,55 | 97,55 | 18,09 | 0,0530 | 2,4017 | | 0,88 | |
| 92,36 | 84,67 | 18,09 | 0,0530 | 2,7097 | | 0,69 | |
| 97,55 | 62,89 | 18,09 | 0,0530 | 3,0715 | | 0,48 | |
| 43,57 | 67,11 | 18,09 | 0,0530 | 5,1232 | | 0,54 | |
| 56,19 | 62,37 | 18,09 | 0,0530 | 4,6328 | | 0,32 | |
| 45,83 | 56,20 | 18,09 | 0,0530 | 5,7958 | | 0,83 | |
| 55,30 | 56,20 | 18,09 | 0,0530 | 5,0668 | | 0,51 | |
| 46,78 | 56,20 | 18,09 | 0,0530 | 5,7136 | | 0,79 | |
| 52,16 | 56,20 | 18,09 | 0,0530 | 5,2874 | | 0,61 | |
| 45,04 | 73,34 | 18,09 | 0,0530 | 4,6428 | | 0,32 | |
| 50,70 | 75,78 | 18,09 | 0,0530 | 4,2264 | | 0,13 | |
| 52,44 | 77,07 | 18,09 | 0,0530 | 4,0891 | | 0,06 | |
| 54,87 | 80,46 | 18,09 | 0,0530 | 3,8494 | | 0,06 | |
| 50,35 | 93,05 | 18,09 | 0,0530 | 3,5594 | | 0,21 | |
| 50,02 | 93,05 | 18,09 | 0,0530 | 3,5706 | | 0,21 | |
| 48,30 | 79,14 | 18,09 | 0,0530 | 4,1817 | | 0,10 | |
| 86,09 | 95,31 | 18,09 | 0,0530 | 2,6281 | | 0,74 | |
| 53,55 | 80,83 | 18,09 | 0,0530 | 3,8868 | | 0,04 | |
| 45,80 | 75,75 | 18,09 | 0,0530 | 4,4708 | | 0,24 | |
| 43,85 | 101,47 | 18,09 | 0,0530 | 3,4969 | | 0,25 | |
| 70,89 | 101,47 | 18,09 | 0,0530 | 2,8026 | | 0,64 | |
| 68,55 | 101,47 | 18,09 | 0,0530 | 2,8516 | | 0,61 | |
| 45,80 | 78,28 | 18,09 | 0,0530 | 4,3418 | | 0,18 | |
| 102,09 | 102,09 | 18,09 | 0,0530 | 2,2717 | | 0,96 | |

Tabla 76 Resultado del ajuste del tiempo de adelantamiento de la configuración 10L



En total para lograr calibrar esta configuración fueron necesarias 30 replicaciones y la observación de 25 maniobras de adelantamientos. El tiempo de viaje obtenido fue de 1383,47 s con una velocidad de circulación media de 18,09 (km/h), una longitud de 53,01 metros que genera un tiempo de adelantamiento medio de 3,9731 s.

Los resultados de la Tabla 75 presenta para el tiempo de viaje un RMSE del 0,47 y un GEH de 0,02 respecto a los valores a calibrar, en el caso, de la calibración del tiempo de adelantamiento se ha obtenido un RMSE de 1 y un GEH de 0,43. Cumpliendo la calibración con un error menor al 5% y un GEH menor a 5.

Por último, se han ingresado los valores obtenidos del tiempo de viaje y tiempo de adelantamiento de todas las replicaciones en el programa STATGRAPHICS para conocer si existen diferencias significativas entre los resultados modelos y observados en campo.

| DATO | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|----------|----------------|----------------|
| Modelado | 15 | 8,3333 |
| Real | 1 | 11,0 |

Estadístico = 0,357143 Valor-P = 0,550097

Tabla 77 Prueba de Kruskal-Wallis de calibración del tiempo de viaje de la configuración 10L

Mediante el análisis estadístico se obtuvo que la muestra obtenida no presenta normalidad, por esto, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 7,17785E-7 | 1 | 7,17785E-7 | 0,00 | 0,9993 |
| Intra grupos | 25,2432 | 24 | 1,0518 | | |
| Total (Corr.) | 25,2432 | 25 | | | |

Tabla 78 Tabla ANOVA de calibración del tiempo de adelantamiento configuración 10L

La razón-F, que en este caso es igual a 6,82435E-7, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de tiempo de adelantamiento entre un nivel de dato (observado y modelado) y otro, con un nivel del 5% de significación.

El resultado general de todas las calibraciones se presenta en el apartado 6.6.1

6.2. Validación del modelo de microsimulación

Los resultados de la aplicación de la metodología explicada en el apartado 5.5 “Metodología de validación del modelo” se presentarán a continuación separada por tipo de configuración



6.2.1. Validación configuración individual

El ciclista individual fue validado para un día festivo con la demanda correspondiente a este día (ver Tabla 40). Se ingresó en el programa una longitud de 1,7 metros y una velocidad de 31,02 (km/h). Los resultados del proceso de validación son los siguientes:

| Iteración | Longitud (m) | Velocidad ingresada | Replicaciones | Velocidad bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE |
|-----------|--------------|---------------------|-----------------|----------------------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 1,7 | 31,02 | 1 | 30,98 | 807,79 | 0,00 | 0,00 | 0,1 |
| | | | 2 | 30,99 | 807,64 | 0,00 | 0,01 | |
| | | | 3 | 30,97 | 808,04 | 0,01 | 0,10 | |
| | | | 4 | 30,69 | 815,45 | 0,27 | 59,64 | |
| | | | 5 | 31,02 | 806,74 | 0,03 | 0,97 | |
| | | | 6 | 31,02 | 806,74 | 0,03 | 0,97 | |
| | | | 7 | 30,94 | 808,85 | 0,04 | 1,26 | |
| | | | 8 | 30,98 | 807,87 | 0,01 | 0,02 | |
| | | | 9 | 31,02 | 806,74 | 0,03 | 0,97 | |
| | | | 10 | 30,99 | 807,56 | 0,01 | 0,03 | |
| | | | 11 | 31,00 | 807,35 | 0,01 | 0,14 | |
| | | | 12 | 30,99 | 807,45 | 0,01 | 0,08 | |
| | | | 13 | 30,98 | 807,84 | 0,00 | 0,01 | |
| | | | 14 | 30,96 | 808,36 | 0,02 | 0,40 | |
| | | | 15 | 31,02 | 806,74 | 0,03 | 0,97 | |
| | | | Promedio | 30,98 | 807,83 | 0,04 | 0,01 | 0,10 |

Tabla 79 Validación tiempo de viaje de ciclista individual

El tiempo de viaje obtenido fue de 807,83 s con una velocidad de circulación media de 30,98 (km/h). Estos resultados presentan un RMSE del 0,1 y un GEH de 0,004 respecto a los valores a obtenidos en campo cumpliendo con un error menor al 5% y un GEH menor a 5. Además, se obtuvo que no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos en campo y los validados.

6.2.2. Validación configuración dos en paralelo

El pelotón de dos en paralelo (2F) fue validado para un día festivo con la demanda correspondiente a este día (ver Tabla 40). Se ingresó en el programa una longitud de 1,7 metros y una velocidad de 23,97 (km/h). Los resultados del proceso de validación son los siguientes:

| Iteración | Longitud (m) | Velocidad ingresada | Replicaciones | Velocidad bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE |
|-----------|--------------|---------------------|---------------|----------------------------|---------------------|--------|----------|------|
| 1 | 1,7 | 23,97 | 1 | 23,96 | 1.044,55 | 0,0139 | 0,20 | 0,21 |
| | | | 2 | 23,97 | 1.044,02 | 0,0025 | 0,01 | |
| | | | 3 | 23,97 | 1.044,01 | 0,0028 | 0,01 | |
| | | | 4 | 23,93 | 1.045,75 | 0,0510 | 2,72 | |
| | | | 5 | 23,97 | 1.044,01 | 0,0028 | 0,01 | |
| | | | 6 | 23,97 | 1.044,01 | 0,0028 | 0,01 | |
| | | | 7 | 23,97 | 1.044,01 | 0,0028 | 0,01 | |
| | | | 8 | 23,97 | 1.044,01 | 0,0028 | 0,01 | |
| | | | 9 | 23,97 | 1.044,01 | 0,0028 | 0,01 | |
| | | | 10 | 23,94 | 1.045,13 | 0,0318 | 1,06 | |
| | | | 11 | 23,97 | 1.044,01 | 0,0028 | 0,01 | |
| | | | 12 | 23,94 | 1.045,4 | 0,0402 | 1,68 | |
| | | | 13 | 23,97 | 1.044,1 | 0,0013 | 0,00 | |
| | | | 14 | 23,97 | 1.044,01 | 0,0028 | 0,01 | |



| Iteración | Longitud (m) | Velocidad ingresada | Replicaciones | Velocidad bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE |
|-----------|--------------|---------------------|-----------------|----------------------------|---------------------|---------------|-------------|-------------|
| | | | 15 | 23,97 | 1.044,05 | 0,0016 | 0,00 | |
| | | | Promedio | 23,96 | 1044,31 | 0,0110 | 0,04 | 0,21 |

Tabla 80 Validación tiempo de viaje de ciclista dos en paralelo

El tiempo de viaje obtenido fue de 1.044,31 segundos con una velocidad de circulación media de 23,96 (km/h). Estos resultados presentan un RMSE del 0,21 y un GEH de 0,011 respecto a los valores a obtenidos en campo cumpliendo con un error menor al 5% y un GEH menor a 5. Además, se obtuvo que no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos en campo y los validados.

6.2.3. Validación configuración dos en línea

El pelotón de dos en línea (2F) fue validado para un día festivo con la demanda correspondiente a este día (ver Tabla 40). Se ingresó en el programa una longitud de 24,47 metros y una velocidad de 22,08 (km/h). Los resultados del proceso de validación son los siguientes:

| Longitud (m) | Velocidad ingresada | Repl. | Velocidad bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE |
|--------------|---------------------|-----------------|----------------------------|---------------------|--------------|-------------|------|
| 24,47 | 22,08 | 1 | 22,08 | 1.133,37 | 0,032 | 1,16 | 0,52 |
| | | 2 | 22,08 | 1.133,37 | 0,032 | 1,16 | |
| | | 3 | 22,08 | 1.133,37 | 0,032 | 1,16 | |
| | | 4 | 22,08 | 1.133,37 | 0,032 | 1,16 | |
| | | 5 | 22,08 | 1.133,60 | 0,025 | 0,72 | |
| | | 6 | 22,02 | 1.136,25 | 0,053 | 3,25 | |
| | | 7 | 22,08 | 1.133,40 | 0,031 | 1,10 | |
| | | 8 | 22,06 | 1.134,23 | 0,006 | 0,05 | |
| | | 9 | 22,08 | 1.133,37 | 0,032 | 1,16 | |
| | | 10 | 22,08 | 1.133,37 | 0,032 | 1,16 | |
| | | 11 | 22,06 | 1.134,36 | 0,003 | 0,01 | |
| | | 12 | 22,06 | 1.134,25 | 0,006 | 0,04 | |
| | | 13 | 22,05 | 1134,85 | 0,012 | 0,16 | |
| | | 14 | 22,08 | 1.133,37 | 0,032 | 1,16 | |
| | | 15 | 22,03 | 1.136,07 | 0,048 | 2,63 | |
| | | Promedio | 22,07 | 1.133,93 | 0,027 | 0,27 | |

Tabla 81 Validación tiempo de viaje de pelotón 2L

El tiempo de viaje obtenido fue de 1.133,93 s con una velocidad de circulación media de 22,07 (km/h). Estos resultados presentan un RMSE del 0,52 y un GEH de 0,027 respecto a los valores a obtenidos en campo cumpliendo con un error menor al 5% y un GEH menor a 5. Además, se obtuvo que no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos en campo y los validados para los tiempos de viaje.

| Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón (km/h) | largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | Ta medio (s) | GEH | RMSE |
|----------|----------|--------------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| 41,85 | 64,22 | 22,07 | 0,02447 | 2,85 | 1,96 | 0,56 | 0,49 |
| 46,43 | 82,50 | 22,07 | 0,02447 | 2,08 | | 0,07 | |
| 60,71 | 60,71 | 22,07 | 0,02447 | 2,28 | | 0,20 | |
| 45,32 | 80,17 | 22,07 | 0,02447 | 2,17 | | 0,13 | |
| 65,00 | 87,98 | 22,07 | 0,02447 | 1,62 | | 0,27 | |
| 40,78 | 67,37 | 22,07 | 0,02447 | 2,75 | | 0,50 | |
| 50,85 | 54,58 | 22,07 | 0,02447 | 2,87 | | 0,57 | |
| 67,69 | 78,58 | 22,07 | 0,02447 | 1,72 | | 0,19 | |
| 63,05 | 73,73 | 22,07 | 0,02447 | 1,90 | | 0,06 | |



| Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón (km/h) | largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | Ta medio (s) | GEH | RMSE |
|----------|----------|--------------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| 48,18 | 87,33 | 22,07 | 0,02447 | 1,93 | | 0,04 | |
| 51,82 | 64,15 | 22,07 | 0,02447 | 2,45 | | 0,32 | |
| 47,91 | 86,66 | 22,07 | 0,02447 | 1,95 | | 0,02 | |
| 41,83 | 70,05 | 22,07 | 0,02447 | 2,60 | | 0,41 | |
| 57,79 | 70,70 | 22,07 | 0,02447 | 2,09 | | 0,07 | |
| 58,07 | 75,14 | 22,07 | 0,02447 | 1,98 | | 0,00 | |
| 57,17 | 71,50 | 22,07 | 0,02447 | 2,08 | | 0,07 | |
| 94,21 | 94,21 | 22,07 | 0,02447 | 1,22 | | 0,60 | |
| 86,34 | 93,60 | 22,07 | 0,02447 | 1,30 | | 0,54 | |
| 69,61 | 83,34 | 22,07 | 0,02447 | 1,62 | | 0,27 | |
| 41,53 | 69,04 | 22,07 | 0,02447 | 2,65 | | 0,44 | |
| 97,48 | 97,48 | 22,07 | 0,02447 | 1,17 | | 0,65 | |
| 92,04 | 92,04 | 22,07 | 0,02447 | 1,26 | | 0,57 | |
| 47,31 | 83,74 | 22,07 | 0,02447 | 2,03 | | 0,03 | |
| 44,85 | 73,18 | 22,07 | 0,02447 | 2,38 | | 0,27 | |
| 48,51 | 84,71 | 22,07 | 0,02447 | 1,98 | | 0,00 | |
| 49,02 | 87,10 | 22,07 | 0,02447 | 1,92 | | 0,05 | |
| 56,36 | 81,88 | 22,07 | 0,02447 | 1,87 | | 0,08 | |
| 89,34 | 89,34 | 22,07 | 0,02447 | 1,31 | | 0,52 | |
| 85,56 | 85,56 | 22,07 | 0,02447 | 1,39 | | 0,46 | |
| 80,98 | 80,55 | 22,07 | 0,02447 | 1,50 | | 0,37 | |

Tabla 82 Validación del tiempo de adelantamiento del configuración 2L

En el caso de los tiempos de adelantamientos se obtuvo un RMSE de 0,49 y un GEH de 0,28 y sin diferencias significativas entre los valores observados en campos y los validados.

6.2.4. Validación configuración 1+2

El pelotón 1+2 fue validado para un día festivo con la demanda correspondiente a este día (ver Tabla 40). Se ingresó en el programa una longitud de 18,00 metros y una velocidad de 22,55 (km/h). Los resultados del proceso de validación son los siguientes:

| Longitud (m) | Velocidad ingresada | Replicación | Velocidad bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE |
|--------------|---------------------|-----------------|----------------------------|---------------------|--------------|-------------|------|
| 18,00 | 22,55 | 1 | 22,55 | 1.109,75 | 0,013 | 0,19 | 0,04 |
| | | 2 | 22,55 | 1.109,75 | 0,013 | 0,19 | |
| | | 3 | 22,50 | 1.112,37 | 0,066 | 4,79 | |
| | | 4 | 22,55 | 1.109,75 | 0,013 | 0,19 | |
| | | 5 | 22,55 | 1.109,75 | 0,013 | 0,19 | |
| | | 6 | 22,54 | 1.110,47 | 0,009 | 0,08 | |
| | | 7 | 22,55 | 1.109,80 | 0,011 | 0,15 | |
| | | 8 | 22,55 | 1.109,75 | 0,013 | 0,19 | |
| | | 9 | 22,55 | 1.109,75 | 0,013 | 0,19 | |
| | | 10 | 22,55 | 1.109,75 | 0,013 | 0,19 | |
| | | 11 | 22,53 | 1.110,51 | 0,010 | 0,11 | |
| | | 12 | 22,55 | 1.109,75 | 0,013 | 0,19 | |
| | | 13 | 22,54 | 1.110,36 | 0,005 | 0,03 | |
| | | 14 | 22,54 | 1.110,25 | 0,002 | 0,00 | |
| | | 15 | 22,53 | 1.110,58 | 0,012 | 0,16 | |
| | | Promedio | 22,54 | 1.110,14 | 0,015 | 0,00 | |

Tabla 83 Validación tiempo de viaje de pelotón 1+2



El tiempo de viaje obtenido fue de 1.110,14 s con una velocidad de circulación media de 22,54 (km/h). Estos resultados presentan un RMSE del 0,04 y un GEH de 0,015 respecto a los valores a obtenidos en campo cumpliendo con un error menor al 5% y un GEH menor a 5. Además, se obtuvo que no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos en campo y los validados para los tiempos de viaje.

| Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón (km/h) | largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|----------|----------|--------------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| 52,67 | 67,42 | 22,54 | 0,01800 | 1,7279 | 1,69 | 0,00 | 0,37 |
| 65,66 | 70,83 | 22,54 | 0,01800 | 1,4179 | | 0,25 | |
| 43,38 | 66,96 | 22,54 | 0,01800 | 1,9861 | | 0,19 | |
| 57,82 | 69,38 | 22,54 | 0,01800 | 1,5781 | | 0,12 | |
| 43,48 | 66,85 | 22,54 | 0,01800 | 1,9862 | | 0,19 | |
| 53,89 | 53,89 | 22,54 | 0,01800 | 2,0670 | | 0,25 | |
| 53,89 | 53,89 | 22,54 | 0,01800 | 2,0670 | | 0,25 | |
| 46,85 | 70,75 | 22,54 | 0,01800 | 1,7870 | | 0,05 | |
| 57,80 | 75,12 | 22,54 | 0,01800 | 1,4755 | | 0,20 | |
| 78,96 | 78,99 | 22,54 | 0,01800 | 1,1483 | | 0,48 | |
| 66,76 | 77,88 | 22,54 | 0,01800 | 1,3017 | | 0,35 | |
| 35,42 | 59,57 | 22,54 | 0,01800 | 2,5967 | | 0,59 | |
| 44,91 | 67,90 | 22,54 | 0,01800 | 1,9134 | | 0,14 | |
| 75,93 | 77,09 | 22,54 | 0,01800 | 1,2007 | | 0,44 | |
| 47,57 | 72,59 | 22,54 | 0,01800 | 1,7263 | | 0,00 | |
| 75,19 | 87,03 | 22,54 | 0,01800 | 1,1064 | | 0,52 | |
| 60,12 | 65,42 | 22,54 | 0,01800 | 1,6108 | | 0,09 | |
| 47,41 | 71,14 | 22,54 | 0,01800 | 1,7639 | | 0,03 | |
| 50,87 | 75,42 | 22,54 | 0,01800 | 1,5958 | | 0,10 | |

Tabla 84 Validación del tiempo de adelantamiento del configuración 1+2

En el caso de los tiempos de adelantamientos se obtuvo un RMSE de 0,37 y un GEH de 0,2219 y sin diferencias significativas entre los valores observados en campos y los validados.

6.2.5. Validación configuración 2+1

El pelotón 2+1 fue validado para un día festivo con la demanda correspondiente a este día (ver Tabla 40). Se ingresó en el programa una longitud de 15,06 metros y una velocidad de 27,45 (km/h). Los resultados del proceso de validación son los siguientes:

| Longitud (m) | Velocidad ingresada | Replicación | Velocidad bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE |
|--------------|---------------------|-------------|----------------------------|---------------------|-------|----------|------|
| 15,06 | 27,45 | 1 | 27,45 | 911,66 | 0,006 | 0,03 | 0,06 |
| | | 2 | 27,45 | 911,66 | 0,006 | 0,03 | |
| | | 3 | 27,45 | 911,66 | 0,006 | 0,03 | |
| | | 4 | 27,45 | 911,66 | 0,006 | 0,03 | |
| | | 5 | 27,43 | 912,21 | 0,013 | 0,15 | |
| | | 6 | 27,45 | 911,66 | 0,006 | 0,03 | |
| | | 7 | 27,45 | 911,66 | 0,006 | 0,03 | |
| | | 8 | 27,42 | 912,66 | 0,028 | 0,70 | |
| | | 9 | 27,45 | 911,66 | 0,006 | 0,03 | |
| | | 10 | 27,45 | 911,69 | 0,005 | 0,02 | |
| | | 11 | 27,45 | 911,66 | 0,006 | 0,03 | |
| | | 12 | 27,45 | 911,66 | 0,006 | 0,03 | |
| | | 13 | 27,43 | 912,41 | 0,019 | 0,34 | |
| | | 14 | 27,45 | 911,79 | 0,001 | 0,00 | |



| Longitud (m) | Velocidad ingresada | Replicación | Velocidad bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE |
|--------------|---------------------|-----------------|----------------------------|---------------------|--------------|-------------|------|
| | | 15 | 27,45 | 911,73 | 0,003 | 0,01 | |
| | | Promedio | 27,44 | 911,89 | 0,008 | 0,00 | |

Tabla 85 Validación tiempo de viaje de pelotón 2+1

El tiempo de viaje obtenido fue de 911,89 s con una velocidad de circulación media de 27,44 (km/h). Estos resultados presentan un RMSE del 0,06 y un GEH de 0,008 respecto a los valores a obtenidos en campo cumpliendo con un error menor al 5% y un GEH menor a 5. Además, se obtuvo que no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos en campo y los validados para los tiempos de viaje.

| Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón (km/h) | largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|----------|----------|--------------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| 47,01 | 68,29 | 27,44 | 0,01506 | 1,79 | 1,15 | 0,51 | 0,32 |
| 85,30 | 85,30 | 27,44 | 0,01506 | 0,94 | | 0,23 | |
| 75,33 | 76,83 | 27,44 | 0,01506 | 1,11 | | 0,06 | |
| 51,87 | 76,20 | 27,44 | 0,01506 | 1,48 | | 0,27 | |
| 90,38 | 90,38 | 27,44 | 0,01506 | 0,86 | | 0,31 | |
| 77,85 | 67,19 | 27,44 | 0,01506 | 1,20 | | 0,03 | |
| 69,31 | 80,50 | 27,44 | 0,01506 | 1,14 | | 0,03 | |
| 90,50 | 90,50 | 27,44 | 0,01506 | 0,86 | | 0,31 | |
| 62,27 | 84,74 | 27,44 | 0,01506 | 1,18 | | 0,00 | |
| 87,95 | 87,95 | 27,44 | 0,01506 | 0,90 | | 0,27 | |
| 93,86 | 93,86 | 27,44 | 0,01506 | 0,82 | | 0,36 | |
| 89,25 | 89,25 | 27,44 | 0,01506 | 0,88 | | 0,29 | |
| 89,25 | 89,25 | 27,44 | 0,01506 | 0,88 | | 0,29 | |
| 89,91 | 89,91 | 27,44 | 0,01506 | 0,87 | | 0,30 | |
| 52,91 | 67,43 | 27,44 | 0,01506 | 1,66 | | 0,41 | |
| 58,35 | 63,97 | 27,44 | 0,01506 | 1,61 | | 0,37 | |
| 50,81 | 74,17 | 27,44 | 0,01506 | 1,55 | | 0,32 | |
| 74,65 | 87,39 | 27,44 | 0,01506 | 1,01 | | 0,15 | |

Tabla 86 Validación del tiempo de adelantamiento del configuración 2+1

En el caso de los tiempos de adelantamientos se obtuvo un RMSE de 0,32 y un GEH de 0,271 y sin diferencias significativas entre los valores observados en campos y los validados.

6.2.6. Validación configuración cuatro en paralelo

El pelotón cuatro en paralelo (4F) fue validado para un día festivo con la demanda correspondiente a este día (ver Tabla 40). Se ingresó en el programa una longitud de 17,90 metros y una velocidad de 26,84 (km/h). Los resultados del proceso de validación son los siguientes:

| Longitud (m) | Velocidad ingresada | Replicación | Velocidad bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE |
|--------------|---------------------|-------------|----------------------------|---------------------|-------|----------|-------|
| 17,90 | 26,84 | 1 | 26,80 | 933,83 | 0,031 | 0,91 | 0,005 |
| | | 2 | 26,84 | 932,38 | 0,016 | 0,25 | |
| | | 3 | 26,84 | 932,38 | 0,016 | 0,25 | |
| | | 4 | 26,84 | 932,45 | 0,014 | 0,18 | |
| | | 5 | 26,82 | 933,23 | 0,012 | 0,13 | |
| | | 6 | 26,84 | 932,38 | 0,016 | 0,25 | |
| | | 7 | 26,84 | 932,38 | 0,016 | 0,25 | |
| | | 8 | 26,84 | 932,38 | 0,016 | 0,25 | |
| | | 9 | 26,84 | 932,38 | 0,016 | 0,25 | |



| Longitud (m) | Velocidad ingresada | Replicación | Velocidad bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE |
|--------------|---------------------|-----------------|----------------------------|---------------------|--------------|--------------|------|
| | | 10 | 26,83 | 932,80 | 0,002 | 0,01 | |
| | | 11 | 26,83 | 932,58 | 0,010 | 0,09 | |
| | | 12 | 26,81 | 933,59 | 0,023 | 0,51 | |
| | | 13 | 26,84 | 932,38 | 0,016 | 0,25 | |
| | | 14 | 26,80 | 933,90 | 0,034 | 1,05 | |
| | | 15 | 26,84 | 932,38 | 0,016 | 0,25 | |
| | | Promedio | 26,83 | 932,88 | 0,017 | 0,000 | |

Tabla 87 Validación tiempo de viaje de pelotón 4F

El tiempo de viaje obtenido fue de 932,88 s con una velocidad de circulación media de 26,83 (km/h). Estos resultados presentan un RMSE del 0,005 y un GEH de 0,017 respecto a los valores a obtenidos en campo cumpliendo con un error menor al 5% y un GEH menor a 5. Además, se obtuvo que no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos en campo y los validados para los tiempos de viaje.

| Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón (km/h) | largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|----------|----------|--------------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| 53,75 | 66,74 | 26,83 | 0,01790 | 1,93 | 1,3889 | 0,43 | 0,47 |
| 53,34 | 56,33 | 26,83 | 0,01790 | 2,30 | | 0,68 | |
| 55,34 | 65,05 | 26,83 | 0,01790 | 1,93 | | 0,43 | |
| 94,43 | 94,43 | 26,83 | 0,01790 | 0,95 | | 0,39 | |
| 64,26 | 76,73 | 26,83 | 0,01790 | 1,48 | | 0,08 | |
| 94,04 | 94,04 | 26,83 | 0,01790 | 0,96 | | 0,39 | |
| 94,04 | 94,04 | 26,83 | 0,01790 | 0,96 | | 0,39 | |
| 94,04 | 94,04 | 26,83 | 0,01790 | 0,96 | | 0,39 | |
| 50,46 | 85,69 | 26,83 | 0,01790 | 1,56 | | 0,15 | |
| 48,37 | 81,76 | 26,83 | 0,01790 | 1,69 | | 0,25 | |
| 92,77 | 92,77 | 26,83 | 0,01790 | 0,98 | | 0,37 | |
| 92,77 | 92,77 | 26,83 | 0,01790 | 0,98 | | 0,37 | |

Tabla 88 Validación del tiempo de adelantamiento del configuración 4F

En el caso de los tiempos de adelantamientos se obtuvo un RMSE de 0,47 y un GEH de 0,36 y sin diferencias significativas entre los valores observados en campos y los validados.

6.2.7. Validación configuración cuatro en línea

El pelotón cuatro en línea (4L) fue validado para un día festivo con la demanda correspondiente a este día (ver Tabla 40). Se ingresó en el programa una longitud de 22,53 metros y una velocidad de 21,69 (km/h). Los resultados del proceso de validación son los siguientes:

| Longitud (m) | Velocidad ingresada | Replicación | Velocidad bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE |
|--------------|---------------------|-------------|----------------------------|---------------------|-------|----------|------|
| 22,53 | 21,69 | 1 | 21,69 | 1.153,75 | 0,007 | 0,06 | 0,11 |
| | | 2 | 21,67 | 1.154,70 | 0,02 | 0,49 | |
| | | 3 | 21,69 | 1.153,75 | 0,01 | 0,06 | |
| | | 4 | 21,64 | 1.156,32 | 0,07 | 5,38 | |
| | | 5 | 21,69 | 1.153,75 | 0,01 | 0,06 | |
| | | 6 | 21,69 | 1.153,75 | 0,01 | 0,06 | |
| | | 7 | 21,69 | 1.153,75 | 0,01 | 0,06 | |
| | | 8 | 21,66 | 1.155,58 | 0,05 | 2,50 | |
| | | 9 | 21,69 | 1.153,75 | 0,01 | 0,06 | |
| | | 10 | 21,69 | 1.153,75 | 0,01 | 0,06 | |



| Longitud (m) | Velocidad ingresada | Replicación | Velocidad bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE |
|--------------|---------------------|-----------------|----------------------------|---------------------|-------------|-------------|------|
| | | 11 | 21,67 | 1.154,71 | 0,02 | 0,50 | |
| | | 12 | 21,69 | 1.153,75 | 0,01 | 0,06 | |
| | | 13 | 21,69 | 1.153,96 | 0,00 | 0,00 | |
| | | 14 | 21,67 | 1.154,67 | 0,02 | 0,45 | |
| | | 15 | 21,69 | 1.153,75 | 0,01 | 0,06 | |
| | | Promedio | 21,68 | 1.154,44 | 0,02 | 0,01 | |

Tabla 89 Validación tiempo de viaje de pelotón 4L.

El tiempo de viaje obtenido fue de 1.154,44 s con una velocidad de circulación media de 21,68 (km/h). Estos resultados presentan un RMSE del 0,11 y un GEH de 0,002 respecto a los valores a obtenidos en campo cumpliendo con un error menor al 5% y un GEH menor a 5. Además, se obtuvo que no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos en campo y los validados para los tiempos de viaje.

| Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón (km/h) | largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|----------|----------|--------------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| 51,07 | 65,44 | 21,68 | 0,02253 | 2,2175 | 2,1040 | 0,08 | 0,28 |
| 56,16 | 68,08 | 21,68 | 0,02253 | 2,0053 | | 0,07 | |
| 74,65 | 70,20 | 21,68 | 0,02253 | 1,5982 | | 0,37 | |
| 47,94 | 59,98 | 21,68 | 0,02253 | 2,5123 | | 0,27 | |
| 55,68 | 78,34 | 21,68 | 0,02253 | 1,7891 | | 0,22 | |
| 53,14 | 65,11 | 21,68 | 0,02253 | 2,1659 | | 0,05 | |
| 48,56 | 67,39 | 21,68 | 0,02253 | 2,2344 | | 0,09 | |
| 55,43 | 58,18 | 21,68 | 0,02253 | 2,3091 | | 0,14 | |

Tabla 90 Validación del tiempo de adelantamiento del configuración 4L.

En el caso de los tiempos de adelantamientos se obtuvo un RMSE de 0,28 y un GEH de 0,161 y sin diferencias significativas entre los valores observados en campos y los validados.

6.2.8. Validación configuración diez en línea

El pelotón diez en línea (10L) fue validado para un día laboral con la demanda correspondiente a este día (ver Tabla 40). Se ingresó en el programa una longitud de 53,01 metros y una velocidad de 18,10 (km/h). Los resultados del proceso de validación son los siguientes:

| Longitud (m) | Velocidad ingresada | Replicación | Velocidad bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE |
|--------------|---------------------|-------------|----------------------------|---------------------|-------|----------|------|
| 53,01 | 18,10 | 1 | 18,10 | 1.382,59 | 0,024 | 0,77 | 1,04 |
| | | 2 | 18,09 | 1.383,46 | 0,000 | 0,00 | |
| | | 3 | 18,10 | 1.382,59 | 0,024 | 0,77 | |
| | | 4 | 18,10 | 1.382,59 | 0,024 | 0,77 | |
| | | 5 | 18,08 | 1.383,83 | 0,010 | 0,13 | |
| | | 6 | 18,10 | 1.382,59 | 0,024 | 0,77 | |
| | | 7 | 18,04 | 1.386,97 | 0,094 | 12,25 | |
| | | 8 | 18,10 | 1.382,59 | 0,024 | 0,77 | |
| | | 9 | 18,07 | 1.384,99 | 0,041 | 2,31 | |
| | | 10 | 18,09 | 1.383,09 | 0,010 | 0,14 | |
| | | 11 | 18,09 | 1.383,30 | 0,005 | 0,03 | |
| | | 12 | 18,08 | 1383,90 | 0,012 | 0,18 | |
| | | 13 | 18,08 | 1.384,07 | 0,016 | 0,36 | |
| | | 14 | 18,10 | 1.382,59 | 0,024 | 0,77 | |
| | | 15 | 18,10 | 1.382,59 | 0,024 | 0,77 | |



| Longitud (m) | Velocidad ingresada | Replicación | Velocidad bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE |
|--------------|---------------------|-------------|----------------------------|---------------------|-------|----------|------|
| | | Promedio | 18,08 | 1.384,04 | 0,024 | 1,08 | |

Tabla 91 Validación tiempo de viaje de pelotón 10L

El tiempo de viaje obtenido fue de 1.154,44 s con una velocidad de circulación media de 18,08 (km/h). Estos resultados presentan un RMSE del 1,08 y un GEH de 0,024 respecto a los valores a obtenidos en campo cumpliendo con un error menor al 5% y un GEH menor a 5. Además, se obtuvo que no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos en campo y los validados para los tiempos de viaje.

| Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón (km/h) | largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|----------|----------|--------------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| 46,11 | 76,94 | 18,08 | 0,05301 | 4,39 | 3,9768 | 0,21 | 0,83 |
| 54,23 | 82,02 | 18,08 | 0,05301 | 3,81 | | 0,08 | |
| 57,95 | 81,53 | 18,08 | 0,05301 | 3,69 | | 0,14 | |
| 92,49 | 92,49 | 18,08 | 0,05301 | 2,56 | | 0,78 | |
| 37,71 | 77,83 | 18,08 | 0,05301 | 4,81 | | 0,40 | |
| 47,34 | 64,36 | 18,08 | 0,05301 | 5,05 | | 0,51 | |
| 51,33 | 64,36 | 18,08 | 0,05301 | 4,80 | | 0,39 | |
| 54,91 | 60,87 | 18,08 | 0,05301 | 4,79 | | 0,39 | |
| 55,27 | 49,03 | 18,08 | 0,05301 | 5,60 | | 0,74 | |
| 43,69 | 85,25 | 18,08 | 0,05301 | 4,11 | | 0,07 | |
| 50,55 | 81,62 | 18,08 | 0,05301 | 3,98 | | 0,00 | |
| 101,47 | 101,47 | 18,08 | 0,05301 | 2,29 | | 0,95 | |
| 94,74 | 96,59 | 18,08 | 0,05301 | 2,46 | | 0,84 | |
| 50,45 | 88,73 | 18,08 | 0,05301 | 3,71 | | 0,14 | |
| 48,79 | 96,59 | 18,08 | 0,05301 | 3,49 | | 0,25 | |
| 59,54 | 96,59 | 18,08 | 0,05301 | 3,18 | | 0,42 | |
| 49,49 | 96,59 | 18,08 | 0,05301 | 3,47 | | 0,26 | |
| 41,46 | 69,39 | 18,08 | 0,05301 | 5,11 | | 0,53 | |
| 43,12 | 68,58 | 18,08 | 0,05301 | 5,05 | | 0,51 | |
| 44,20 | 81,84 | 18,08 | 0,05301 | 4,25 | | 0,14 | |
| 44,20 | 96,40 | 18,08 | 0,05301 | 3,65 | 0,16 | | |
| 41,90 | 88,40 | 18,08 | 0,05301 | 4,05 | 0,04 | | |
| 48,82 | 86,22 | 18,08 | 0,05301 | 3,86 | 0,06 | | |
| 51,35 | 86,22 | 18,08 | 0,05301 | 3,76 | 0,11 | | |
| 76,46 | 69,83 | 18,08 | 0,05301 | 3,47 | 0,26 | | |

Tabla 92 Validación del tiempo de adelantamiento del configuración 4L

En el caso de los tiempos de adelantamientos se obtuvo un RMSE de 0,834 y un GEH de 0,395 y sin diferencias significativas entre los valores observados en campos y los validados.

6.2.9. Validación configuración diez en paralelo

El pelotón diez en paralelo (10F) fue validado para un día laboral con la demanda correspondiente a este día. Se ingresó en el programa una longitud de 29,48 metros y una velocidad de 25,03 (km/h). Los resultados del proceso de validación son los siguientes:

| Longitud (m) | Velocidad ingresada | Replicación | Velocidad bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE |
|--------------|---------------------|-------------|----------------------------|---------------------|-------|----------|------|
| 29,48 | 25,03 | 1 | 25,02 | 1.000,20 | 0,013 | 0,17 | 0,04 |
| | | 2 | 25,00 | 1.000,97 | 0,011 | 0,13 | |
| | | 3 | 24,98 | 1.001,73 | 0,035 | 1,25 | |



| Longitud (m) | Velocidad ingresada | Replicación | Velocidad bicicleta (km/h) | Tiempo de viaje (s) | GEH | Varianza | RMSE |
|--------------|---------------------|-----------------|----------------------------|---------------------|--------------|-------------|------|
| | | 4 | 25,02 | 1.000,31 | 0,010 | 0,09 | |
| | | 5 | 25,02 | 1.000,32 | 0,009 | 0,09 | |
| | | 6 | 25,01 | 1.000,41 | 0,006 | 0,04 | |
| | | 7 | 25,02 | 1.000,20 | 0,013 | 0,17 | |
| | | 8 | 24,95 | 1.002,88 | 0,072 | 5,14 | |
| | | 9 | 25,00 | 1.000,91 | 0,009 | 0,09 | |
| | | 10 | 25,02 | 1.000,23 | 0,012 | 0,15 | |
| | | 11 | 25,02 | 1.000,33 | 0,009 | 0,08 | |
| | | 12 | 25,02 | 1.000,20 | 0,013 | 0,17 | |
| | | 13 | 25,02 | 1.000,31 | 0,010 | 0,09 | |
| | | 14 | 25,02 | 1.000,20 | 0,013 | 0,17 | |
| | | 15 | 25,02 | 1.000,20 | 0,013 | 0,17 | |
| | | Promedio | 25,01 | 1.000,57 | 0,017 | 0,00 | |

Tabla 93 Validación tiempo de viaje de pelotón 10F

El tiempo de viaje obtenido fue de 1.000,57 s con una velocidad de circulación media de 25,01 (km/h). Estos resultados presentan un RMSE del 0,04 y un GEH de 0,017 respecto a los valores a obtenidos en campo cumpliendo con un error menor al 5% y un GEH menor a 5. Además, se obtuvo que no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos en campo y los validados para los tiempos de viaje.

| Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón (km/h) | largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|----------|----------|--------------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| 52,73 | 71,71 | 25,01 | 0,02948 | 2,85 | | 0,52 | |
| 76,95 | 54,13 | 25,01 | 0,02948 | 2,62 | | 0,38 | |
| 53,87 | 91,50 | 25,01 | 0,02948 | 2,23 | | 0,13 | |
| 95,99 | 95,99 | 25,01 | 0,02948 | 1,50 | | 0,40 | |
| 106,06 | 106,06 | 25,01 | 0,02948 | 1,31 | | 0,56 | |
| 102,03 | 102,03 | 25,01 | 0,02948 | 1,38 | | 0,50 | |
| 94,62 | 94,62 | 25,01 | 0,02948 | 1,52 | | 0,38 | |
| 94,62 | 94,62 | 25,01 | 0,02948 | 1,52 | | 0,38 | |
| 50,74 | 87,37 | 25,01 | 0,02948 | 2,41 | | 0,25 | |
| 61,61 | 85,99 | 25,01 | 0,02948 | 2,18 | | 0,10 | |
| 58,66 | 92,22 | 25,01 | 0,02948 | 2,10 | | 0,05 | |
| 68,20 | 90,94 | 25,01 | 0,02948 | 1,95 | 2,01 | 0,06 | 0,45 |
| 70,84 | 69,71 | 25,01 | 0,02948 | 2,34 | | 0,21 | |
| 73,10 | 93,03 | 25,01 | 0,02948 | 1,83 | | 0,15 | |
| 48,69 | 86,89 | 25,01 | 0,02948 | 2,48 | | 0,30 | |
| 60,20 | 96,19 | 25,01 | 0,02948 | 2,00 | | 0,03 | |
| 51,13 | 86,73 | 25,01 | 0,02948 | 2,42 | | 0,26 | |
| 50,07 | 87,63 | 25,01 | 0,02948 | 2,42 | | 0,26 | |
| 71,00 | 92,77 | 25,01 | 0,02948 | 1,87 | | 0,12 | |
| 88,49 | 103,26 | 25,01 | 0,02948 | 1,50 | | 0,40 | |
| 59,39 | 82,30 | 25,01 | 0,02948 | 2,32 | | 0,19 | |
| 100,48 | 100,48 | 25,01 | 0,02948 | 1,41 | | 0,48 | |

Tabla 94 Validación del tiempo de adelantamiento del configuración 4F

En el caso de los tiempos de adelantamientos se obtuvo un RMSE de 0,4577 y un GEH de 0,274 y sin diferencias significativas entre los valores observados en campos y los validados.

Los resultados generales de la validación se encuentran en el apartado 6.6.2



6.3. Escenarios modelados

En este apartado se mostrarán y analizarán todos los resultados obtenidos para diferentes escenarios. Se analizará el escenario base para diferentes intensidades de tráfico y variando la presencia bicicletas. Modelados los dos escenarios se procederá a analizar si es necesaria una mejora en el tramo de estudio mediante la metodología del HCM (2016). En caso de que no se permita evaluar la funcionalidad del tramo de estudio de forma correcta debido a la presencia de bicicletas se procederá a analizar las medidas de desempeño más adecuadas.

6.3.1. Escenario base con presencia ciclista

El escenario base considera la presencia de vehículos a motor y los pelotones de bicicletas llamado desde ahora como E1 y será acompañado con un número a medida que se va aumentando la demanda vehicular. A partir de la modelación se obtuvieron los siguientes resultados generales y puntuales (detectores) para el escenario E1-0 (demanda vehicular observada).

| Hora | I ⁴ (veh/h) | V ⁵ (km/h) | D ⁶ (veh/km) | Adelantamientos por vehículo | CO2 (g/km) | Tv ⁷ (seg) | Demora ⁸ (%) | Cola Máxima (veh) |
|--------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------|
| 8:30:00 | 223 | 58,55 | 3,47 | 8,32 | 1.5827,43 | 483,4 | 23,97 | 3,6 |
| 8:45:00 | 236 | 56,40 | 3,73 | 8,76 | 1.5874,98 | 518,03 | 22,85 | 4,47 |
| 9:00:00 | 230 | 55,73 | 3,67 | 8,82 | 1.5823,2 | 523,24 | 22,98 | 4,27 |
| 9:15:00 | 121 | 47,45 | 2,02 | 8,73 | 5.056,72 | 642,81 | 17,25 | 2,4 |
| Base. | 203 | 54,53 | 3,22 | 8,66 | 13.145,58 | 542 | 21,76 | 3,69 |

Tabla 95 Resultados globales del E1-0: Escenario base con presencia de bicicletas.

De la Tabla 95 podemos observar el efecto al ingresar los bicicletas y vehículos a motor en el escenario base (E1-0). La velocidad media de circulación es de 54,53 (km/h), cada vehículo realiza 8,66 adelantamientos en promedio y se emiten 13.145,58 (g/km).

Desde los detectores ubicados en la red podemos obtener la velocidad puntual media, el intervalo entre vehículos y la intensidad para cada detector y replicación. En general se utilizará la media de todas las replicaciones.

| Replicación | D1 ⁹ _Ceste | D2_Ceste | D3_Ceste | D4_Ceste | D5_Ceste |
|-------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 59,23 | 69,23 | 64,26 | 73,71 | 67,69 |
| 2 | 67,61 | 68,73 | 62,37 | 69,26 | 70,27 |
| 3 | 60,90 | 66,46 | 66,61 | 72,50 | 73,68 |
| 4 | 64,16 | 69,34 | 66,63 | 74,92 | 75,42 |
| 5 | 63,11 | 65,17 | 67,11 | 73,93 | 69,58 |
| 6 | 63,03 | 66,16 | 65,44 | 73,04 | 69,35 |
| 7 | 62,09 | 69,12 | 68,26 | 76,60 | 69,84 |
| 8 | 62,43 | 67,31 | 70,52 | 72,25 | 68,40 |
| 9 | 58,39 | 67,17 | 66,51 | 69,78 | 71,46 |
| 10 | 62,82 | 65,03 | 66,78 | 69,75 | 70,05 |

⁴ I: intensidad (veh/h)

⁵ V: velocidad media (km/h)

⁶ D: densidad (veh/km)

⁷ Tv: Tiempo de viaje(s)

⁸ Demora: Tiempo de Demora / Tiempo de Viaje (%)

⁹ D1, D2, D3, D4 y D5: detectores diferenciados por su ubicación



| Replicación | D1 ⁹ _Ceste | D2_Ceste | D3_Ceste | D4_Ceste | D5_Ceste |
|-----------------|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 11 | 63,37 | 70,33 | 69,42 | 74,08 | 66,17 |
| 12 | 65,85 | 70,98 | 64,66 | 67,12 | 72,14 |
| 13 | 63,88 | 69,62 | 71,32 | 72,50 | 67,06 |
| 14 | 66,90 | 70,68 | 69,14 | 73,27 | 71,19 |
| 15 | 60,78 | 69,86 | 68,73 | 72,04 | 73,73 |
| Promedio | 63,01 | 68,35 | 67,23 | 72,40 | 70,32 |

Tabla 96 Velocidades puntuales medias según detector para el escenario E1-0.

De la Tabla 96 podemos observar cómo varía la velocidad dentro del tramo de estudio y si esta se compara con la velocidad media de la sección es ligeramente superior. A continuación, se presenta la cantidad de vehículos en cola y libre observados en cada detector y replicación.

| Replicación | Detector D1_Ceste | | Detector D2_Ceste | | Detector D3_Ceste | | Detector D4_Ceste | | Detector D5_Ceste | |
|-----------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|
| | Cola | Libre |
| 1 | 47 | 136 | 79 | 112 | 83 | 124 | 85 | 130 | 89 | 119 |
| 2 | 33 | 150 | 74 | 121 | 96 | 111 | 90 | 117 | 98 | 113 |
| 3 | 42 | 134 | 68 | 111 | 88 | 112 | 75 | 127 | 96 | 107 |
| 4 | 32 | 129 | 67 | 103 | 61 | 126 | 69 | 123 | 77 | 111 |
| 5 | 63 | 153 | 94 | 125 | 109 | 125 | 113 | 128 | 113 | 126 |
| 6 | 46 | 134 | 83 | 108 | 95 | 113 | 88 | 121 | 108 | 101 |
| 7 | 57 | 152 | 101 | 112 | 106 | 123 | 89 | 140 | 110 | 117 |
| 8 | 56 | 142 | 91 | 109 | 89 | 122 | 78 | 140 | 90 | 124 |
| 9 | 29 | 126 | 59 | 101 | 64 | 112 | 70 | 112 | 72 | 106 |
| 10 | 51 | 150 | 90 | 114 | 106 | 120 | 94 | 135 | 104 | 121 |
| 11 | 56 | 146 | 90 | 120 | 93 | 133 | 102 | 131 | 115 | 112 |
| 12 | 46 | 137 | 81 | 108 | 90 | 110 | 85 | 120 | 82 | 120 |
| 13 | 43 | 130 | 65 | 111 | 70 | 118 | 75 | 117 | 92 | 97 |
| 14 | 46 | 152 | 92 | 115 | 104 | 119 | 96 | 133 | 87 | 138 |
| 15 | 57 | 129 | 83 | 110 | 88 | 122 | 93 | 120 | 81 | 135 |
| Promedio | 47 | 140 | 81 | 112 | 89 | 119 | 87 | 126 | 94 | 116 |

Tabla 97. Vehículos en cola y libre en los diferentes detectores para el escenario E1-0.

La Tabla 97 diferencia entre detector, replicación y si el vehículo se encuentra en cola (intervalo entre vehículos menor a 3 s). además, podemos obtener la intensidad de vehículos que circulan por cada punto. A partir de estas tablas se logra obtener el porcentaje de vehículos en cola respecto al total.

| Replicación | D1_Ceste | D2_Ceste | D3_Ceste | D4_Ceste | D5_Ceste |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 26% | 41% | 40% | 40% | 43% |
| 2 | 18% | 38% | 46% | 43% | 46% |
| 3 | 24% | 38% | 44% | 37% | 47% |
| 4 | 20% | 39% | 33% | 36% | 41% |
| 5 | 29% | 43% | 47% | 47% | 47% |
| 6 | 26% | 43% | 46% | 42% | 52% |
| 7 | 27% | 47% | 46% | 39% | 48% |
| 8 | 28% | 46% | 42% | 36% | 42% |
| 9 | 19% | 37% | 36% | 38% | 40% |
| 10 | 25% | 44% | 47% | 41% | 46% |
| 11 | 28% | 43% | 41% | 44% | 51% |
| 12 | 25% | 43% | 45% | 41% | 41% |
| 13 | 25% | 37% | 37% | 39% | 49% |
| 14 | 23% | 44% | 47% | 42% | 39% |
| 15 | 31% | 43% | 42% | 44% | 38% |
| Promedio | 25% | 42% | 43% | 41% | 45% |



Tabla 98 Porcentaje total de los vehículos en cola.

De la Tabla 98 se evidencia la variación del % de vehículos en colas en diferentes puntos de la red, una vez estimados los porcentajes de vehículos en colas podemos estimar el nivel de servicio de la carretera mediante la aplicación del HCM (2016).

El tramo de estudio corresponde según la clasificación de clase a una carretera de Clase II, que son carreteras donde no es necesario ir a altas velocidades. Al contrario que en la Clase I, son carreteras utilizadas para viajes cortos. Los tramos de clase II son generalmente limitados porque los conductores quieren estar cerca de la velocidad límite permitida, por tanto, en este caso los Niveles de servicio se definen mediante PFFS (porcentaje de vehículos en cola). Los niveles de servicio según los niveles de servicio son los siguientes

| Nivel de servicio | Clase II PTSF (%) |
|-------------------|---------------------------------------|
| A | ≤ 40 |
| B | 40-55 |
| C | 55-70 |
| D | 70-85 |
| E | > 85 |
| F | Excede la capacidad (Vd > 1700 veh/h) |

Tabla 99. Niveles de servicio del HCM 2010

Para estimar el nivel de servicio de cada punto se aplicará la metodología del HCM (2016), utilizando como datos de entrada el porcentaje promedio de vehículos en cola. Esta estimación se puede realizar solo con la información de los detectores ya que en los resultados globales del microsimulador solo se puede obtener la cola máxima de vehículos y la cola media pero no el total de vehículos en cola, por lo tanto, para estimar el porcentaje en cola de toda la red se procederá a estimar el promedio de todos los porcentajes en cola de cada detector. A continuación, se presentan los resultados puntuales y globales de los porcentajes de vehículos en cola.

| Parámetro | D1_Cheste | D2_Cheste | D3_Cheste | D4_Cheste | D5_Cheste | Promedio |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| % de vehículos en cola | 25% | 42% | 43% | 41% | 45% | 39% |
| Nivel de servicio | A | B | B | B | B | A |

Tabla 100. Niveles de servicio del escenario base E1-0.

A partir de estos resultados podemos observar de la Tabla 100 que el nivel de servicio para el escenario base E1-0 es A, esto significa que la velocidad está controlada solo por las características de la carretera, es decir, se forman pequeñas colas, pero no afectan en su nivel de servicio. Por lo tanto, para el día de mediciones en campo más cargado se observa que la presencia de ciclistas no afecta en los niveles de servicio de la carretera, por lo que se procederá a aplicar los escenarios mencionados en la Tabla 43.



6.3.1.1. Variación del escenario base con presencia ciclista

Como se ha observado, el escenario base no presenta problemas en la funcionalidad, por lo que se ha decidido comenzar a forzar los escenarios para poder observar la influencia de los ciclistas en el tramo de estudio.

Para la creación de los diferentes escenarios se ha modificado la demanda presente en las matrices de origen- destino del escenario base. A continuación, en la Tabla 101 se presentan los resultados totales promedios para cada simulación y la información de cada detector para los diferentes escenarios.

| Escenario | N° | DDA Tráfico | | Intensidad (veh/h) | Velocidad media (km/h) | densidad (veh/km) | Adelantamientos por vehículo | Tiempo de Viaje (s) |
|-----------------------|-------|-------------|--------|--------------------|------------------------|-------------------|------------------------------|---------------------|
| | | Ligero | Pesado | | | | | |
| Escenario Base | E1-0 | 200 | 4 | 203 | 54,53 | 3,24 | 8,66 | 542 |
| Escenario Base x 150% | E1-1 | 300 | 6 | 285 | 54,65 | 4,74 | 8,89 | 520 |
| Escenario Base x 200% | E1-2 | 400 | 8 | 362 | 53,11 | 6,36 | 8,94 | 520 |
| Escenario Base x 250% | E1-3 | 500 | 10 | 446 | 51,15 | 8,25 | 8,76 | 528 |
| Escenario Base x 300% | E1-4 | 600 | 12 | 527 | 47,62 | 10,63 | 8,36 | 558 |
| Escenario Base x 350% | E1-5 | 700 | 14 | 621 | 43,66 | 13,82 | 7,79 | 603 |
| Escenario Base x 400% | E1-6 | 800 | 16 | 700 | 40,74 | 16,80 | 7,29 | 644 |
| Escenario Base x 450% | E1-7 | 900 | 18 | 787 | 38,38 | 20,14 | 6,79 | 683 |
| Escenario Base x 500% | E1-8 | 1000 | 20 | 877 | 36,31 | 23,76 | 6,42 | 722 |
| Escenario Base x 550% | E1-9 | 1100 | 22 | 965 | 34,85 | 27,34 | 6,04 | 756 |
| Escenario Base x 600% | E1-10 | 1200 | 24 | 1.051 | 32,98 | 31,56 | 5,53 | 812 |
| Escenario Base x 650% | E1-11 | 1300 | 26 | 1.151 | 32,23 | 35,34 | 5,40 | 820 |
| Escenario Base x 700% | E1-12 | 1400 | 28 | 1.216 | 30,64 | 39,30 | 5,04 | 867 |
| Escenario Base x 750% | E1-13 | 1500 | 30 | 1.285 | 29,76 | 42,75 | 4,82 | 896 |
| Escenario Base x 800% | E1-14 | 1600 | 32 | 1.323 | 28,62 | 45,86 | 4,13 | 946 |

Tabla 101. Resultados globales del escenario base con ciclistas variando la demanda de vehículos.

Las diferentes variaciones de la demanda vehicular tendrán una notación diferentes, comenzando en E1-0 para la demanda observada en campo hasta llegar a la E1-14 que representa la demanda base aumentada en un 800%.

De la Tabla 101 se puede observar la variación de la velocidad media de circulación al ir aumentando la intensidad de los vehículos a motor, se observan mayores densidad y aumentos en los tiempos de viaje. A continuación, en la tablaTabla 102 se presentan los resultados obtenidos por los detectores.



| Detector | Parámetros | E1-0 | E1-1 | E1-2 | E1-3 | E1-4 | E1-5 | E1-6 | E1-7 | E1-8 | E1-9 | E1-10 | E1-11 | E1-12 | E1-13 | E1-14 |
|----------------|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| D1_Cheste | Intensidad (veh/h) | 187 | 258 | 330 | 405 | 484 | 560 | 634 | 715 | 792 | 866 | 945 | 1.025 | 1.102 | 1.187 | 1.265 |
| | Velocidad (km/h) | 63 | 64 | 64 | 65 | 65 | 64 | 62 | 60 | 59 | 58 | 55 | 53 | 45 | 37 | 28 |
| | Densidad (veh/km) | 2,99 | 4,02 | 5,11 | 6,27 | 7,49 | 8,80 | 10,18 | 11,84 | 13,32 | 15,00 | 17,18 | 19,33 | 24,31 | 31,99 | 45,69 |
| | % vehículos en cola | 25% | 33% | 41% | 47% | 53% | 58% | 63% | 68% | 72% | 76% | 79% | 83% | 86% | 90% | 94% |
| D2_Cheste | Intensidad (veh/h) | 193 | 267 | 340 | 419 | 500 | 585 | 660 | 743 | 828 | 908 | 992 | 1.075 | 1.165 | 1.253 | 1.331 |
| | Velocidad (km/h) | 67 | 67 | 65 | 63 | 62 | 59 | 55 | 53 | 46 | 42 | 38 | 35 | 32 | 31 | 28 |
| | Densidad (veh/km) | 2,90 | 4,02 | 5,23 | 6,60 | 8,10 | 9,87 | 11,96 | 14,12 | 18,07 | 21,76 | 25,80 | 30,73 | 36,21 | 40,36 | 47,62 |
| | % vehículos en cola | 42% | 52% | 58% | 64% | 68% | 73% | 77% | 80% | 84% | 87% | 90% | 92% | 94% | 95% | 95% |
| D3_Cheste | Intensidad (veh/h) | 209 | 286 | 365 | 443 | 526 | 615 | 690 | 777 | 867 | 951 | 1.035 | 1.129 | 1.215 | 1.302 | 1.384 |
| | Velocidad (km/h) | 62 | 62 | 61 | 59 | 57 | 55 | 50 | 45 | 42 | 40 | 37 | 36 | 34 | 33 | 29 |
| | Densidad (veh/km) | 3,34 | 4,61 | 5,98 | 7,48 | 9,22 | 11,26 | 13,86 | 17,24 | 20,68 | 24,03 | 27,97 | 31,10 | 36,27 | 39,51 | 48,36 |
| | % vehículos en cola | 43% | 51% | 58% | 64% | 68% | 72% | 76% | 79% | 83% | 86% | 88% | 89% | 91% | 91% | 92% |
| D4_Cheste | Intensidad (veh/h) | 213 | 294 | 373 | 455 | 539 | 628 | 707 | 795 | 885 | 971 | 1.051 | 1.153 | 1.234 | 1.317 | 1.375 |
| | Velocidad (km/h) | 68 | 71 | 70 | 68 | 65 | 61 | 56 | 50 | 45 | 42 | 39 | 37 | 35 | 35 | 33 |
| | Densidad (veh/km) | 3,13 | 4,12 | 5,35 | 6,70 | 8,24 | 10,32 | 12,69 | 15,85 | 19,70 | 23,32 | 27,15 | 31,36 | 35,35 | 37,89 | 41,06 |
| | % vehículos en cola | 41% | 49% | 54% | 60% | 64% | 69% | 73% | 78% | 81% | 83% | 86% | 88% | 90% | 90% | 91% |
| D5_Cheste | Intensidad (veh/h) | 211 | 291 | 370 | 453 | 536 | 628 | 710 | 795 | 885 | 974 | 1.057 | 1.156 | 1.225 | 1.293 | 1.331 |
| | Velocidad (km/h) | 66 | 67 | 64 | 63 | 60 | 56 | 55 | 53 | 52 | 53 | 52 | 51 | 51 | 51 | 51 |
| | Densidad (veh/km) | 3,20 | 4,37 | 5,77 | 7,19 | 8,89 | 11,15 | 12,87 | 15,01 | 16,89 | 18,41 | 20,27 | 22,75 | 24,19 | 25,50 | 26,25 |
| | % vehículos en cola | 45% | 53% | 61% | 65% | 70% | 74% | 77% | 80% | 82% | 84% | 86% | 87% | 87% | 88% | 89% |
| Sección | % vehículos en cola | 39% | 48% | 54% | 60% | 65% | 69% | 73% | 77% | 80% | 83% | 86% | 88% | 90% | 91% | 92% |

Tabla 102. Resultados de los detectores para el escenario base con presencia de ciclista variando la demanda de vehículo a motor.



De los resultados obtenidos se generan las siguientes figuras para poder observar cómo influye el aumento de la demanda vehicular en el tramo de estudio.

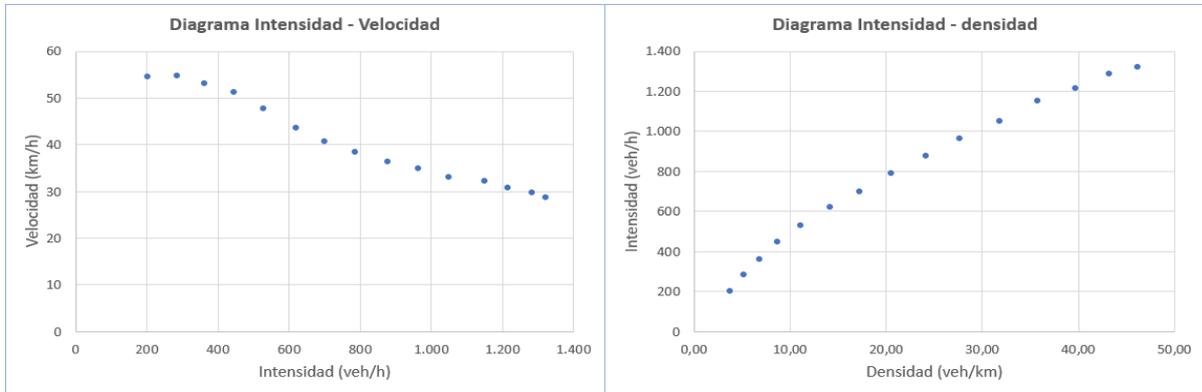


Fig. 100 Diagrama de intensidad – velocidad y de intensidad-densidad variando la demanda de vehículos.

De las dos figuras anteriores (Fig. 100) se observa que a medida que aumenta la intensidad va disminuyendo la velocidad y aumenta la densidad, este efecto responde a las ecuación fundamental de tráfico que relaciona estos tres parámetros. Por lo tanto, si se produce un efecto negativo en la funcionalidad de la carretera al aumentar la demanda.

De las modelaciones también podemos obtener la cantidad de adelantamientos que realiza en promedio un vehículo. De la Fig. 101, se observa que a medida que se va aumentando la intensidad se aumenta la necesidad de adelantar, pero llega a un punto (cercano de los 400 (veh/h)) que el número de adelantamientos comienza a disminuir, esto se produce porque al aumentar la intensidad se disminuyen la cantidad de huecos disponibles para completar la maniobra de adelantamiento

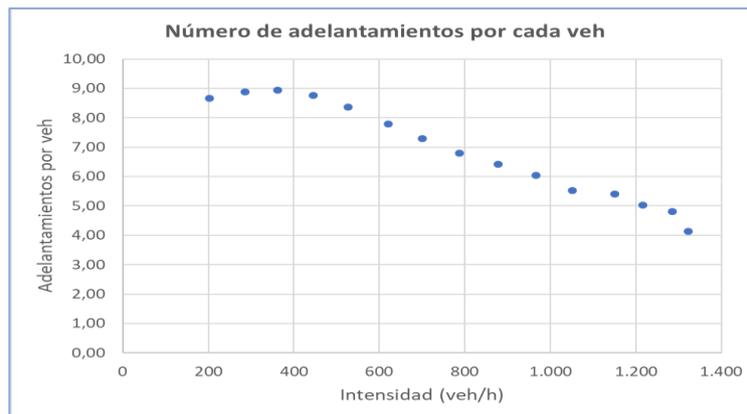


Fig. 101 Número de adelantamientos por cada vehículo variando demanda de vehículos.

Ademas, para lograr estimar los niveles de servicio que se presentan debido al aumento de las demandas ingresadas en el modelo. Se utilizó el promedio de los porcentaje de los detectores, para asi lograr aplicar la metodología del HCM (2016). La Fig. 102 presenta de forma conjunta el porcentaje de los vehículos en cola y el nivel de servicio que este representa.

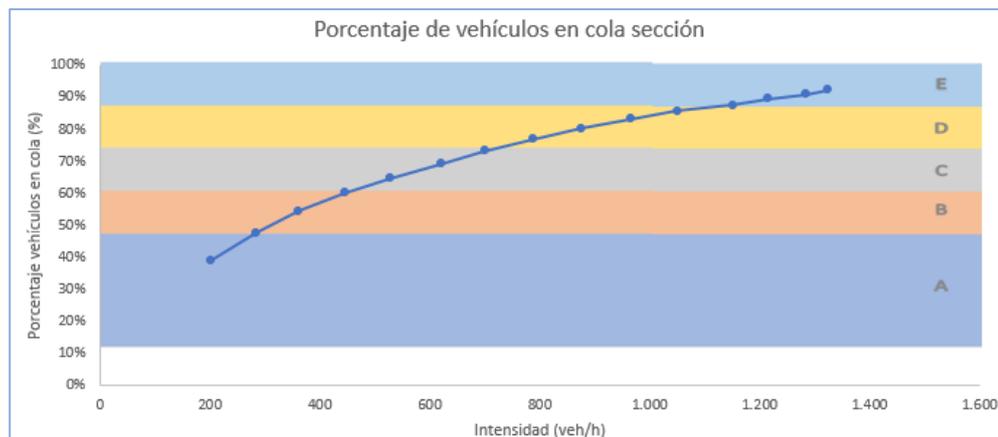


Fig. 102 niveles de servicio y porcentaje en cola variando la demanda de vehículos.

Podemos observar el claro aumento en el porcentaje de los vehículos en cola al aumentar la demanda en el tramo de estudio y su disminución en el nivel de servicio. Este resultado considera la presencia de ciclistas y vehículos a motor, pero no se logra evidenciar si el aumento del porcentaje de los vehículos en cola es producto de la presencia de los pelotones ciclistas o solo por el aumento de la demanda de vehículos. Por lo tanto, para lograr estimar si los ciclistas producen un efecto negativo en la funcionalidad, se realizarán los mismo escenarios evaluados recientemente pero ahora solo considerando vehículos a motor.

6.4. Escenario base sin presencia de ciclistas

Estos escenarios buscan conocer el impacto que produce el aumento de los vehículos a motor en un escenario sin bicicletas. Este escenario será denotado como E2 y dependiendo de la demanda será acompañada de un número, el escenario con la demanda observada y sin presencia de ciclista será llamado E2-0.

Se utilizará el mismo modelo de escenario E1, pero desactivando la presencia de tráfico ciclista. A continuación, se presentan los resultados obtenidos variando la demanda vehicular.

| Escenario | N° | DDA Tráfico | | Intensidad (veh/h) | Vel media (km/h) | densidad (veh/km) | Adelantamientos por vehículo | Tiempo Viaje (s) |
|-----------------------|-------|-------------|--------|--------------------|------------------|-------------------|------------------------------|------------------|
| | | Ligero | Pesado | | | | | |
| Escenario Base | E2-0 | 200 | 4 | 174 | 91,00 | 1,91 | 0,09 | 276 |
| Escenario Base x 150% | E2-1 | 300 | 6 | 253 | 90,03 | 2,82 | 0,23 | 279 |
| Escenario Base x 200% | E2-2 | 400 | 8 | 333 | 89,08 | 3,74 | 0,30 | 282 |
| Escenario Base x 250% | E2-3 | 500 | 10 | 416 | 88,19 | 4,71 | 0,36 | 285 |
| Escenario Base x 300% | E2-4 | 600 | 12 | 499 | 87,50 | 5,70 | 0,42 | 287 |
| Escenario Base x 350% | E2-5 | 700 | 14 | 591 | 86,70 | 6,82 | 0,48 | 290 |
| Escenario Base x 400% | E2-6 | 800 | 16 | 670 | 86,05 | 7,78 | 0,52 | 292 |
| Escenario Base x 450% | E2-7 | 900 | 18 | 757 | 85,33 | 8,87 | 0,57 | 294 |
| Escenario Base x 500% | E2-8 | 1000 | 20 | 845 | 84,88 | 9,96 | 0,62 | 296 |
| Escenario Base x 550% | E2-9 | 1100 | 22 | 930 | 84,31 | 11,03 | 0,66 | 298 |
| Escenario Base x 600% | E2-10 | 1200 | 24 | 1.018 | 83,56 | 12,19 | 0,70 | 300 |
| Escenario Base x 650% | E2-11 | 1300 | 26 | 1.103 | 83,12 | 13,27 | 0,74 | 302 |
| Escenario Base x 700% | E2-12 | 1400 | 28 | 1.190 | 82,76 | 14,38 | 0,78 | 303 |
| Escenario Base x 750% | E2-13 | 1500 | 30 | 1.281 | 82,27 | 15,58 | 0,80 | 305 |
| Escenario Base x 800% | E2-14 | 1600 | 32 | 1.364 | 81,76 | 16,68 | 0,83 | 307 |

Tabla 103 Resultados globales del escenario base (E2) sin ciclistas variando la demanda de vehículos.



| Detector | Parámetros | E2-0 | E2-1 | E2-2 | E2-3 | E2-4 | E2-5 | E2-6 | E2-7 | E2-8 | E2-9 | E2-10 | E2-11 | E2-12 | E2-13 | E2-14 |
|----------------|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| D1_Cheste | Intensidad (veh/h) | 156 | 229 | 301 | 376 | 456 | 534 | 609 | 691 | 768 | 843 | 921 | 1.006 | 1.085 | 1.162 | 1.235 |
| | Velocidad (km/h) | 94 | 93 | 93 | 92 | 92 | 92 | 91 | 91 | 90 | 90 | 89 | 89 | 88 | 88 | 87 |
| | Densidad (veh/km) | 1,67 | 2,46 | 3,24 | 4,07 | 4,95 | 5,83 | 6,67 | 7,61 | 8,51 | 9,38 | 10,32 | 11,35 | 12,31 | 13,26 | 14,21 |
| | % vehículos en cola | 16% | 23% | 30% | 36% | 42% | 48% | 52% | 57% | 62% | 66% | 70% | 74% | 78% | 80% | 83% |
| D2_Cheste | Intensidad (veh/h) | 159 | 233 | 307 | 384 | 466 | 544 | 619 | 703 | 785 | 859 | 939 | 1.025 | 1.109 | 1.186 | 1.258 |
| | Velocidad (km/h) | 95 | 94 | 93 | 93 | 92 | 91 | 91 | 90 | 89 | 89 | 88 | 88 | 87 | 87 | 86 |
| | Densidad (veh/km) | 1,68 | 2,48 | 3,29 | 4,15 | 5,06 | 5,96 | 6,82 | 7,82 | 8,79 | 9,67 | 10,64 | 11,70 | 12,72 | 13,70 | 14,65 |
| | % vehículos en cola | 23% | 31% | 38% | 45% | 51% | 56% | 61% | 65% | 69% | 73% | 76% | 78% | 82% | 84% | 86% |
| D3_Cheste | Intensidad (veh/h) | 164 | 242 | 318 | 396 | 482 | 563 | 641 | 728 | 810 | 887 | 971 | 1.060 | 1.149 | 1.226 | 1.304 |
| | Velocidad (km/h) | 91 | 90 | 89 | 88 | 87 | 86 | 86 | 85 | 85 | 84 | 84 | 83 | 83 | 82 | 82 |
| | Densidad (veh/km) | 1,81 | 2,70 | 3,59 | 4,52 | 5,55 | 6,52 | 7,48 | 8,55 | 9,57 | 10,53 | 11,61 | 12,75 | 13,87 | 14,87 | 15,89 |
| | % vehículos en cola | 33% | 43% | 51% | 57% | 63% | 68% | 72% | 75% | 78% | 81% | 83% | 85% | 87% | 89% | 90% |
| D4_Cheste | Intensidad (veh/h) | 167 | 248 | 326 | 407 | 492 | 579 | 654 | 743 | 827 | 911 | 993 | 1.082 | 1.168 | 1.254 | 1.336 |
| | Velocidad (km/h) | 92 | 91 | 90 | 88 | 88 | 87 | 86 | 85 | 84 | 83 | 82 | 81 | 80 | 79 | 77 |
| | Densidad (veh/km) | 1,83 | 2,74 | 3,64 | 4,60 | 5,61 | 6,65 | 7,59 | 8,72 | 9,81 | 10,96 | 12,15 | 13,42 | 14,65 | 15,96 | 17,36 |
| | % vehículos en cola | 38% | 49% | 57% | 63% | 68% | 73% | 76% | 79% | 81% | 84% | 86% | 87% | 89% | 90% | 91% |
| D5_Cheste | Intensidad (veh/h) | 171 | 253 | 332 | 415 | 499 | 593 | 671 | 759 | 849 | 934 | 1.021 | 1.107 | 1.197 | 1.289 | 1.372 |
| | Velocidad (km/h) | 92 | 91 | 89 | 88 | 87 | 87 | 86 | 85 | 85 | 84 | 84 | 84 | 84 | 83 | 83 |
| | Densidad (veh/km) | 1,87 | 2,79 | 3,72 | 4,71 | 5,71 | 6,86 | 7,80 | 8,91 | 10,00 | 11,08 | 12,15 | 13,21 | 14,30 | 15,44 | 16,46 |
| | % vehículos en cola | 42% | 53% | 61% | 67% | 71% | 75% | 78% | 81% | 83% | 85% | 87% | 88% | 89% | 91% | 92% |
| sección | % vehículos en cola | 30% | 40% | 47% | 54% | 59% | 64% | 68% | 72% | 75% | 78% | 80% | 83% | 85% | 87% | 89% |

Tabla 104 Resultados de los detectores para variando la demanda de vehículos para el escenario (E2) sin presencia de ciclistas.



Podemos observar de las tablas anteriores (Tabla 103 y Tabla 104) que el aumentar la demanda de vehículos influye en todos los parámetros obtenidos, por lo que se compararán los resultado obtenidos para las modelaciones con y sin presencia de pelotones para lograr evaluar si generan algún impacto en su funcionalidad (E2 – E1).

Debido a la ausencia de normativa española para la evaluación de la funcionalidad del tráfico, se emplea el HCM (2016), basando la calidad del tráfico en dos medidas de desempeño: la velocidad media y el porcentaje de tiempo en cola. Como se ha mencionado anteriorme el tramo de estudio es de clase II, por lo que solo se considera para estimar el nivel de servicio el porcentaje de tiempo en cola, este parametros es dificil de medir pero se considera el porcentaje de vehículos que se encuentran viajando con intervalos menores a 3 segundos en una localización determinada.

Para aplicar esta metodología se estimaron los diferentes porcentaje de vehículos en cola para los escenarios con presencia ciclista (E1) y sin presencia de ciclistas (E2). En la Fig. 103 se observan los resultados obtenidos.

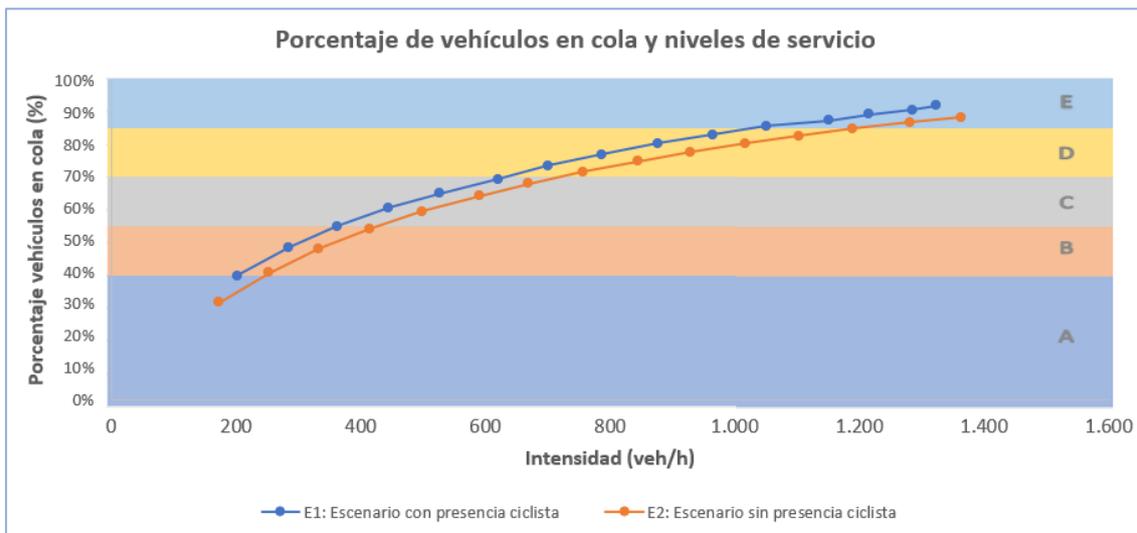


Fig. 103 niveles de servicio y porcentaje en cola variando la demanda de vehículos considerando o no la presencia de ciclistas.

En la Fig. 103 muestra en la línea de color azul los diferentes porcentaje de vehículos en cola obtenidos para las diferentes variaciones de demanda en los escenarios con presencia de ciclistas. La línea de color naranja representa los porcentaje en cola obtenidos para las diferentes variaciones de demanda en los escenarios sin bicicletas.

Se observan diferencia en los porcentajes de vehículos en cola generando que para la intensidad de 400 veh/h se produzca un cambio en el nivel de servicio producto de la presencia de ciclistas.



6.5. Medidas de desempeño

Realizadas las modelaciones de los escenarios E1: con presencia de ciclistas y E2: sin presencia de ciclistas y aunque se observan variaciones en la funcionalidad, se estimó necesario verificar si la metodología del HCM (2016) considera la presencia de los ciclistas en sus cálculos y se verificará si el microsimulador replica de forma correcta las velocidades de circulación (ver Ecuación 1).

Para obtener los parámetros de desempeños considerados en el HCM (2016) es necesario primeramente estimar la velocidad en flujo libre (FFS), en el caso del tramo de estudio el BFFS no se pudo medir por lo que se considerará la velocidad de diseño que corresponde a 62,13 (mi/h), además se deben considerar las anchura de los carriles y arceños, dado que la anchura de carril es de 3,5 m y el arcén de 1,5 m siendo más estrechos que la condiciones base, se reduce la velocidad (afección por el factor de sección transversal F_{LS}) dado un valor de F_{LS} de 1,7. En el caso de la densidad de acceso, es menor a 5 accesos/km, y por tanto dicho factor (F_A) no se tiene en cuenta ya que no hay afección por él. Por tanto, se tiene:

$$FFS = BFFS - F_{LS} - F_A = 62,13 - 1,7 - 0 = 60,43 \frac{\text{millas}}{\text{hora}} = 97,26 \frac{\text{km}}{\text{hora}}$$

Ecuación 2 Estimación de la velocidad en flujo libre.

Obtenidos la velocidad en flujo libre se procederá a estimar la velocidad media del recorrida (ATS) para todas las demandas modeladas.

$$ATS_d = FFS - 0,00776 (v_{d,ATS} + v_{o,ATS}) - f_{np,ATS}$$

Ecuación 3 Estimación de la velocidad media del recorrido.

Para esto se considerarán la demanda de cada escenario y el factor de prohibición de adelantar que para el tramo de estudio corresponde a 1,094 mi/h (considerando la prohibición de adelantamiento de un 25%), este factor se mantendrá debido a que la cantidad de vehículos opuesto se mantiene para todos los escenarios. Además, se estimará el modelo Twopas calibrado para carreteras convencionales explicado en la tesis doctoral de Moreno (2015). A continuación, se presentan los resultados considerando obtenidos para los modelos con y sin presencia de ciclistas (Moreno Chou, 2015).

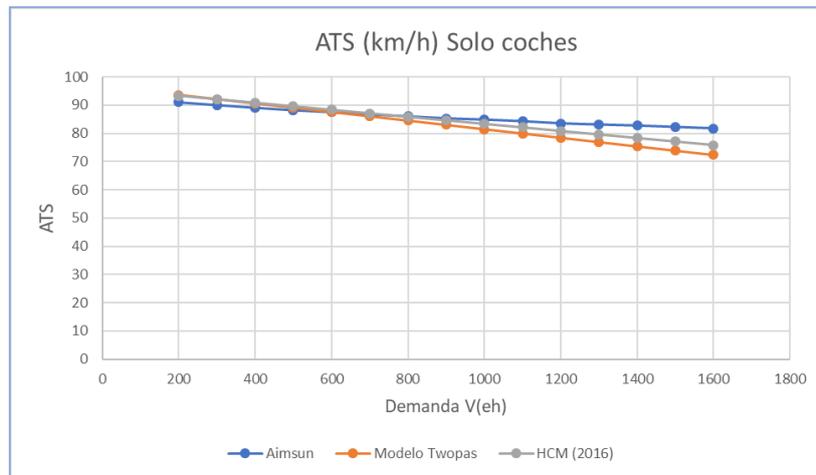


Fig. 104 Estimación de ATS para diferentes metodologías sin presencia de ciclistas.

En la Fig. 104 se observa que Aimsun proporciona una velocidad media ligeramente superior que el modelo de Twopas y el HCM, sobre todo para demandas mayores, siendo esta diferencia menor para repartos demandas menores. También hay que indicar que la ATS proporcionada por Aimsun evoluciona, al ir aumentando el volumen direccional, con pendiente menor que la obtenida con los otros métodos. Aun así, se concluye que la forma funcional y el rango de valores que toma esta medida de desempeño es similar en los tres métodos.

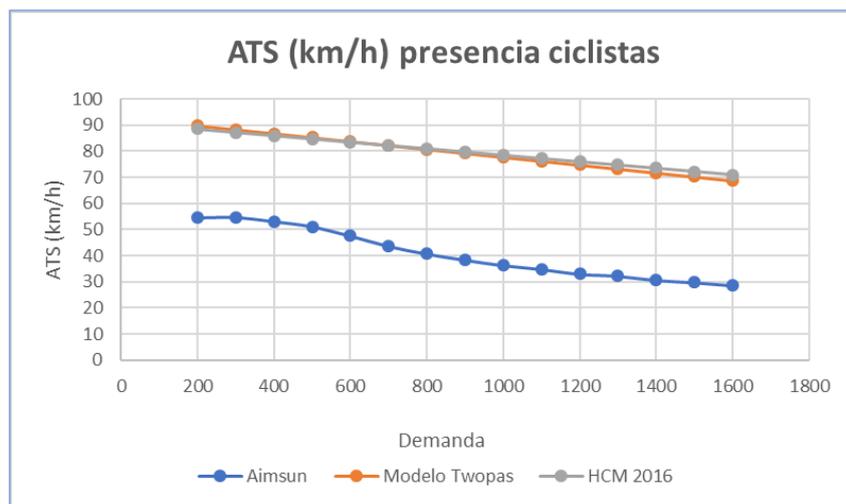


Fig. 105 Estimación de ATS para diferentes metodologías con presencia de ciclistas.

En la Fig. 105 se observa que Aimsun proporciona una velocidad media notablemente inferior que el modelo Twopas y el HCM en las modelaciones con presencia de ciclistas en los cálculos, sobre todo para demandas mayores. Esto se produce porque estas metodologías no permiten ingresar en las estimaciones la presencia de ciclistas, por lo tanto, no se puede evaluar el impacto de los ciclistas en las velocidades media de circulación.

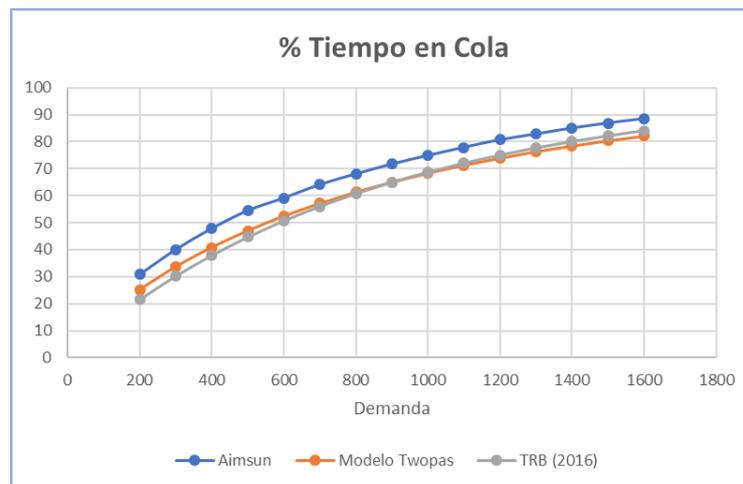


Fig. 106 Estimación de porcentaje de tiempo en cola para diferentes metodologías con presencia de ciclistas.

Al estimar el porcentaje de tiempo en cola para las diferentes metodologías, se observan ciertas diferencias, esto es debido a que las metodologías del HCM y Twopas para estimar el porcentaje en cola no consideran ningún factor que permita el ingreso de ciclistas, por lo que la metodología tampoco es replicable al 100%.

En resumen, no sería correcto utilizar el HCM (2016) como único criterio para evaluar la funcionalidad de las carreteras. Esto lo observó Moreno (2015) en su tesis doctoral donde propone una metodología para evaluar la calidad del tráfico en carreteras convencionales españolas. Esta metodología permite calcular el nivel de servicio de una carretera convencional a partir de tres medidas de desempeño: la velocidad media de recorrido, el porcentaje de tiempo en cola y el porcentaje de velocidad libre.

Por lo tanto, se considerará para estimar la funcionalidad del tramo de estudios las siguientes medidas de desempeño

- **Velocidad media del recorrido (ATS)** refleja la movilidad de las carreteras convencionales, Con esta medida se busca tener una idea de la libertad de circulación de los vehículos.
- **Porcentaje de tiempo en cola (PTSF)** representa la libertad de maniobras y el confort y conveniencia del tráfico. Se consideran vehículos en cola cuando su Interval con el vehículo siguiente es menor 3 segundos.
- **Número de adelantamiento**, aunque no se encuentra dentro de las medidas de desempeño del HCM (2016) se conoce que el adelantamiento tiene un importante efecto en las condiciones del tráfico y en aquellos tramos donde exista la 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.
- **Densidad media del tramo** ya que caracteriza la calidad de las operaciones del tráfico mediante la descripción de la proximidad entre vehículos y refleja la libertad de maniobra.



6.6. Conclusiones del análisis de los resultados

Concluidos todas las etapas de la metodología planteada para este estudio, se presentarán los principales resultados de las diferentes etapas.

6.6.1. Resultados de la calibración del modelo

El proceso de calibración fue separado en dos etapas y cada una de ellas en subetapa. La etapa I de la calibración consideró el modelo de adelantamiento creado por Llorca (2015) separando en parámetros microscópicos y macroscópicos, en general, fueron ingresadas pequeñas modificaciones que permitieron representar de mejor medida el adelantamiento a ciclistas.

Ya en la etapa dos, se buscó replicar las características observadas durante la maniobra de adelantamiento y el comportamiento de los ciclistas en el tramo de estudio. Para esto, la base fundamental de esta etapa fue la creación de diferentes tipos de vehículos con las características de las diferentes configuraciones estudiadas en el microsimulador y se procedió a simular la circulación de estos en el tramo de estudio considerando además vehículos a motor. Los parámetros globales por calibrar son el tiempo de viaje y velocidad media de las bicicletas, largo del pelotón y el tiempo que tarde un vehículo en adelantarlo.

Para lograr realizar el proceso de calibración fue necesaria la observación de 350 maniobras de adelantamientos y 540 replicaciones. Cada configuración fue ajustada por separado. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 105.

| Configuración | Velocidad Bicicleta (km/h) | Longitud pelotón (m) | Tiempo de adelantamiento (s) | Tiempo de viaje (s) |
|---------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------|
| 10 Línea | 18,10 | 53,01 | 3,97 | 1.383,470 |
| 10 Paralelo | 25,03 | 29,48 | 2,03 | 1.000,520 |
| Individual | 31,02 | 1,7 | - | 807,680 |
| 2F | 23,97 | 1,70 | - | 1.044,310 |
| 2L | 22,08 | 24,47 | 1,98 | 1.134,430 |
| 1+2 | 22,55 | 18,00 | 1,73 | 1.110,400 |
| 2+1 | 27,45 | 15,06 | 1,17 | 911,830 |
| 4F | 26,84 | 17,90 | 1,38 | 932,990 |
| 4L | 21,69 | 22,53 | 2,10 | 1.154,330 |

Tabla 105 Parámetros calibrados según configuración ciclista.

Podemos concluir que todas las calibraciones han cumplido con los criterios del error cuadrático medio y GEH, resultando además que no existan diferencias significativas entre los datos obtenidos en campo con los datos obtenidos en la microsimulación.

En la Tabla 106 y Tabla 107 se presentan los resultados obtenidos para el tiempo de viaje y el tiempo de adelantamiento por separado.



| Configuración | Sentido | Tiempo de viaje Real | Tiempo de viaje Modelado | Diferencia % | GEH | RMSE |
|--------------------|-----------|----------------------|--------------------------|--------------|-------|-------|
| 10 Línea | Norte-Sur | 1383,00 | 1383,470 | 0,03% | 0,020 | 0,470 |
| 10 Paralelo | Sur-Norte | 1000,61 | 1000,520 | -0,01% | 0,027 | 0,093 |
| Individual | Sur-Norte | 807,73 | 807,680 | -0,01% | 0,022 | 0,047 |
| Dos en paralelo | Norte-Sur | 1044,10 | 1044,310 | 0,02% | 0,011 | 0,208 |
| Dos en línea | Norte-Sur | 1134,45 | 1134,430 | 0,00% | 0,034 | 0,018 |
| 1+2 | Norte-Sur | 1110,18 | 1110,400 | 0,02% | 0,015 | 0,218 |
| 2+1 | Sur-Norte | 911,83 | 911,830 | 0,00% | 0,007 | 0,004 |
| Cuatro en paralelo | Sur-Norte | 932,88 | 932,990 | 0,01% | 0,030 | 0,115 |
| Cuatro en línea | Norte-Sur | 1154,00 | 1154,330 | 0,03% | 0,017 | 0,330 |

Tabla 106 resultados estadísticos del tiempo de viaje de las diferentes configuraciones.

De estos resultados podemos destacar que las diferencias obtenidas entre los parámetros reales (campo) y modelado son muy similares dando un buen ajuste del modelo.

| Configuración | Sentido | Tiempo de adelantamiento Real | Tiempo de adelantamiento Modelado | Diff % | GEH | RMSE |
|--------------------|-----------|-------------------------------|-----------------------------------|--------|-------|-------|
| 10 Línea | Norte-Sur | 3,97 | 3,9731 | 0,02% | 0,429 | 1,005 |
| 10 Paralelo | Sur-Norte | 2,03 | 2,0318 | -0,02% | 0,275 | 0,466 |
| Individual | Sur-Norte | - | - | - | - | - |
| Dos en paralelo | Norte-Sur | - | - | - | - | - |
| Dos en línea | Norte-Sur | 1,98 | 1,9826 | -0,01% | 0,184 | 0,358 |
| 1+2 | Norte-Sur | 1,73 | 1,7270 | -0,01% | 0,160 | 0,264 |
| 2+1 | Sur-Norte | 1,17 | 1,1740 | 0,01% | 0,206 | 0,255 |
| Cuatro en paralelo | Sur-Norte | 1,38 | 1,3753 | 0,02% | 0,266 | 0,356 |
| Cuatro en línea | Norte-Sur | 2,10 | 2,0994 | 0,02% | 0,219 | 0,341 |

Tabla 107 resultados estadísticos del tiempo de adelantamiento de las diferentes configuraciones.

Aunque la metodología utilizada para obtener los tiempos de adelantamientos fue de forma manual (teniendo que detener la micro simulación cuando se producía el adelantamiento), los resultados obtenidos son satisfactorios y se logra replicar correctamente las variables observadas en campo.

Los resultados obtenidos de velocidad y longitud de los pelotones serán utilizados para evaluar la influencia de la presencia de ciclista en carreteras convencionales. en la Fig. 107, se analizan los resultados obtenidos.

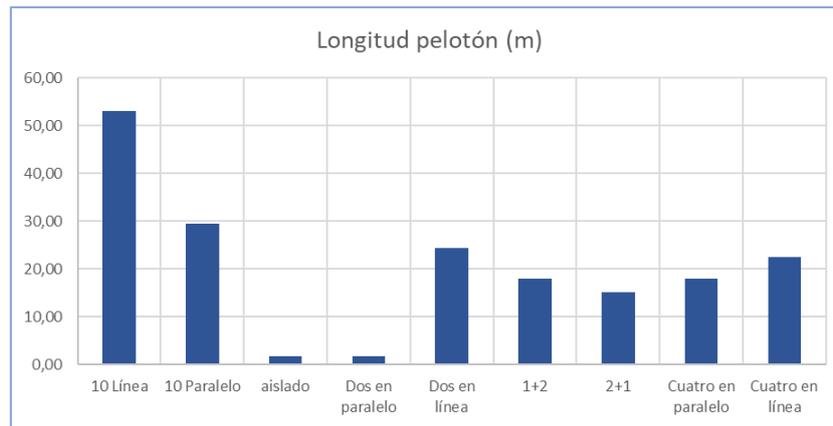


Fig. 107 Longitudes calibradas para las diferencias configuraciones ciclistas

Podemos observar de la figura anterior una clara diferencia de los largos calibrados cuando se representan las configuraciones de 10 ciclistas (entre 30 y 50 metros), por otro lado, los con menor longitud son los ciclistas individuales y dos en paralelo, lo que se corresponde con lo observado en campo.

Otro punto que considerar es la similitud de los largos obtenidos para las configuraciones los dos en línea y cuatro en línea, aunque en la realidad esto no tendría lógica, en el programa se explica que se den estos resultados debido a la mayor velocidad de circulación observada en campo para las configuración dos en línea, esto produce porque al circular a mayor velocidad los ciclistas provocan menores interferencias a los vehículos a motor, generando en ellos una mayor velocidad de circulación y al ser mayor la velocidad de los vehículos a motor los tiempos de adelantamientos serán menores, por lo tanto, aunque el tiempo de adelantamiento para la configuración dos en línea sea menor que la configuración de cuatro en línea, el largo debe ser mayor para lograr causar la interferencia a los vehículos a motor por un mayor tiempo y así lograr equilibrar la mayor velocidad de circulación de los ciclistas que circulan en 2L con su tiempo de adelantamiento.

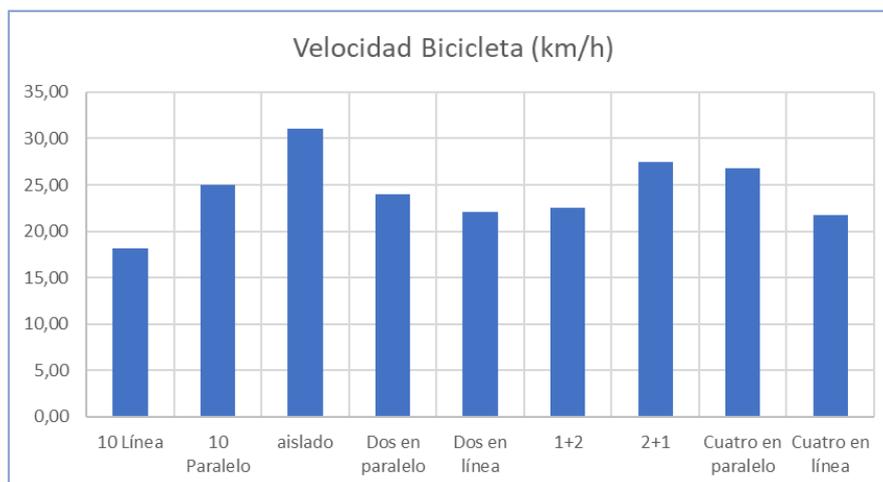


Fig. 108 Velocidades medias calibradas para las diferencias configuraciones ciclistas



De la Fig. 108 se puede observar que las mayores velocidad son producidas cuando menos bicicletas conforman el pelotón como es el caso de las bicicletas aisladas y la menores velocidad se obtienen para los 10 ciclistas circulando en línea. Hay que tener en cuenta que estos resultados están directamente relaciones las características físicas de los ciclistas, es decir, que las configuraciones realizadas durante la ultimas horas de medición pueden tener la variable de cansancio influyendo en los resultados. En general las velocidades obtenidas van desde los 18 km/h a los 30 km/h.

6.6.2. Resultados de la validación del modelo

El proceso de validación busca comprobar el funcionamiento del modelo calibrado en otro escenario diferente, en este caso, modificando la demanda de vehículos a motor e ingresando las características calibradas de los diferentes pelotones. Podemos observar en la Tabla 108 que los tiempos de viaje reales (obtenidos en campo) y los tiempos de viaje obtenidos desde el microsimulador cumplen con los parámetros considerados, además se muestra una pequeña diferencias absolutas entre ellas. Por otro lado, se obtuvo que no existen diferencias significativas entre los parámetros obtenido en campo y los obtenidos en la etapa de validación.

| Configuración | Tiempo de viaje real (s) | Tiempo de viaje validado (s) | Diff % | GEH | RMSE |
|------------------------|--------------------------|------------------------------|--------|------|------|
| 10 Línea | 1383,00 | 1384,04 | 0,08% | 0,02 | 1,04 |
| 10 Paralelo individual | 1000,61 | 1000,57 | 0,00% | 0,02 | 0,04 |
| individual | 807,73 | 807,83 | 0,01% | 0,04 | 0,10 |
| Dos en paralelo | 1044,10 | 1044,23 | 0,01% | 0,01 | 0,13 |
| Dos en línea | 1134,45 | 1133,93 | -0,05% | 0,03 | 0,52 |
| 1+2 | 1110,18 | 1110,14 | 0,00% | 0,01 | 0,04 |
| 2+1 | 911,83 | 911,89 | 0,01% | 0,01 | 0,06 |
| Cuatro en paralelo | 932,88 | 932,88 | 0,00% | 0,02 | 0,00 |
| Cuatro en línea | 1154,00 | 1154,44 | 0,04% | 0,02 | 0,11 |

Tabla 108 resultados del tiempo de viaje validado según configuración

Además, podemos observar en la siguiente tabla que los tiempos de adelantamientos reales (obtenidos en campo) y obtenidos desde el microsimulador cumplen con los parámetros considerados, además se muestra una pequeña diferencias absolutas entre ellas. Por otro lado, se obtuvo que no existen diferencias significativas entre los parámetros obtenido en campo y los obtenidos en la etapa de validación.

| Configuración | Tiempo de adelantamiento real (s) | Tiempo de adelantamiento validado (s) | Diff % | GEH | RMSE |
|------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------|------|------|
| 10 Línea | 3,97 | 3,98 | 0,11% | 0,39 | 0,83 |
| 10 Paralelo individual | 2,03 | 2,01 | -1,28% | 0,27 | 0,45 |
| individual | - | - | - | - | - |
| Dos en paralelo | - | - | - | - | - |
| Dos en línea | 1,98 | 1,96 | -0,96% | 0,28 | 0,49 |
| 1+2 | 1,73 | 1,69 | -2,32% | 0,22 | 0,37 |



| Configuración | Tiempo de adelantamiento real (s) | Tiempo de adelantamiento validado (s) | Diff % | GEH | RMSE |
|--------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------|------|------|
| 2+1 | 1,17 | 1,15 | -1,90% | 0,25 | 0,32 |
| Cuatro en paralelo | 1,3750 | 1,3889 | 1,01% | 0,36 | 0,47 |
| Cuatro en línea | 2,10 | 2,10 | 0,19% | 0,16 | 0,28 |

Tabla 109 resultados del tiempo de adelantamiento validado según configuración

En resumen, los resultados de la validación muestran que este modelo también se puede aplicar a condiciones significativamente diferentes de las de los escenarios de calibración, pero los resultados de la calibración y validación de este modelo dependieron de los datos recogidos; por lo tanto, cualquier extrapolación a otras condiciones y escenarios debe tomarse con cuidado.

6.6.3. Conclusiones de los escenarios modelados

Mediante las medidas de desempeño descritas anteriormente, se evaluará si la presencia de ciclistas afecta en la funcionalidad del tramo de estudio comparando los resultados obtenidos para los escenarios con presencia ciclista y sin ella.

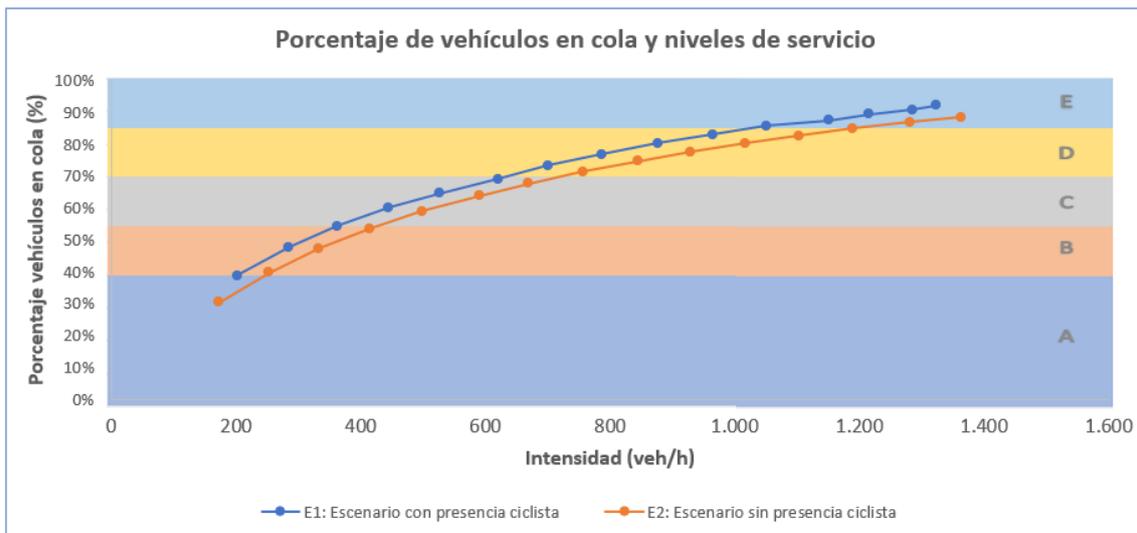


Fig. 109 niveles de servicio y porcentaje en cola variando la demanda de vehículos considerando o no la presencia de ciclistas.

Considerando el porcentaje de vehículos en cola (figura 109), se observa una diferenciación aproximada del 10% para los escenarios de menor intensidad y disminuye hasta un 4% para el escenario con mayor intensidad, aunque estas diferencias son pequeñas se comprueba que produce un efecto en la funcionalidad la presencia de ciclistas. Además, se puede comprobar que para ciertas intensidades la presencia de ciclistas produce un cambio en el nivel de servicio, por ejemplo, para la intensidad de 400 vehículos la presencia de ciclista produce un cambio del nivel de servicio del B al C.

Otra medida de desempeño que se estudio fue la variación en la velocidad media de recorrido. Para analizar esta medida es que se generaron unos diagramas de



intensidad y velocidad que facilitar el estudio entre la interacción de vehículos motorizados y ciclistas

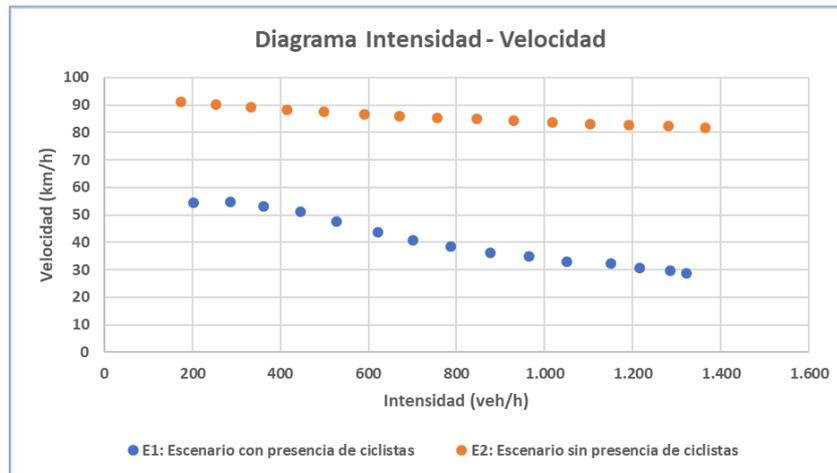


Fig. 110 Diagrama de intensidad – velocidad variando de intensidad y la presencia de ciclista.

En la figura 110 se observa en azul la velocidad media de circulación cuando se realizan las modelaciones con presencia ciclista, en naranja se observa las velocidades media de circulación sin presencia ciclista. En los resultados del ATS se observa en los dos escenarios que a mayores intensidad el ATS disminuye, una diferencia importante se presenta cuando existe pelotones ciclistas ya que se observa una mayor pendiente, traduciéndose en una mayor variabilidad de las velocidades en comparación a las velocidad sin presencia de ciclistas. Desde el escenario base (E1-0 y E2-) se presentan diferencias considerables entre las dos situaciones (36 km/h) y esta diferencia va aumentando a medida que aumenta la intensidad. Por último, se puede observar menor dispersión de la velocidad a medida que aumenta la intensidad de vehículos para el caso sin ciclistas.

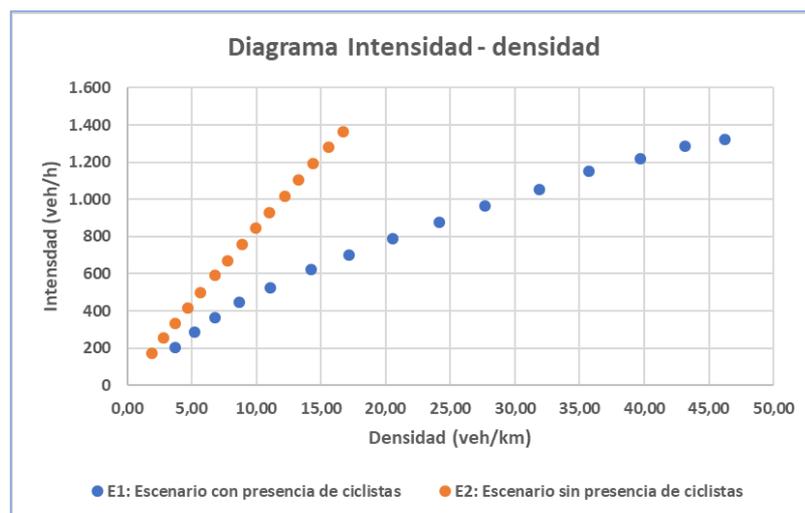


Fig. 111 Diagrama de intensidad – densidad variando de intensidad y la presencia de ciclista.



En la figura 111 se observa en azul la densidad media cuando se realizan las modelaciones con presencia ciclista, en naranja se observa las densidad media sin presencia ciclista. La variación de la densidad media aumenta a valores de mayor intensidad, pero aumenta aún más cuando existe presencia de ciclistas, para el caso más desfavorable (mayor intensidad) se observa una diferencia de 40 vehículos por kilómetro.

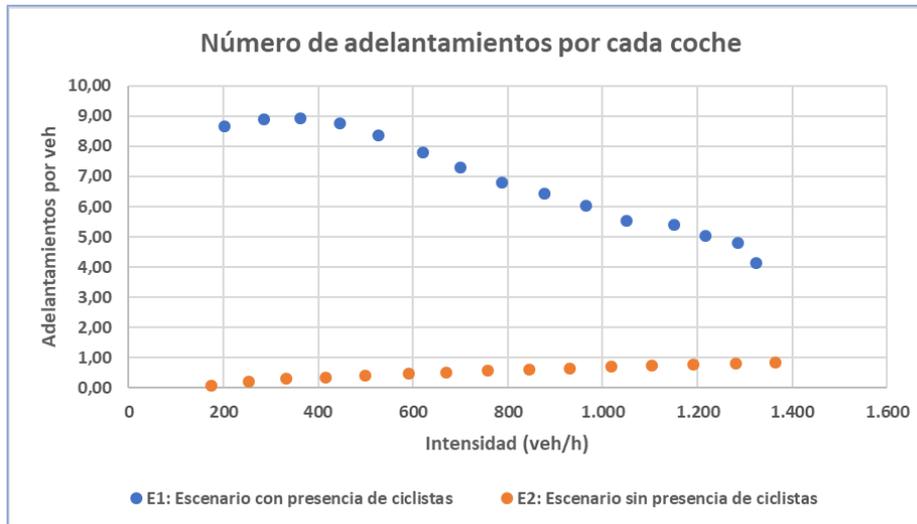


Fig. 112 Número de adelantamientos por vehículos variando de intensidad y la presencia de ciclista.

La última medida de desempeño analizada es el número de adelantamiento que realiza cada vehículo. A simple vista se aprecia para el escenario con ciclista que con un aumento de la intensidad de tráfico genera un mayor número de adelantamientos, hasta llegar a una intensidad de tráfico a partir de la cual el número de adelantamientos decrece debido a la inexistencia de huecos para volver a incorporarse en el carril de la derecha. En el escenario sin bicicletas podemos ver que existe aumento en el número de adelantamientos, pero siempre muy por debajo de los observados en el escenario con pelotones ciclistas.

En resumen, se puede concluir de este análisis:

- La presencia de ciclista produce un aumento en el porcentaje de vehículo en cola producto de las bajas velocidades de circulación de estas afectando en la funcionalidad de la carretera;
- La velocidad media de recorrido es la variable que presenta una mayor diferencia entre los escenarios, aumentando siempre esta diferencia a medida que aumentan las intensidades. Esto se traduce a que los conductores con presencia de ciclistas tienen menores libertades de circulación;
- La densidad media de la red se ve considerablemente afectada producto de la existencia de los pelotones ciclistas, esto se debe, a que los vehículos deben disminuir su velocidad de circulación al acercarse a los pelotones y a medida que aumenta la intensidad la posibilidad de



adelantar disminuye aumentando las densidad;

- El número de adelantamiento promedio por vehículos es 8 veces más para el escenario base con ciclista, esto es debido a que en el escenario sin ciclistas los vehículos circulan a altas velocidades y no tiene el deseo de adelantar ya que todos los vehículos circulan cerca de su velocidad deseada. En el caso, del escenario con ciclista, el número de adelantamiento es mayor ya que existen diferencias de velocidades considerables entre los vehículos a motor y pelotones. Además, se puede observar que cuando existe presencia ciclistas se llega a una intensidad donde el número de adelantamiento comienza a disminuir, esto significa que la cantidad de huecos disponibles comienzan a disminuir evitando que se produzcan adelantamiento afectando directamente en la funcionalidad de la carretera.

Todos estos resultados justifican la aplicación de una mejora del tramo de estudio para disminuir el impacto en la funcionalidad producto la presencia de pelotones ciclistas.

7. Aplicación práctica

Como se ha analizado en los apartados anteriores, la presencia de bicicletas afecta a la funcionalidad de la carretera, reflejándose problemas operacionales, tales como;

- Limitación de oportunidades para el adelantamiento seguro;
- Aumento del agrupamiento de vehículos;
- Reducción de las velocidades promedio de recorrido;

Para solucionar o mitigar los problemas producidos por la presencia de ciclistas se han explorado diferentes opciones de modificación de la infraestructura existente. Dichas propuestas de mejora están orientadas a proporcionar mayores oportunidades de adelantamientos.

La primera opción considerada ha sido la creación de carriles bicis paralelos a la carretera, pero debido al elevado coste que supondría incorporar esta solución, y la relativa efectividad de esta, dado que de la observación del fenómeno se ha visto que los grupos ciclistas prefieren circular por la calzada, se deriva la segunda opción de mejora. La segunda opción plantea una solución de diseño en puntos donde mediante el modelo de microsimulación se ha observado la mayor influencia de las bicicletas en la funcionalidad.

Valencia (2015), analizó en su tesis doctoral diferentes soluciones para mejorar la funcionalidad en carreteras convencionales, pero no enfocado en ciclistas. Por estos se considera que la mejor propuesta de mejora puntual es la creación de apartaderos.

Un apartadero es una berma ensanchada y sin obstrucciones, la cual permite a los vehículos lentos salir del carril para dar paso a los vehículos que le siguen.



La diferencia principal con los apartaderos para vehículos a motor es que se buscará que los ciclistas no se detengan al utilizar esta sección, es decir, que mantengan su velocidad de circulación pero que al cambiarse a su carril exclusivo permita la circulación paralela de estos dos modos sin que ninguno pierda la preferencia de paso.

El tramo de estudio cumple con las características para la incorporación de apartaderos, ya que según el HCM (2016) y la AASHTO (2014) los apartaderos se usan frecuentemente en carreteras se cumple una de las siguientes características:

- Flujo direccional superior a 200 veh/h;
- Presencia de vehículos lento excede los 20 veh/h ;
- Diferencia de velocidad producidas por los vehículos lento son mayores a 16 km/hr).

Dados los valores de IMD existentes en el tramo de estudio (4.911 veh/día y en promedio 200 veh/h), donde la presencia ciclista genera velocidades relativas de 30 km/h aprox. y presencia de vehículos pesados es posible la implantación de estos apartaderos como medidas de mejora. el tramo de estudio.

El HCM (2016) indica que los apartaderos tienen longitudes relativamente cortas, generalmente menores a 190 m para evitar confusiones en los conductores; por el mismo motivo recomienda no incluir en una misma carretera apartaderos y carriles de adelantamiento.

Un apartadero bien diseñado y ubicado puede ofrecer entre un 20% y 50% del número de adelantamiento por cada 1,6 km de carril de adelantamiento en terreno llano. Además se han encontrado que los apartaderos ofrecen una operación segura, de hecho, los accidentes ocurren en una tasa de 1 por cada 80.000 a 400.000 usuarios (Valencia Alaix, 2016).

La longitud mínima es de 60 metros y las recomendadas se hacen sobre el supuesto que la diferencia de velocidad de los vehículos lento es de 8 km/h menos que la media (AASHTO, 2014). La anchura mínima es de 3 metros y la deseable de 5 m. se requiere una señalización adecuada para el uso eficiente de él y asegurar la operatividad (AASHTO, 2004). La norma 3.1 Instrucción de Carreteras exige que los apartaderos deberán ser divisados por los conductores a una distancia mayor o igual que la visibilidad de parada, para la velocidad de proyecto (V_p) de la carretera, por lo que su implantación deberá ser analizada conjuntamente con el trazado en planta y alzado. Para este caso la distancia de parada mínima considerando la velocidad de los ciclistas debería ser de 36 metros y considerando la velocidad de los vehículos del tramo de estudio se requiere una distancia de 145 metros.

Las longitudes máxima recomendadas por Harwood & Hoban (1987) y Harwood & St. John (1985) para evitar además sean usadas como carril de adelantamiento son las siguientes.



| Velocidad de aproximación (km/h) | Longitud (m) |
|----------------------------------|--------------|
| 30 | 60 |
| 40 | 60 |
| 50 | 65 |
| 60 | 85 |
| 70 | 105 |
| 80 | 135 |
| 90 | 170 |
| 100 | 185 |

Tabla 110 Longitudes de apartaderos recomendadas (Harwood & Hoban (1987), Harwood & St. John (1985))

El apartadero que se utilizará tendrá las mismas características geométricas que el apartadero de emergencia considerado en la norma 3.1 IC. A continuación, se presentan las características geométricas y de señalización que se proponen para los apartaderos:

- El ancho total de los apartaderos será al menos de cuatro metros y cincuenta centímetros (> 4,50 m) con la siguiente distribución: tres metros y cincuenta centímetros (3,50 m) de apartadero propiamente dicho y al menos un metro (> 1,00 m) de cebreado de separación de la calzada.
- La longitud apartaderos dependerá de la visibilidad de estos, pero se considerará un máximo de 185 según las recomendaciones del AASHTO (2014).
- Las zona cebreada serán igual al largo estimado con cuñas de transición al inicio y final, de longitud mínima treinta metros (> 30,00 m).
- Los apartaderos y sus cuñas se dispondrán con la misma pendiente transversal que los arcenes de la calzada. El largo de la cuña no se incluye en el microsimulador por lo que su diseño deberá ser considerado en futura investigaciones.
- El apartadero será de uso exclusivo de ciclistas, pintando preferentemente utilizando pavimento rojo, ya que es el color más utilizado en la infraestructura ciclista en Valencia.
- Se incluirá señalización vertical para advertir a los usuarios de la cercanía de este apartadero con le señal S-64 que menciona la existencia de carril bici adosada a la calzada y se agregará la señalización vertical vía reservada para ciclista R- 407 a. Además, se debe información a los ciclista el término de este paradero con la señal de fin de vía reservada.
- La implantación del apartadero no supondrá la disminución del ancho de los arcenes ni su supresión.



Fig. 113 Señalización recomendada para apartadero ciclista



El diseño esquemático del apartadero será el siguiente:

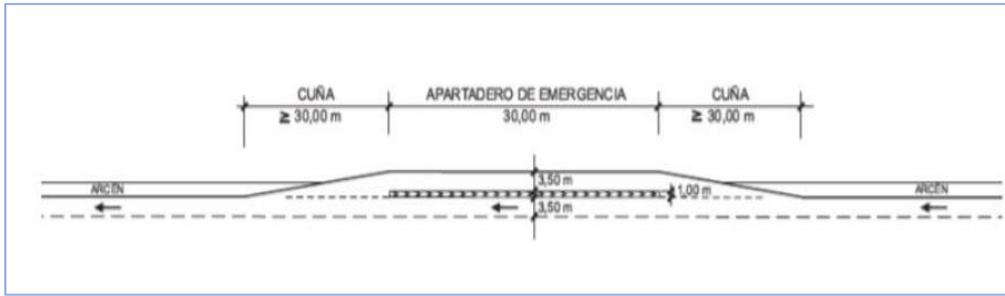


Fig. 114 Diseño geométrico de los apartaderos ciclistas (Ministerio de Fomento, 2016a)

Las dimensiones más adecuadas para los apartaderos de ciclistas y señalización se considerarán dentro de las futuras líneas de investigación ya que todos los diseños y criterios no tienen incluido a los ciclistas.

7.1. Ubicación de apartaderos

Un apartadero bien ubicado ofrece un mayor número de adelantamientos, es por esto por lo que a partir de los resultados de la microsimulación se buscarán los puntos del tramo de estudio donde la presencia de bicicletas produce las mayores penalizaciones en la funcionalidad del tramo.

Como se ha descrito en apartados anteriores en el tramo tienen ubicados 5 detectores. El primer análisis comparará los porcentajes de vehículos en cola de la sección en general en cada uno de los detectores.

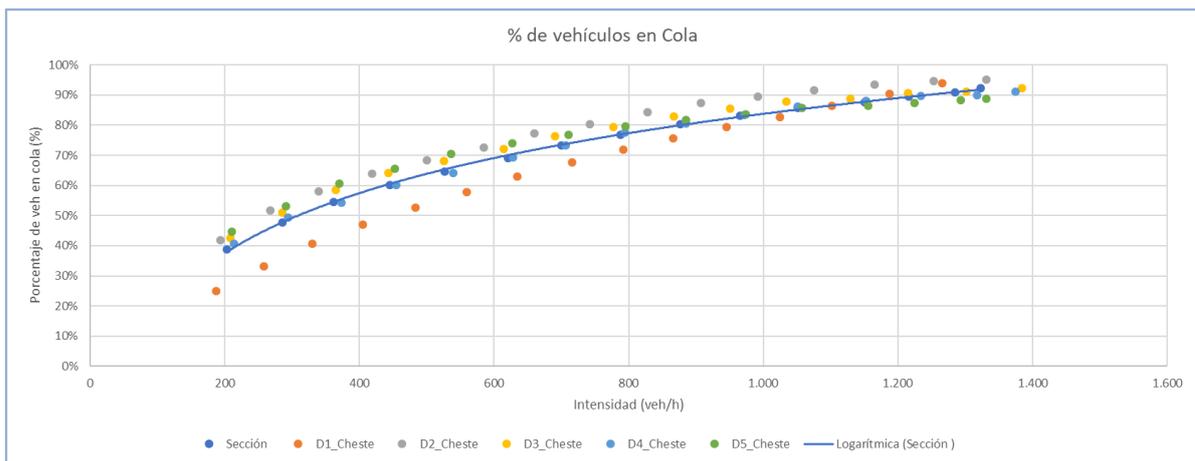


Fig. 115 Comparación del porcentaje de tiempo en cola.

Se observa de la figura anterior que el detector ubicado al inicio del tramo presenta siempre menor porcentaje de tiempo en cola por lo que una ubicación en este punto no mejoraría la funcionalidad global del tramo de estudio.

Descartada la ubicación de un apartadero en el primer punto, el siguiente paso consiste en analizar la homogeneidad del tramo de estudio, es decir, se



analizarán las diferencias que presentan las velocidad medias y porcentaje de tiempo en cola entre detectores. Al utilizar este criterio nos permite evaluar el tramo de estudio en cuatro sección.

- Tramo I: inicio tramo hasta detector I (PK 76+550 a PK 76+650);
- Tramo II: detector I hasta el detector II (PK 76+650 a PK 77+921);
- Tramo III: detector II hasta el detector III (PK 77+921 a PK 80+251);
- Tramo IV: detector III hasta detector IV (PK 80+251 a PK 82+014);
- Tramo IV: detector IV hasta el detector V (PK 82+014 a PK 83+378);
- Tramo V: detector V hasta fin de tramo (PK 83+378 a PK 83+500).

La Fig. 116 muestra los resultados de las diferencias entre detectores

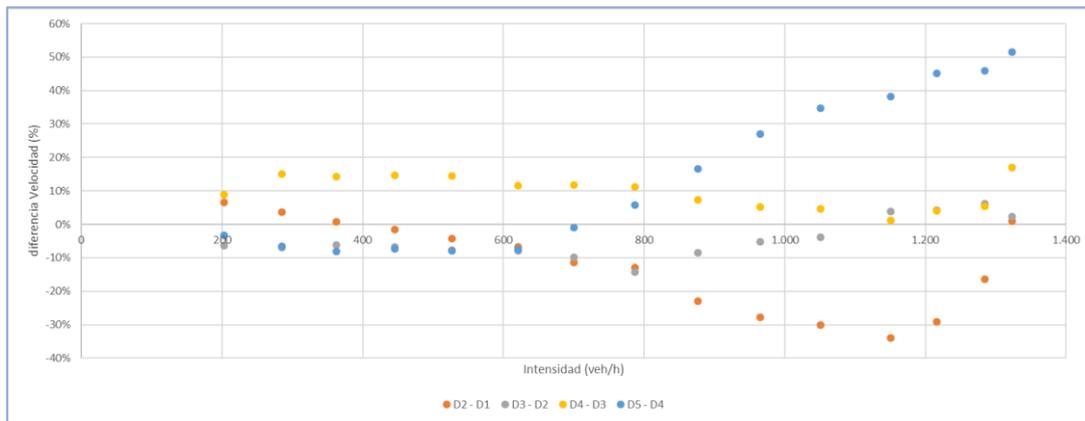


Fig. 116 Comparación de velocidad media de circulación entre detectores consecutivos.

De la comparación de la velocidad media de circulación entre detectores se observa una considerable diferencia entre los detectores D2 & D1 y D5 & D4. Esto se traduce en una incomodidad entre los conductores al presentar estas diferencias.

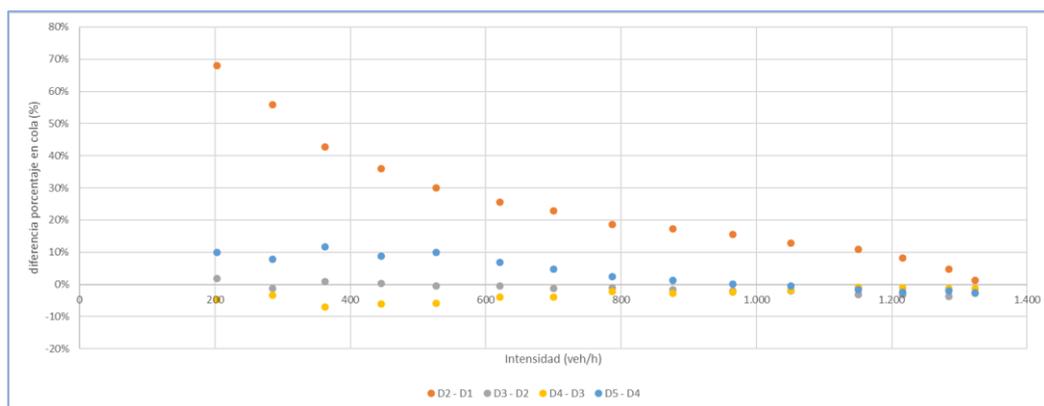


Fig. 117 Comparación del porcentaje de vehículos en cola entre detectores consecutivos

El resultado de la comparación del porcentaje de vehículos en cola destaca nuevamente las diferencias entre los detectores D2 & D1 y D5 & D1. Por tanto,



se estima conveniente la ubicación de apartadero entre los PK 76+650 a PK 77+921 y entre el PK 82+014 a 83+378.

Para seleccionar la ubicación exacta se ha analizado el espacio disponible en la calzada que permita una extensión de esta, además, se ubicará preferentemente en zonas donde exista restricciones de adelantamiento, pero considerando que cumpla de distancia de visibilidad de los apartaderos que aplicando la normativa va desde los 45 metros hasta los 145 metros. Para asegurar la seguridad se estimará una distancia de visibilidad de 150 metros para ubicar el ingreso al apartadero.

La ubicación del primer apartadero será en el PK 77+640 tendrá el largo máximo recomendado en la AASHTO (2014) de 185 metros. En este punto existe línea continua por lo que también se asegura que no existan interferencia por la presencia de vehículos opuestos.



Fig. 118 Sección transversal disponible para la creación del apartadero I (Google earth)

La ubicación del segundo apartadero será en el PK 82+663 tendrá el largo 150 metros para asegurar la visibilidad de este. En este punto existe línea continua por lo que también se asegura que no existan interferencia por la presencia de vehículos opuestos.



Fig. 119 Sección transversal disponible para la creación del apartadero II (Google earth)



Para la selección de los largos de los apartaderos se realizaron modelaciones variando el largo de estos, dando como resultado en general que los apartaderos generan un aumento en las velocidades y cambios en el número de adelantamiento.

| Parámetro | 185 metros | 150 metros | 100 metros | 185 y 150 |
|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Número de Cambios de Carril | 4,45 | 4,50 | 4,51 | 4,47 |
| Emisión IEM - CO2 | 104.883,61 | 120.552,31 | 148.465,64 | 127.767,38 |
| Velocidad - Todos | 62,42 | 62,06 | 61,60 | 62,25 |
| Tiempo de Viaje - Todos | 245,27 | 22.174,07 | 22.268,61 | 246,14 |
| Velocidad - Coche | 67,09 | 66,71 | 66,23 | 66,92 |
| Tiempo de Viaje - Coche | 204,85 | 231,24 | 205,47 | 205,64 |
| Cola Max - Todos | 3,24 | 3,36 | 3,47 | 3,92 |

Tabla 111 Variación del largo del apartadero

Por lo tanto, se recomienda que en casos donde existan disponibilidad de espacio y distancia de visibilidad suficiente la aplicación de apartaderos del máximo largo recomendado. Pero además hay que considerar que estos apartaderos recomendados estas diseñado para ciclistas por lo que se cree necesario investigar el largo más adecuado para la presencia de ciclistas.

7.2. Demanda del escenario base

Para lograr evaluar la funcionalidad de la propuesta se estima conveniente realizar el escenario base de esta investigación con la hora más cargada del año del tramo de estudio considerando el año donde se realizaron las mediciones puntuales.

Para estimar la hora más cargada del año se ha utilizado las fichas de aforo de Conselleria de Vivienda, Obras Públicas y Vertebración del Territorio. La ficha considerara es la 050010 realizara con aforos del 2017. En esta ficha se encuentra la distribución horaria de una día laboral y la IMD media por meses. Para no meses que no encuentre información se realizara una interpolación para obtenerlas.

Obtenidas las IMD de todos los meses y días se han generado las 8760 horas del año considerando solo el sentido modelado. A partir de estas horas se ha estimado la hora máxima del año y se ha buscado la hora similar del año para el día que se ha considerado modelar (27 de enero 2018). Con estas dos horas se ha estimado en un factor que relaciona la hora máxima del año con mi hora símil aforada (28 enero 2017).

| Parámetro | Intensidad (veh/h) |
|--|--------------------|
| Hora máxima del 2017 | 180 |
| Hora símil del 2017 | 105 |
| Factor | 1,71 |
| Intensidad campo (2018) | 204 |
| Máx. hora estimada para el 2018 | 350 |

Tabla 112 Hora más cargada a modelar



La máxima intensidad esperada para el tramo de estudio es de 350 (veh/h), esta intensidad según los resultados obtenidos para la presencia de coches y pelotones es donde comienzan a existir diferencias en el nivel de servicio. Por lo tanto, se considerará realizar la propuesta para la demanda de 400 vehículos ligeros y 8 vehículos pesado, Esta demanda es la modelada como el 200% del escenario base.

7.3. Análisis de la propuesta

Antes de poder evaluar el efector de los apartaderos es necesario modificar el escenario base para poder incluir los apartaderos. Para esto fue necesario cortar el tramo de estudio en varias sección.

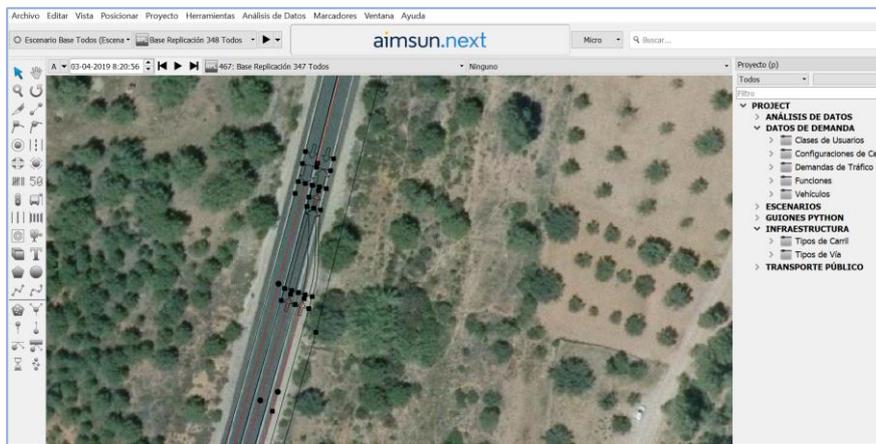


Fig. 120 Creación de los apartaderos en el microsimulador

Producto de la incorporación de los carriles fue necesario verificar la demarcación horizontal y las restricción de circulación. A continuación, en la fig. 121 se presenta la red de modelación del escenario con y sin apartadero.

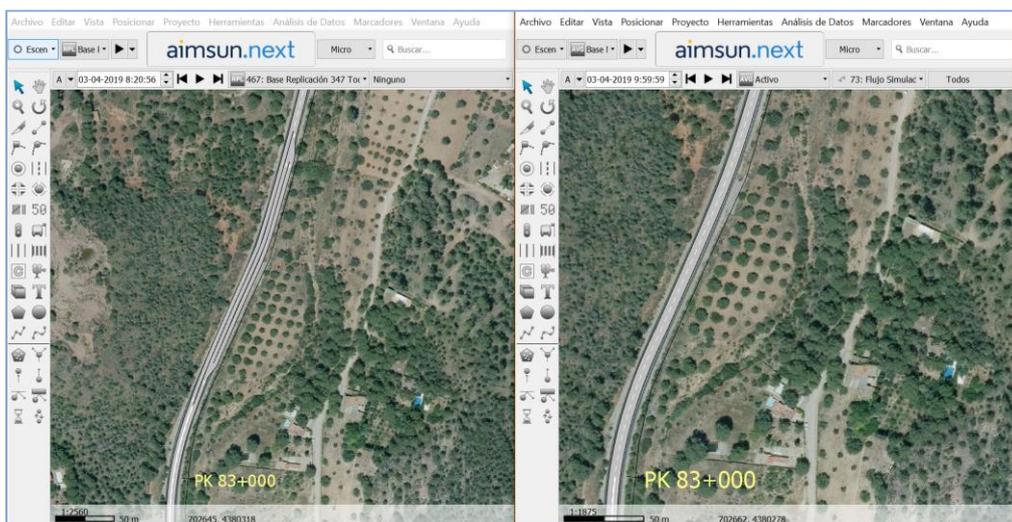


Fig. 121 Escenario base y con propuesta en el microsimulador.



A los apartaderos creados se les ha prohibido el ingreso a los vehículos a motor y se ha modificado la ruta de los pelotones para que ahora utilicen los apartaderos. Estos se realizaron modificando la ruta de las rutas como se muestra a continuación.

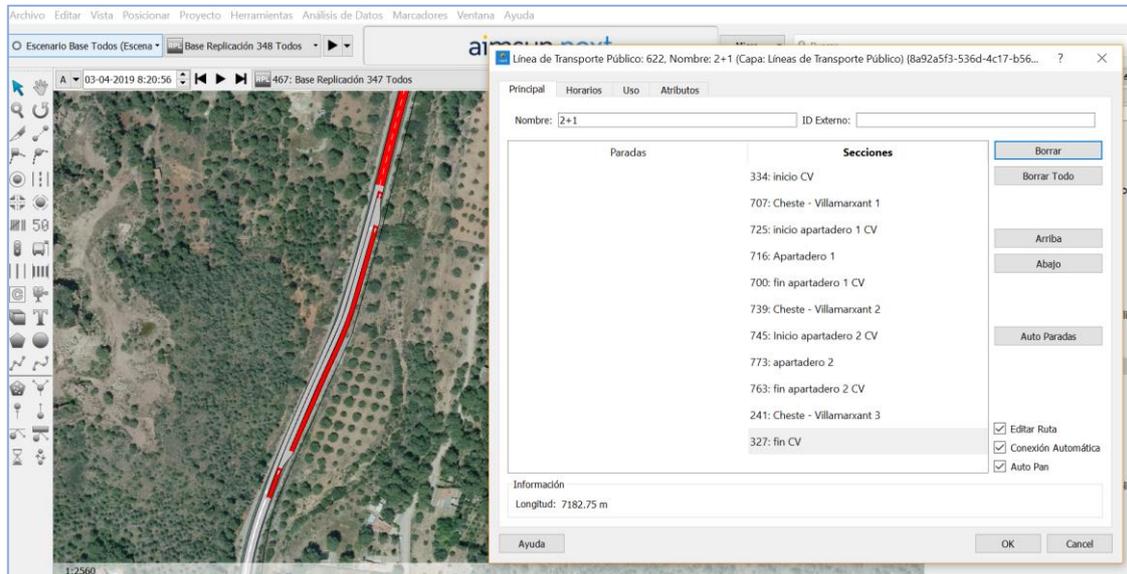


Fig. 122 Modificación del recorrido de los pelotones por el tramo de estudio

Creados los dos escenarios procederá a evaluar la presencia de estos a través de AIMSUN.

8. Discusión y análisis aplicación práctica

En esta sección se comparan los principales resultados del estudio de la interacción entre vehículos a motor y ciclistas mediante microsimulación.

Un punto importante para destacar y que lo concluye en su tesis doctoral Moreno (2015) es la necesidad de incluir en la evaluación de la funcionalidad de carreteras convencionales medidas de desempeño adicionales, como la velocidad media, número de adelantamiento y el porcentaje de vehículos en cola. Ya que como se observó en esta investigación la metodología del HCM (2016) no considera presencia de ciclistas en la carreteras para las estimaciones de la velocidad media de recorrido ni del porcentaje de tiempo en cola, por lo tanto, el microsimulador entrega unos resultados más realista a la presencia de ciclistas en la carretera.

En la mayoría de las investigaciones realizadas con bicicletas instrumentadas, la toma de datos y determinación de separaciones se ha realizado, bien indirectamente midiendo sobre fotografías e imágenes de video, o bien directamente mediante la utilización de distanciómetros de ultrasonidos. La primera técnica, utilizada especialmente en las primeras investigaciones, debe



descartarse en la actualidad ante la existencia de otros instrumentos de medición directa asequibles y de mucha mayor precisión. Igualmente, la utilización de distanciómetros de ultrasonidos está superada en cuanto a calidad y precisión por los distanciómetros láser actualmente existentes en el mercado y que han sido utilizados en la presente investigación.

Debido a que el uso de microsimulación para evaluar la interacción entre vehículos motor y ciclista en entornos interurbanos es nueva es que no se puede comparar con otras investigaciones. Por lo que se analizarán los datos obtenidos solo entre los dos escenarios considerados y se evaluará su efecto en la funcionalidad.

El nuevo escenario utilizará de demanda máxima estimada para el año 2018 considerando escenario E3 que presenta similar demanda que el escenario E1-2 pero incorporando propuesta de mejora. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el escenario que incluye apartaderos y presencia ciclistas.

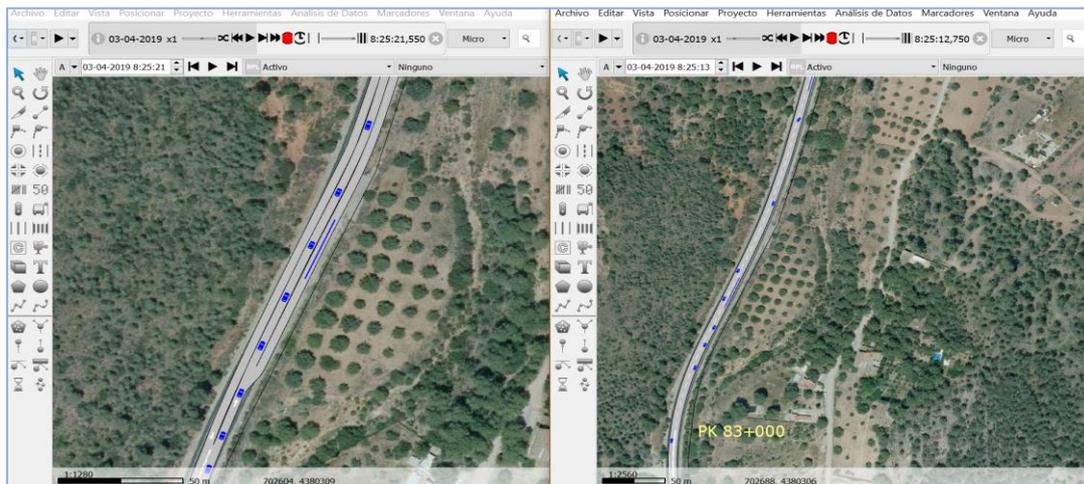


Fig. 123 Modelación del escenario base y con propuesta

Primeramente, se presenta una imagen con una vista del modelo de microsimulación en los dos escenarios. Se puede observar que los pelotones están utilizando el apartadero diseñado y solo los vehículos a motor circulan por la carretera principal. Los resultados de estos son escenarios se muestran a continuación.

| Parámetro | Base | Propuesta | Diferencia Absoluta |
|--------------------------------------|----------|-----------|---------------------|
| Número adelantamientos (veh) | 8,9 | 4,5 | 50% |
| Emisión IEM - CO2 (g/km) | 22.160,8 | 18.252,5 | 18% |
| Velocidad (km/h) | 53,1 | 62,3 | 17% |
| Densidad (veh/km) | 6,8 | 5,7 | 17% |
| Tiempo de Viaje (s) | 520,0 | 246,1 | 53% |
| Tiempo de Demora / Tiempo de Viaje % | 31,8 % | 24,9 % | 22% |
| Cola máxima (veh) | 6,1 | 3,6 | 42% |
| % promedio de vehículos en cola | 54% | 52% | 5% |

Tabla 113 Resultados globales de la aplicación de la propuesta



La primera medida de desempeño que considera un sustancial cambio es el número de adelantamientos por vehículos, disminuyendo en cerca de un 50%. La disminución en el número de adelantamiento se traduce en un aumento en la calidad de circulación ya producto de la creación de los apartaderos los conductores mejoran su calidad de circulación mejorando en la funcionalidad de la carretera.

La velocidad media de circulación aumenta en un 17% cuando se consideran apartaderos exclusivos para pelotones ciclistas, mejorando la movilidad de carretera y dando un mayor grado de libertad de circulación. En cuanto a la densidad de los vehículos por kilómetros se ve disminuida en un 17%, observando una mejor funcionalidad de la carretera. En cuanto al promedio de los vehículos en cola no se refleja una gran disminución.

En resumen, todas las medidas de desempeño consideraras reflejan un aumento en la funcionalidad de la carretera para el escenario base (E1-2).

Además, podemos observar que la presencia de apartaderos genera una disminución en el tiempo de viaje de un 53%, traduciendo en menores tiempos de demora, disminución de la cola máxima y en principalmente en una disminución del 18% de las emisiones de CO² por kilómetros.

Ahora si enfocamos el análisis a la variación de los parámetros obtenidos en los detectores, podemos observar lo siguiente:

| Detector | PK | Parámetros | Base | Propuesta |
|-----------|---------------|----------------------|-------|-----------|
| Sección | Todo el tramo | Velocidad (veh/h) | 53,11 | 62,25 |
| | | Densidad (veh/km) | 6,82 | 5,68 |
| | | % Cola | 54% | 52% |
| | | Adelantamientos (n°) | 894% | 447% |
| D1_Cheste | 76 + 650 | Velocidad (veh/h) | 64,48 | 64,36 |
| | | Densidad (veh/km) | 5,11 | 5,12 |
| | | % Cola | 41% | 41% |
| D2_Cheste | 77 + 921 | Velocidad (veh/h) | 64,99 | 75,74 |
| | | Densidad (veh/km) | 5,23 | 4,43 |
| | | % Cola | 58% | 48% |
| D3_Cheste | 80 + 251 | Velocidad (veh/h) | 61,04 | 61,63 |
| | | Densidad (veh/km) | 5,98 | 5,80 |
| | | % Cola | 58% | 56% |
| D4_Cheste | 82 + 251 | Velocidad (veh/h) | 69,73 | 69,74 |
| | | Densidad (veh/km) | 5,35 | 5,26 |
| | | % Cola | 54% | 56% |
| D5_Cheste | 83 + 378 | Velocidad (veh/h) | 64,12 | 77,14 |
| | | Densidad (veh/km) | 5,77 | 4,69 |
| | | % Cola | 61% | 59% |

Tabla 114 Resultados de los detectores en el escenario base E1-2 y con propuesta E3-2.

Para facilitar el análisis se presentan graficas de las velocidad, densidad y porcentaje de vehículos en cola para los diferentes puntos kilométricos y escenarios.

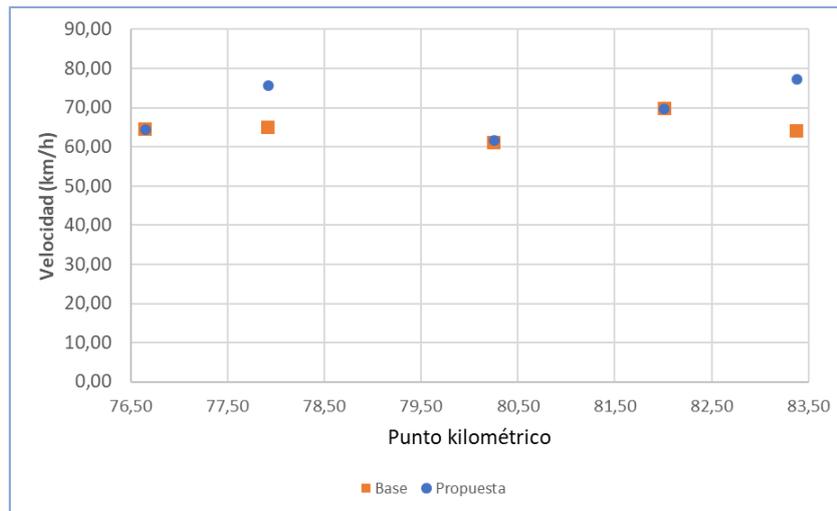


Fig. 124 Velocidad puntal del tramo en diferentes puntos kilómetros y escenarios

De los resultados de esta grafica se observa como la velocidad puntal ha aumentado en los puntos donde se han incorporado apartaderos. El aumento fue aproximadamente de 12 km/h al permitir que los ciclistas utilicen una infraestructura exclusiva permitiendo a los vehículos en cola rebasarlos sin necesidad de utilizar el carril contrario.

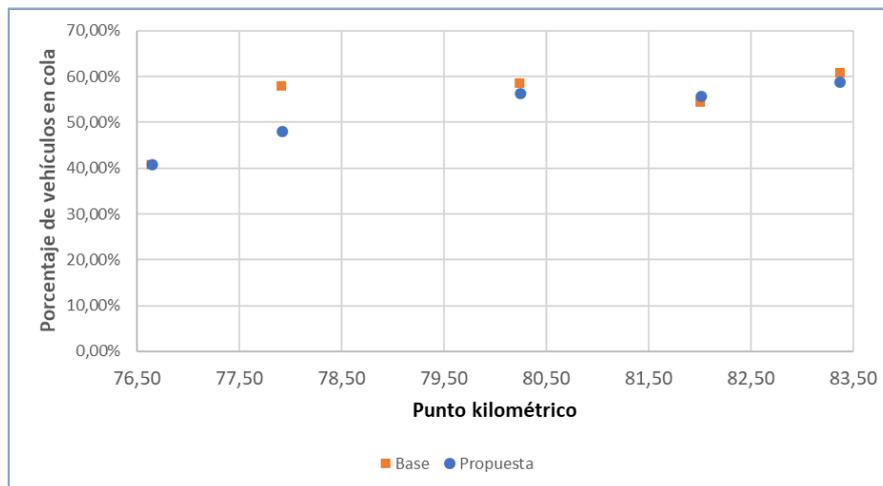


Fig. 125 Porcentaje de vehículos en cola en diferentes puntos kilómetros y escenarios

El porcentaje de vehículos en cola disminuye considerablemente producto de la creación del apartadero 1. En el caso del apartadero dos, disminuye levemente debido a que su dimensión es menor pero principalmente a que los vehículos motorizados incrementan considerablemente su velocidad disminuyendo el deseo de adelantamiento disminuye y, además, el último detector se encuentra más alejado del apartadero por lo que el efecto del apartadero ya se ve más mitigado.

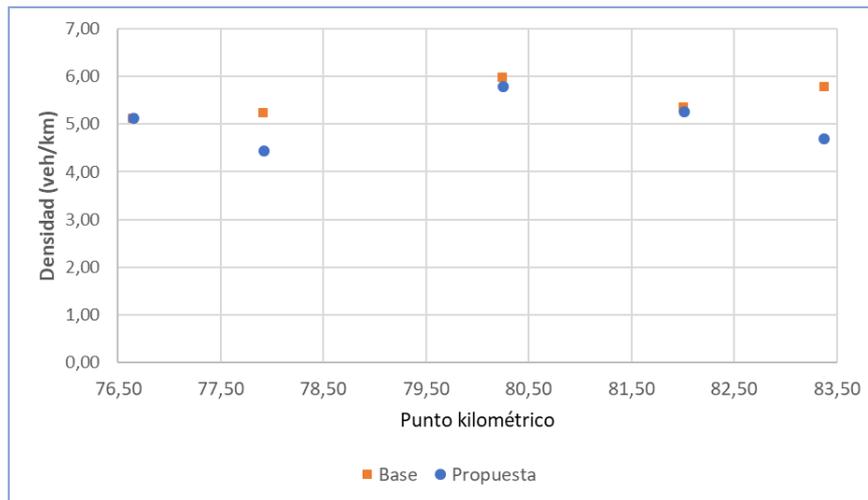


Fig. 126 Densidad (veh/km) en diferentes puntos kilómetros y escenarios

Aunque los porcentaje de vehículos en cola se ven levemente modificados la densidad en estos puntos es considerablemente menor, traduciéndose además en menores necesidades de adelantamiento por la elevación de las velocidades.

Para comprobar si la presencia de los apartaderos también mejora la funcionalidad en mayores intensidades de tráfico es que se han realizado nuevas modelaciones. A continuación, se comparará que efectos produce el aumento de la intensidad de tráfico en algunas medidas de desempeño.

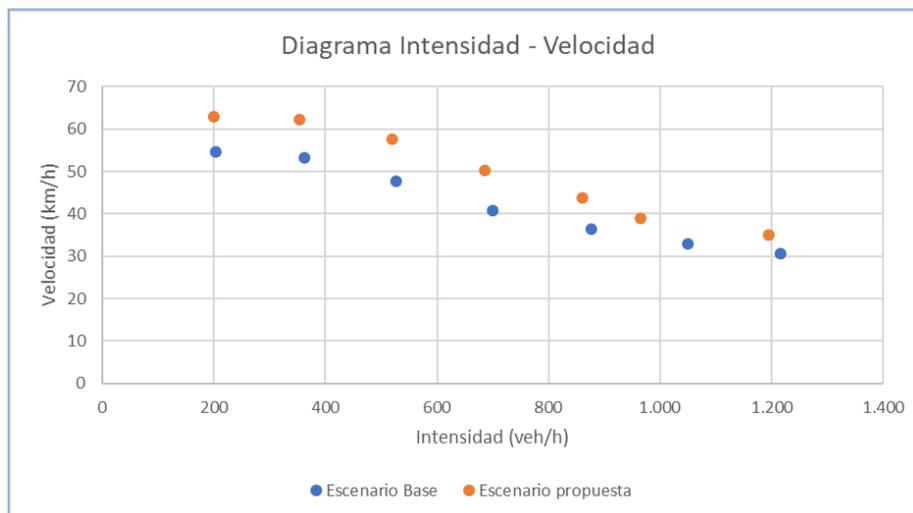


Fig. 127 Variación de la velocidad media de circulación variando la intensidad de tráfico en diferente escenarios

Se observa que la aplicación de apartaderos en la red presente mejoras en la funcionalidad del tramo de estudio generando aumento en las velocidades de circulación. Este aumento es más notorio a bajas intensidad ya que se presentan mayores libertades de circulación.

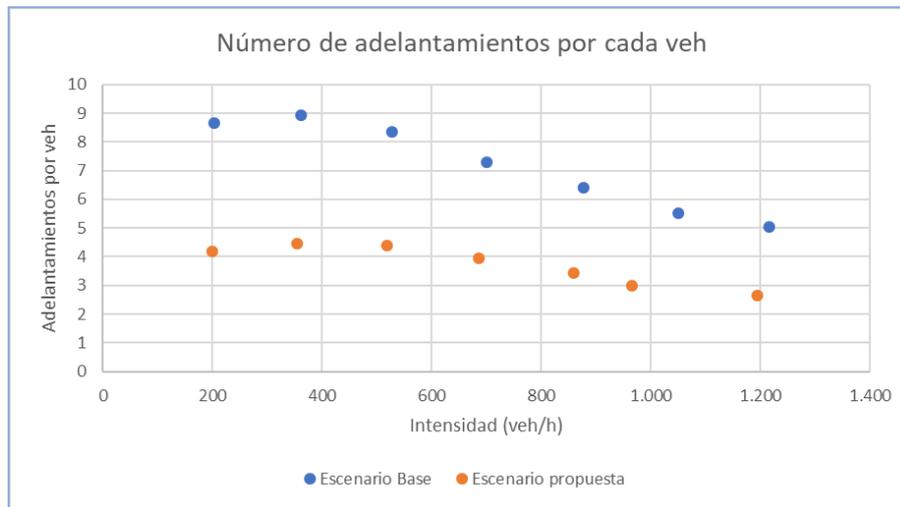


Fig. 128 Variación del número de adelantamientos variando la intensidad de tráfico en diferente escenarios.

Los resultados de este gráfico (fig. 128) muestran la gran diferencia en el número de adelantamientos. se puede observar la misma variación, es decir, se llega a una intensidad que el número de adelantamiento aumenta para luego comenzar a disminuir. Para los dos caso esta intensidad son los 400 veh/h, pero aun para la intensidad más elevada modelada el número de adelantamiento que se generan en el escenario sin apartadero es mayor a los produciendo para la menor intensidad en el escenario.

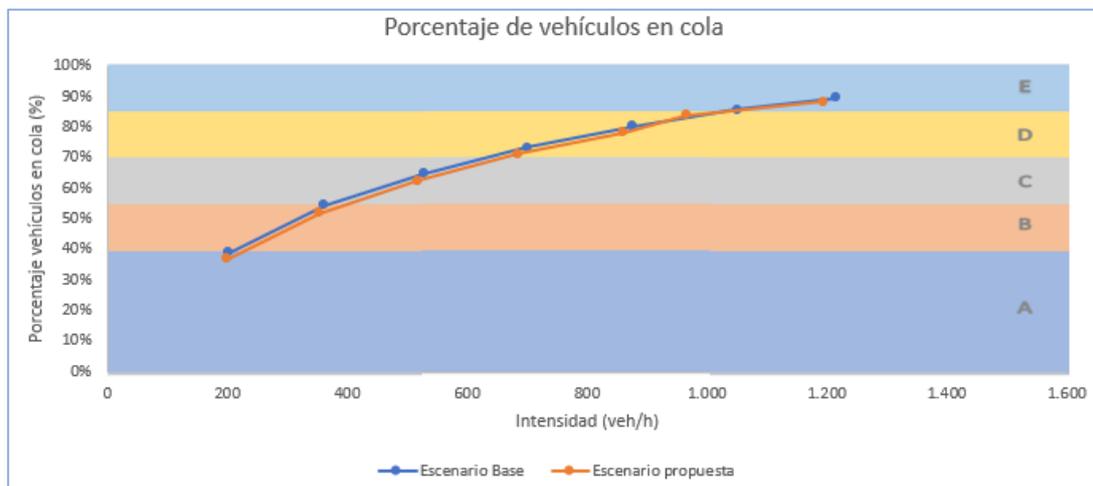


Fig. 129 Variación porcentaje de vehículos en cola variando la intensidad de tráfico en diferente escenarios.

Los porcentaje de vehículos en cola son la medida de desempeño que sufre una menor variación, por lo tanto, reafirma que es necesario la utilización de otras medidas de desempeño no consideradas en el HCM (2016) para la evaluación de la funcionalidad de la carretera, ya que, aunque los porcentaje de vehículos en cola se mantengan las velocidad de circulación, el número de adelantamientos y densidad son mejores traduciendo en una mayor calidad de circulación de los usuarios.



9. Conclusiones

El principal objetivo de este trabajo de investigación ha sido evaluar el impacto en la funcionalidad de las carreteras convencionales en entornos interurbanos debido a la presencia de tráfico ciclista mediante microsimulación. Esto se llevó a cabo a partir de observaciones naturalísticas y semi-naturalísticas (mediante el uso de bicicletas instrumentadas) que nos permitió estudiar la interacción de estos dos modos mediante el ingreso de esta información en el microsimulación Aimsun.

Respondiendo los objetivos de esta investigación se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Del estudio de siniestralidad de tráfico realizado en esta investigación podemos destacar que el 55% de todos los fallecidos en accidentes de tránsito se producen en carreteras convencionales y el 77% si es que nos restringimos al ámbito interurbano. Por otro lado, la actividad deportiva de ciclistas en carreteras convencionales ha aumentado en los últimos como lo demuestra el aumento en las licencias federativas, traduciéndose en un aumento de los usuarios vulnerables en las carreteras. En el año 2017, el 46% de los fallecidos fueron usuarios vulnerables (peatones, ciclistas, ciclomotores y motocicletas). Por tanto, al observar estos resultados se ve la necesidad de considerar soluciones amigables con todos los usuarios que permitan favorecer la convivencia de estos modos sin poner en peligro la vida de ningún usuario de las carreteras.
- Para conocer la inclusión del tráfico ciclista en la normativa de diferentes países se realizaron dos enfoques de investigación, uno enfocado netamente en la regulación a la circulación de los ciclistas y otro considerando la regulación que tiene los vehículos a motor cuando interactúan con ciclistas. La experiencia internacional que regula la circulación ciclista es independiente en cada país, aunque en muchos de este existe una similitud. Las normas de tráfico para los ciclistas se enfocan principalmente en garantizar su circulación de forma fácil y segura, como es la obligatoriedad de uso de casco, circulación debe mantenerse a la derecha de la calzada, en varios países se regula la edad mínima para montar bicicletas por vías públicas (entre 6 y 10 años dependiendo del país y si estos circulan acompañados). En el caso de la circulación de vehículos a motor con presencia de ciclista la principal regulación es la distancia lateral mínima para realizar el adelantamiento, variando desde un metro para países como Bélgica y Holanda hasta 2 metros en Alemania, además algunos países consideran que esta separación puede variar según donde se circula (urbano o interurbano) y dependiendo de las velocidades máximas. En el caso de España se exige una distancia lateral de 1,5 metros, no obstante, este criterio no carece de una base científica.
- La revisión del estado del arte pone de manifiesto la falta de investigación con base científica en el ámbito del ciclismo de carretera interurbanas, principalmente no se ha considerado la presencia de pelotones ciclistas, siendo una actividad actualmente en auge. Se abre así una ventana de



oportunidad para la investigación en el ámbito de la seguridad y la funcionalidad de carreteras convencionales con ciclistas

- En concreto, para el estudio se ha decidido trabajar con el programa informático de microsimulación Aimsun que cuenta con un modelo de adelantamientos en carreteras convencionales de España y permiten modelar a los ciclistas a nivel operativo.
- La propuesta modelada para mejorar la funcionalidad del tráfico ciclista en carreteras convencionales es un apartadero que permite que los pelotones ciclistas lo utilicen con exclusividad permitiendo que en ciertos puntos de la carretera exista la circulación de vehículos a motor y ciclistas sin interferencias. La longitud utilizada en esta investigación fue de 185 m utilizando las recomendaciones de AASTHO (2014) pero debido a que son recomendaciones para vehículos a motor se cree conveniente realizar una investigación a fondo del largo óptimo de esta propuesta.
- Aplicada la propuesta se pudo concluir que la incorporación de los apartaderos aumenta las velocidades media de circulación, reduce los tiempos de viaje, emisiones de CO², los vehículos por kilómetros, disminuye la cantidad de adelantamiento que realiza un vehículos, etc. traduciéndose en una mejora en la funcionalidad de la carretera, aunque los niveles de servicios estos dos escenario sea el mismo.

Respondiendo a las hipótesis planteadas las inicio de la investigación se concluye:

- La presencia de ciclista si supone una reducción en la velocidad media (30 km/h aprox. en el escenario base) y si afecta en los niveles de servicio, esto se observado para demandas mayores a 400 veh/h.
- La existencia de infraestructura exclusiva para ciclistas, en este caso la creación de apartaderos si produjo un amento en las velocidades media de circulación (7% el escenario base).
- El número de adelantamientos si genera un aumento en el número de adelantamiento principalmente por altas diferencia de las velocidades relativas observadas y modeladas.
- El tiempo de viaje si se ve afectado por la presencia de ciclista ya que la velocidad de circulación disminuye cerca de 30 km/h.
- Dependiendo de la configuración ciclista se observaron variaciones en los tiempos de adelantamiento comprobando la última hipótesis.
- El nivel de servicio de una carretera con presencia de ciclista no permite evaluar correctamente la funcionalidad de la carretera solamente con el PTSF debido a que este no presenta variaciones porque no permite ingresar este tipo de vehículos, es por esto, que es necesario incorporar otras medidas de desempeño como velocidad, numero de adelantamiento, porcentaje de vehículos en cola, entre otros. Comprobándose la hipótesis inicial.
- La disposición de apartaderos si mejora la funcionalidad de la carretera aumentando la velocidad media en 10 km/h y disminuyendo el número de adelantamiento a la mitad para el caso base. Comprobando la hipótesis inicial.



Además, una vez finalizado los trabajos se pueden extraer distintas conclusiones relacionadas con la metodología de toma de datos, resultados obtenidos, desarrollo de la microsimulación las cuales se desarrollan a continuación.

Conclusiones respecto a la toma de datos:

- Respecto a la metodología de toma de datos semi-naturalísticas se concluye que el uso de una bicicleta instrumentalizada, equipada con distanciómetros y velocímetros láser, así como cámaras de video y un receptor GPS presenta resultados fiables.
- A partir de las bicicletas instrumentadas se logró caracterizar la maniobra de adelantamiento a pelotones ciclistas, dando una buena respuesta la utilización generalmente dos bicicletas instrumentadas por configuración para permitir observar toda la maniobra. las características obtenidas fueron los tiempo de paso por diferentes puntos importante, velocidades relativas, separaciones laterales, invasión del carril opuesta, presencia de vehículos opuestos, etc. que facilitaron el trabajo de esta investigación.
- En el tramo de estudio caracterizó la maniobra de adelantamiento para 11 configuraciones diferentes: 10 ciclistas en línea, 10 ciclistas en paralelo, 6 en cola y 4 en fila, 4 en fila y 6 cola, 4 en cola y 4 ciclistas en línea, 4 ciclistas en paralelo, 2+1, 1+2, 2 ciclistas en línea, 2 ciclistas en paralelo y 1 ciclista individual. Considerando que las formaciones 6 PL + 4 SF y 4 SF + 6 PL son configuraciones de estudio, es decir, representan el movimiento de los pelotones de 10 ciclistas en la carretera por lo que no se han considerado para la modelación de los efecto en la funcionalidad.
- En total se realizaron aproximadamente 13,5 horas de observaciones realizadas con bicicletas instrumentadas que se traducen en 352 maniobras de adelantamiento de vehículos a motor a ciclistas las cuales fueron utilizadas para la creación de las bases de datos. Para las observaciones puntales que se utilizaron para caracterizar la demanda de vehicular y ciclistas se procesaron cerca de 19 horas de medición.
- En general se observó que las mayores velocidad de circulación de los pelotones se generan cuando menos bicicletas conforman el pelotón como es el caso de las bicicletas aisladas y la menores velocidad se obtienen para los 10 ciclistas circulando en línea. Hay que tener en cuenta que estos resultados están directamente relaciones las características físicas de los ciclistas, es decir, que las configuraciones realizadas durante la ultimas horas de medición pueden tener la variable de cansancio influyendo en los resultados. En general las velocidades obtenidas van desde los 18 km/h a los 30 km/h.
- Se observo que la presencia de meteorología adversa influye en la presencia de ciclistas en las carreteras.
- La configuración del pelotón influye en las velocidad de circulación, largos del pelotón y tiempos de adelantamiento.

Conclusiones respecto a la microsimulación:

- Casi ningún software comercial se ha centrado en la circulación e interacción de las bicicletas carreteras convencionales, sino únicamente en ciudad, donde las velocidades y distancias laterales son muy diferentes.
- El microsimulador Aimsun logro representar de manera fiable todas las



características geométricas y operacionales del tramo de estudio. Además, se logró replicar la presencia de diferentes pelotones ciclistas permitiendo estudiar la influencia de los ciclistas en carreteras convencionales.

- Un microsimulador de tráfico con una correcta calibración y validación permite reducir al mínimo las diferencias entre los valores observados y modelados y nos proporciona la capacidad del modelo de representar una variedad de situaciones, en este caso, modelar la presencia ciclistas para diferentes días de la semana.
- La metodología utilizada para la calibración y validación de los diferentes pelotones ciclistas entregó resultados sólidos y confiables ya que se cumplió que todos los resultados modeladas y observadas no presentaran diferencias significativas y se cumplió con minimizar el error cuadrático medio y valores de GEH menores a 5.
- Mediante la metodología se ha logrado calibrar y validar los tiempos de viaje y de adelantamiento de los pelotones considerando como variable de ingreso al programa la longitud y velocidad del vehículo.

Conclusiones del análisis de los resultado:

- La primera consideración antes de evaluar la funcionalidad del tramo de estudio fue necesario verificar si la metodología del HCM (2016) permite evaluar la presencia de ciclista. Esto se realizó comparando los resultado entregados por el microsimulación que consideraba en un escenario la presencia de ciclista y en el otro no. Este análisis reflejo que Aimsun si modela de manera correcta la circulación de vehículos a motor, pero no se asemejan los resultados cuando existe el presencia de ciclistas. Esto es debido a que el HCM (2016) se basa únicamente en los volúmenes de tráfico motorizado en ambos sentidos, así como en parámetros generales del diseño, como el porcentaje de zonas de adelantamiento permitido.
- Por esto, para evaluar la funcionalidad en esta investigación se aplicaron las recomendaciones de Moreno (2015) que incorpora como medidas de desempeño el número de adelantamiento, porcentaje de vehículos en cola, velocidades medias y además se incorporó la densidad.
- Las medidas de desempeño estudiadas determinan correctamente y en grado suficiente la calidad del tráfico de una carretera convencional, por tanto, se consideran buenas medidas de desempeño para caracterizar la funcionalidad.
- Para evaluar el impacto de la presencia ciclista es que se realizaron los mismo escenario, pero variando la presencia de estos. De estos resultados podemos concluir que realmente la presencia de ciclista afecta en la funcionalidad generando un aumento en el porcentaje de vehículos en cola, disminución de las velocidades, aumento en el número de adelantamientos por vehículos, aumento de las emisiones de CO² etc.
- Se observo que para una demanda de 400 veh/h en el tramo de estudio es cuando comienzan a presentar problemas en la funcionalidad de la carretera considerando que cambia de un nivel de servicio de B a C solo por la presencia de ciclistas.



- Analizados estos resultados se estimó conveniente la aplicación de una mejora en el tramo de estudio para evitar que la presencia ciclista dificulte la funcionalidad de la carretera.
- La aplicación práctica de esta investigación fue la creación de apartaderos que permita la circulación paralela de estos dos modos sin que ninguno pierda la preferencia de paso ni tendrá que modificar su velocidad por la presencia de un vehículo más lento. Los resultados de esta aplicación muestran como este punto permiten obtener velocidades medias de circulación mayores, una disminución considerable de los tiempos de viaje, disminución del CO² y del número de adelantamiento por vehículos entre otro. Esta solución también se evaluar para mayores demandas manteniendo buenos resultados.

En general las conclusiones de este estudio están limitadas a carreteras convencionales con características geométricas y operaciones similares al tramo de estudio.

10. Recomendaciones

Las recomendaciones para próximas investigaciones y que aportarían en el estudio de la interacción entre vehículos motorización y ciclistas son:

- Para la evaluación de la funcionalidad con presencia ciclista se estima conveniente que la metodología aplicada ya que nos permite evaluar el impacto que genera la presencia de ciclistas en carreteras convencionales ya que actualmente no existe ninguna metodología que incluya ciclistas en sus procedimientos.
- El proceso para estimar los tiempos de adelantamiento utilizados para la calibración y validación de este modelo dieron resultados satisfactoria, pero a la vista de lograr analizar mayor cantidad de maniobra se recomienda automatizar este proceso mediante la aplicación de macros o API dentro del mismo microsimulador.
- Serie interesante realizar nuevas tomas de datos con bicicletas instrumentadas en días diferentes a los realizados para ampliar el análisis sobre la maniobra de adelantamiento y que este resultado sea independiente al día de observación. Además, sería interesante realizar las tomas de datos en diferentes sentidos de circulación para analizar la variabilidad de los datos.
- Determinar el diseño óptimo de apartaderos considerando como base que serán utilizados solo por ciclistas. Además, de utilizar una señalización adecuada amigable con todo tipo de usuarios
- Realizar con la metodología planteada el efecto de las configuraciones en Cola y en Cabeza no consideradas en esta investigación. Además de ampliarla a otros tramos de carretera convencional con características similares.



11. Futuras líneas de investigación

Se muestran a continuación las futuras líneas de investigación que pueden suceder al desarrollo de esta investigación:

- Desarrollo de una metodología para el aforo de bicicletas en carreteras convencionales, incluyendo la determinación de factores de expansión que permitan estimar la IMD de las mismas de una carretera a partir de aforo manual y los datos de estaciones afines aforadas de forma automática.
- Incluir nuevas tecnologías que faciliten el conteo para obtener la demanda ciclista y de vehículos de forma más rápida. Esto supondría operar un volumen mayor de datos y sería posible realizar un análisis estadístico de las variables obtenidas.
- Realizar una caracterización detallada de conflictos que afectan a ciclistas, especialmente el adelantamiento por vehículos a motor.
- Desarrollo de un modelo de microsimulación para bicicletas e integración en un software de microsimulación de tráfico para carreteras convencionales que considere el adelantamiento en línea continua, que los tiempos de adelantamiento dependen del largo de los pelotones, los tiempos de recorrido del ciclistas dependen de las características de los pelotones, consideración de la distancia lateral exigida por la normativa.
- Desarrollo de una metodología que permita estimar la influencia de la presencia de ciclistas en los niveles de servicio.
- Caracterización de la influencia de la presencia de tráfico ciclista en la funcionalidad de una carretera convencional, considerando diversas tipologías de carretera convencional.
- Estudiar cómo influye en la funcionalidad la variación de las configuraciones ciclistas durante todo su recorrido.
- Determinación de criterios y recomendaciones de diseño geométrico y explotación de carreteras que supongan una mejora de la funcionalidad de estas ante la presencia de tráfico ciclista, sin menoscabo de su seguridad.



12. Agradecimientos

El desarrollo del presente trabajo de Fin de Máster no hubiera sido posible sin el apoyo y colación de:

- Este trabajo final de Máster (TFM) es el resultado de la colaboración del autor del proyecto Bike2lane - Mejora de la Seguridad y Operación de Carretera Convencionales con Ciclistas, con referencia TRA2016-80897-R, ". Este proyecto se está llevando a cabo gracias a la financiación obtenida en la convocatoria 2016 del Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016, del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.
- Aimsun Next por la facilitación de la licencia de la versión 8.4
- Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC) del Instituto de Transporte y Territorio de la Universitat Politècnica de Valencia.
- Agradecer finalmente por su gran labor de guía y apoyo durante todo el desarrollo de esta investigación a Grisela López Maldonado, como tutora y a Javier Camacho Torregrosa, como cotutor. Y también a Sara Moll por su continua participación y apoyo durante esta investigación.

13. Dedicatoria

A mi madre Luisa Latorre y Roberto, Christian y Luis Javier por siempre estar presenta a pesar de la distancia. Además, dedicar esta investigación a Carlos Albornoz porque sin él esta aventura no hubiera comenzado y porque juntos todo es mejor.

Gracias a todos los compañeros y ahora amigos que hicieron posible que esta experiencia sea inolvidable.



14. Referencias

AASHTO. (2004). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 5th Edition. <https://doi.org/10.1029/2004JC002361>.

AASHTO. (2011). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 6th Edition. <https://doi.org/10.1177/0361198118783162>.

AIMSUN. (2019). Aimsun Next software de modelado de tráfico | Aimsun. Recuperado 4 de febrero de 2019, de <https://www.aimsun.com/aimsun-next/>.

Asociación española de la Carretera. (2017). Seguridad en carreteras convencionales: un reto prioritario de cara al 2020.

Ata, M. ., & Langlois, R. . (2011). factoring cycling in transportation infraestructure; Design Considerations Based on Risk Exposure. Institute of Transportation Engineers, August 201,49-53.

Barceló, J. (2010). Fundamentals of Traffic Simulation. Springer (Vol. 8). <https://doi.org/10.1046/j.1440-1592.2003.00294.x>.

Bella, F., & Silvestri, M. (2017). Interaction driver–bicyclist on rural roads: Effects of cross-sections and road geometric elements. Accident Analysis & Prevention (Vol. 102). <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.03.008>.

Boufous, S., De Rome, L., Senserrick, T., & Ivers, R. (2012). Risk factors for severe injury in cyclists involved in traffic crashes in Victoria, Australia. Accident Analysis and Prevention, 49, 404–409. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.03.011>.

Camacho, F. J., Esparza, J. A., & Soriano, J. (2017). Capacidad y Nivel de Servicio en Carreteras Convencionales. Ingeniería de Tráfico, Universitat Politècnica de València.

Carrera Hueso, M. Á. (2014). La vulnerabilidad de los ciclistas: Tipología de los accidentes. La experiencia de arcones-bici en vías interurbanas y la edición del manual proyectar vías ciclistas.

Carrignon, D., & Buchanan, C. (2009). Assessment of the impact of cyclists on Heterogeneous traffic. Traffic Engineering and Control.

Carter, D. L., & Council, F. M. (2007). Factors Contributing to Pedestrian and Bicycle Crashes on Rural Highways. Transportation Research Board 86th Annual Meeting, (June), 1–20.

Centro de Descargas del CNIG (IGN). (2019). Recuperado 13 de febrero de 2019, de <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>.

Chapman, J., & Noyce, D. (2012). Observations of Driver Behavior During Overtaking of Bicycles on Rural Roads. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2321(2321), 38–45. <https://doi.org/10.3141/2321-06>.



- Chuang, K. H., Hsu, C. C., Lai, C. H., Doong, J. L., & Jeng, M. C. (2013). The use of a quasi-naturalistic riding method to investigate bicyclists' behaviors when motorists pass. *Accident Analysis and Prevention*. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.03.029>.
- Consejo Superior de Deporte. (2016). Licencias federados: Histórico 1941 - 2016, 694(1), 1–4.
- Consejo Superior de Deporte. (2017). Licencias y Clubes federados, 030(1).
- Corb, P. (2017). La accidentalidad ciclista en la red de carreteras de la diputación de Valencia'. VIII Congreso Nacional de Seguridad Vial , Valencia.
- Corin, R. J., He, L., & Dominy, R. G. (2008). A CFD investigation into the transient aerodynamic forces on overtaking road vehicle models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.03.006>.
- COWI. (2012). Micro simulation of bicycle traffic at peak hours. <https://doi.org/10.1089/cell.2010.0032>.
- Dickinson, H., Towner, J., Burkes, M., Hayes, M., Dowswell, T., & Towner, E. (2002). Bicycle Helmets - A review of their effectiveness: A critical review of the literature. Publication of: Department for Transport, (30), 96 p.
- Dirección General de Tráfico. (2010). Estrategia de Seguridad Vial 2011-2020.
- Dirección General de Tráfico. (2015). Guía para usuarios de la bicicleta.
- Dirección General de Tráfico. (2017a). Ruta Ciclista.
- Dirección General de Tráfico. (2017b). Siniestralidad Vial. Las principales cifras de Siniestralidad Vial.
- Dozza, M., Schindler, R., Bianchi-Piccinini, G., & Karlsson, J. (2016). How do drivers overtake cyclists? *Accident Analysis and Prevention*, 88, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.12.008>.
- Dozza, M., & Werneke, J. (2014). Introducing naturalistic cycling data: What factors influence bicyclists' safety in the real world? *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* (Vol. 24). <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.04.001>.
- Escuela de ciclismo Angelino Soler. (2001). Estudio sobre accidentalidad ciclista en España Período 1996-2001.
- European Commisión. (2019). Traffic rules and regulations for cyclists and their vehicles | Mobility and transport. Recuperado 15 de enero de 2019, de https://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/knowledge/pedestrians/special_regulations_for_pedestrians_and_cyclists/traffic_rules_and_regulations_for_cyclists_and_their_vehicles_en.



European Commission. (2018). Seguridad Vial, Movilidad y Transporte. Recuperado 20 de diciembre de 2018, de https://ec.europa.eu/transport/road_safety/users/cyclists_es.

European Cyclists' Federation. (2018). ¿Qué normas para ciclistas hay en Europa? - Circula Seguro. Recuperado 15 de enero de 2019, de <http://www.circulaseguro.com/que-normas-para-ciclistas-hay-en-europa/>.

Falkenberg, G., Blase, A., Bonfranchi, T., Cosse, L., Draeger, W., Vortisch, P., ... Zimmermann, A. (2003). Bemessung von Radverkehrsanlagen unter verkehrstechnischen Gesichtspunkten. Wirtschaftsverl. NW, Verlag für Neue Wiss.

Ferrer Pérez, V. (2017). Establecimiento de parámetros de riesgo para la seguridad de ciclistas durante las maniobras de adelantamiento en carreteras convencionales. Universitat Politècnica de València.

Fundación Línea Directa. (2018). Los accidentes de tráfico en los usuarios vulnerables: peatones, ciclistas y motoristas (2007-2016).

García, A. G., Ángel-Domènech, A., Lorca, C., Gómez, F. A., & Ferrer Pérez, V. (2015). Effects of road geometry on the interaction between cyclists and vehicles on two-lane rural highways. 5th International Symposium on Highway Geometric Design., (1), 17.

García, A., Gómez, F. A., Llorca, C., & Ángel-Domenech, A. (2015). Effect of width and boundary conditions on meeting maneuvers on two-way separated cycle tracks. Accident Analysis and Prevention. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.02.019>.

Generalitat Valenciana. (2016). Informe Anual 2016 sobre Seguridad Vial en Carreteras Autonómicas de la Generalitat, 1–7. <https://doi.org/10.1787/9789264097780-3-es>.

Generalitat Valenciana. (2017). Libro Blanco Protección de Ciclista de la Comunitat Valenciana. Comunidad Valenciana.

GESOP. (2017). Barómetro De La Bicicleta En España.

Glennon, J. C. (1988). New and improved model of passing sight distance on two-lane highways. Transportation Research Record, (1195), 132–137.

Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC). (2019). Mejora de la seguridad y operación de carreteras convencionales con ciclistas: Bike2lane, 26.

Harkey, D. L., & Stewart, J. R. (1997). Evaluation of Shared-Use Facilities for Bicycles and Motor Vehicles. Transportation Research Record, 1578(1), 111–118. <https://doi.org/10.3141/1578-14>.

Harwood, D. W., & Glennon, J. C. (1989). Passing Sight Distance Design for Passenger Cars and Trucks. Transportation Research Record, 1208(1), 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2012.07.035>.



- 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 PART A), 453–467. [https://doi.org/10.1016/0965-8564\(95\)00032-1](https://doi.org/10.1016/0965-8564(95)00032-1).
- HCM. (2016). Highway capacity manual 6th Edition.
- Helbing, D., & Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.4282>.
- Huang, L., & Wu, J. (2009). Cyclists' path planning behavioral model at unsignalized mixed traffic intersections in China. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. <https://doi.org/10.1109/MITS.2009.933859>.
- Huang, W., Fellendorf, M., & Schönauer, R. (2012). Social Force based Vehicle Model for Two-Dimensional Spaces. *Transportation Research Board 91st Annual Meeting*.
- Hunter, W. W. (1999). AN EVALUATION OF RED SHOULDERS AS A BICYCLE AND PEDESTRIAN FACILITY. *Association for the Advancement of Auto Medicine Proceedings*, 29–43. <https://doi.org/10.1145/3132847.3132886>.
- Imad, A.-Q., Tarek, S., Nasser, A., & Eyad, M. (2009). *Efficient Transportation and Pavement Systems. Characterization, Mechanisms, Simulation and Modeling* (Taylor y F). Filadelfia: Metropolitan Plan Making, Regional Science Research Institute. <https://doi.org/10.1201>.
- Isaksson-Hellman, I., & Werneke, J. (2017). Detailed description of bicycle and passenger car collisions based on insurance claims. *Safety Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.02.008>
- Kato, Y., Iwasa, T., Matsuda, M., & Miyai, Y. (1981). Aerodynamic Effects to a Bicycle Caused by a Passing Vehicle. *SAE International*. <https://doi.org/10.4271/811425>.
- Kay, J. J., Savolainen, P. T., Gates, T. J., & Datta, T. K. (2014). Driver behavior during bicycle passing maneuvers in response to a Share the Road sign treatment. *Accident Analysis and Prevention*. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.03.009>.
- Kramer, U. (2007). *Kraftfahrzeugführung*. Munich.
- Li, M., Shi, F., & Chen, D. (2011). Analyze bicycle-car mixed flow by social force model for collision risk evaluation. *Road Safety and Simulation*.
- LIANG, X., MAO, B., & XU, Q. (2012). Psychological-Physical Force Model for Bicycle Dynamics. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. [https://doi.org/10.1016/S1570-6672\(11\)60197-9](https://doi.org/10.1016/S1570-6672(11)60197-9).
- Liang, X., Ph, D., Xie, M., Ph, D., & Jia, X. (2018). New Microscopic Dynamic Model for Bicyclists' Riding Strategies, 144(8), 1–16. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000148>.



- Lieberman, E. B. (1982). Model for Calculating Safe Passing Distances on Two-Lane Rural Roads. *Transportation Research Record*, 1280, 70–76. <https://doi.org/10.1111/1468-0262.00399>.
- Lind, G., Schmidt, K., Andersson, H., Algers, S., Canepari, G., Taranto, C. Di, ... Gabard, J. (1999). SMARTTEST : Simulation Modelling Applied to Road Transport European Scheme Test. European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme, (May).
- Llorca, C., Garcia, A., & Torres, S. (2015). Naturalistic study on the speed of sports cyclists on two-lane rural roads. *Proceedings of the International Cycling Safety Conference 2015*, (September), 1–18.
- Llorca, Carlos. (2015). Análisis del adelantamiento en carreteras convencionales y propuesta de modelos para la mejora del diseño y de la señalización de las mismas.
- Llorca, Carlos, Angel-Domenech, A., Agustin-Gomez, F., & Garcia, A. (2017). Motor vehicles overtaking cyclists on two-lane rural roads: Analysis on speed and lateral clearance. *Safety Science*, 92, 302–310. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.11.005>.
- Llorca, Carlos, Moreno, A. T., Lenorzer, A., Casas, J., & Garcia, A. (2015). Development of a new microscopic passing maneuver model for two-lane rural roads. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.06.001>.
- López, G., & Moll, S. (2018). Cómo aumentar la seguridad ciclista en carreteras. Valencia.
- Love, D. C., Breaud, A., Burns, S., Margulies, J., Romano, M., & Lawrence, R. (2012). Is the three-foot bicycle passing law working in Baltimore, Maryland? *Accident Analysis and Prevention*, 48, 451–456. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.03.002>.
- Mallikarjuna, C., & Rao, K. R. (2009). Cellular Automata model for heterogeneous traffic. *Journal of Advanced Transportation*. <https://doi.org/10.1002/atr.5670430305>.
- Martí-Belda Bertolín, A. (2016). Análisis de la siniestralidad en ciclistas. 2008-2013. XII Congreso de Ingeniería del Transporte, UPV (Valencia), 0–7. <https://doi.org/10.1007/BF02798648>
- Michon, J. A. (1985). A Critical View of Driver Behavior Models: What Do We Know, What Should We Do? En *Human Behavior and Traffic Safety*. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2173-6_19.
- Ministerio de Educación Cultura y Deporte. (2018). Anuario de Estadísticas Deportivas.
- Ministerio de Fomento. (2016a). Norma 3.1 -Instrucción de Carreteras Trazado. B.O.E, 1–246. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.



- Ministerio de Fomento. (2016b). Red de carreteras española según competencia.
- Monterosso, L. (2015). Análisis de la funcionalidad de una carretera 2+1 mediante microsimulación.
- Moreno, A., Llorca, C., & García, A. (2017). Diseño de Zonas de Adelantamiento para la Mejora de la Seguridad y la Funcionalidad de Carreteras Convencionales.
- Moreno Chou, A. T. (2015). Análisis de la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales en función de la distribución y características de sus zonas de adelantamiento. Editorial Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain). <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/49618>.
- Nagel, K., & Schreckenberg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*. <https://doi.org/10.1051/jp1:1992277>.
- Noger, C., Regardin, C., & Széchényi, E. (2005). Investigation of the transient aerodynamic phenomena associated with passing manoeuvres. *Journal of Fluids and Structures* (Vol. 21). <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2005.05.013>.
- NZ Transport Agency. (2016). Investigating the feasibility of trialling a Minimum Overtaking Gap law for motorists overtaking cyclists in New Zealand.
- OMS. (2015). Global status report on road safety.
- Parkin, J., & Meyers, C. (2009). The effect of cycle lanes on the proximity between motor traffic and cycle traffic, 44(0).
- Parkin, J., Wardman, M., & Page, M. (2007). Models of perceived cycling risk and route acceptability. *Accident Analysis and Prevention*. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.08.007>.
- Pérez, A. M., López, G., Moll, S., & García, A. (2018). Drivers ' behaviour overtaking a bicycle peloton on two -lane rural roads, (October), 1–23.
- Picazo, R., & Jover, J. M. (2001). Señalización de vías ciclista en la Comunidad Valenciana.
- Polus, A., Livneh, M., & Frischer, B. (2000). Evaluation of the Passing Process on Two-Lane Rural Highways. *Transportation Research Record* (Vol. 1701). <https://doi.org/10.3141/1701-07>.
- Proulx R, F., Schneider J, R., & Miranda-Moreno F, L. (2016). Performance Evaluation and Correction Functions for Automated Pedestrian and Bicycle Counting Technologies. *Journal of Transportation Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000828](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000828).
- Quispe Chayña, E. R. (2016). Microsimulación de ciclistas empleando vissim 8. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23754.16323>.
- RACE. (2009). Situación actual del colectivo ciclista en España. NPR. April, 20.



Rambla Cerdá, N. (2017). Análisis de conflictos entre ciclistas y vehículos en glorietas de carreteras convencionales. Propuesta de mejoras y rediseño de glorieta en CV-500 entre P . K . 21 + 000, Provincia de Valencia.

Real Decreto Legislativo 6/2015. (2015). Real Decreto Legislativo 6/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial. En Boletín Oficial del Estado (pp. 1–39).

Reyes Latorre, K. (2014). Evaluación del impacto de la congestión no recurrente en redes de transporte urbano. Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.

Rilett, L. R., Hutchinson, B. G., & Whitney, M. (1990). Mechanics of the passing maneuver and the impact of large trucks. *Transportation Research Part A: General*, 24(2), 121–128. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(90\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0191-2607(90)90019-3).

Savolainen, P. T., Gates, T. J., Todd, R. G., Datta, T. K., & Morena, J. G. (2012). Lateral Placement of Motor Vehicles When Passing Bicyclists: Assessing Influence of Centerline Rumble Strips. *Transportation Research Record*, 2314(1), 14–21. <https://doi.org/10.3141/2314-03>.

Schleinitz, K., Petzoldt, T., Krems, J. F., & Gehlert, T. (2016). The influence of speed, cyclists' age, pedaling frequency, and observer age on observers' time to arrival judgments of approaching bicycles and e-bikes. *Accident Analysis and Prevention*. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.03.020>.

Schönauer, R., Stubenschrott, M., Huang, W., Rudloff, C., & Fellendorf, M. (2012). Modeling concepts for mixed traffic: Steps towards a microscopic simulation tool for shared space zones. *Transportation Research Board 91st Annual Meeting*. <https://doi.org/10.3141/2316-13>.

Strava. (2017). Año deportivo en España.

Tin Tin, S., Woodward, A., & Ameratunga, S. (2013). Incidence, risk, and protective factors of bicycle crashes: Findings from a prospective cohort study in New Zealand. *Preventive Medicine*, 57(3), 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2013.05.001>.

Transport Simulation Systems. (2014). *Aimsun 8 Manual*, (June).

Transportation Research Board (TRB). (2014). NCHRP Report 797. *Guidebook on Pedestrian and Bicycle Volume Data Collection (Vol. D)*. Washington, D.C. <https://doi.org/10.1111/ina.12046>.

Twaddle, H. (2014). Bicycles in Urban Areas, 140–146.

Twaddle, H., Schendzielorz, T., & Fakler, O. (2014). Bicycles in Urban Areas. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2434, 140–146. <https://doi.org/10.3141/2434-17>.

TYPSA. (2015). Caracterización de la accidentalidad ciclista 2011-2013 en la Red de Carreteras de la Generalitat Valenciana, (34), 1–3.



- USDOT FHWA. (1977). A Bikeway Criteria Digest. The ABCD S of Bikeways. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Valencia Alaix, V. G. (2016). Elaboración de procedimientos para facilitar el adelantamiento en carreteras convencionales aplicando simulación.
- Valkenburg, G. W. Van, & Michael, H. L. (1971). CRITERIA FOR NO-PASSING ZONES. Highway Research Record 377, 1–19.
- Vasic, J., & Ruskin, H. J. (2012). Cellular automata simulation of traffic including cars and bicycles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2011.12.018>.
- Von Stackelberg, H. (1934). Marktform und Gleichgewicht. <https://doi.org/10.2307/2224643>.
- Walker, I. (2007). Drivers overtaking bicyclists: Objective data on the effects of riding position, helmet use, vehicle type and apparent gender. *Accident Analysis and Prevention*, 39(2), 417–425. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.08.010>.
- Wang, Y., & Cartmell, M. P.. (1998). New model for passing sight distance on two-lane highways. *Journal of Transportation Engineering*, 124(6), 536–544. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1998\)124:6\(536\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1998)124:6(536)).
- Watts, G. R. (1979). BICYCLE SAFETY DEVICES - EFFECTS ON VEHICLE PASSING DISTANCES. Transport Research Laboratory Report number SR512, (November), 284.
- Weaver, & Glennon, J. C. (1972). Design and striping for safe passing operations. *Highway Research Record*, (390), 36–39.
- Yao, D., Zhang, Y., Li, L., Su, Y., Cheng, S., & Xu, W. (2009). Behavior modeling and simulation for conflicts in vehicles-bicycles mixed flow. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. <https://doi.org/10.1109/MITS.2009.933863>.



15. Anejos

15.1 Anejo I: Toma de datos

| Fecha | Mes | Día | Hora de inicio | Hora de fin | Duración | Flujo ciclista | |
|------------|----------|--------|----------------|-------------|----------|----------------|--------|
| | | | | | | Ingreso | Salida |
| 27-01-2018 | Enero | Sábado | 8:11:52 | 8:26:52 | 15:00 | 30 | 0 |
| | | | 8:26:52 | 8:41:52 | 15:00 | 8 | 6 |
| | | | 8:41:52 | 8:56:52 | 15:00 | 1 | 21 |
| | | | 8:56:52 | 9:11:52 | 15:00 | 15 | 15 |
| | | | 9:11:52 | 9:26:52 | 15:00 | 5 | 49 |
| | | | 9:26:52 | 9:41:52 | 15:00 | 64 | 22 |
| | | | 9:41:52 | 9:47:38 | 05:46 | 9 | 4 |
| | | | 9:47:38 | 9:59:22 | - | 0 | 0 |
| | | | 9:59:22 | 10:14:22 | 15:00 | 6 | 23 |
| | | | 10:14:22 | 10:16:10 | - | 0 | 3 |
| | | | 10:16:10 | 10:31:10 | 15:00 | 30 | 61 |
| | | | 10:31:10 | 10:46:10 | 15:00 | 20 | 18 |
| | | | 10:46:10 | 11:01:10 | 15:00 | 11 | 1 |
| | | | 11:01:10 | 11:16:10 | 15:00 | 12 | 29 |
| | | | 11:16:10 | 11:31:10 | 15:00 | 31 | 16 |
| 11:31:10 | 11:46:10 | 15:00 | 12 | 29 | | | |
| 11:46:10 | 12:01:10 | 15:00 | 8 | 36 | | | |
| 12:01:10 | 12:16:10 | 15:00 | 23 | 29 | | | |
| 12:16:10 | 12:23:30 | 07:20 | 1 | 6 | | | |
| 12-04-2018 | Abril | Jueves | 8:31:02 | 8:46:02 | 15:00 | 0 | 0 |
| | | | 8:46:02 | 9:01:02 | 15:00 | 1 | 0 |
| | | | 9:01:02 | 9:16:02 | 15:00 | 0 | 0 |
| | | | 9:16:02 | 9:31:02 | 15:00 | 0 | 1 |
| | | | 9:31:02 | 9:46:02 | 15:00 | 2 | 0 |
| | | | 9:46:02 | 10:01:02 | 15:00 | 0 | 1 |
| | | | 10:01:02 | 10:16:02 | 15:00 | 1 | 0 |
| | | | 10:16:02 | 10:31:02 | 15:00 | 0 | 0 |
| | | | 10:31:02 | 10:46:02 | 15:00 | 0 | 0 |
| | | | 10:46:02 | 11:01:02 | 15:00 | 1 | 2 |
| | | | 11:01:02 | 11:16:02 | 15:00 | 5 | 0 |
| 11:16:02 | 11:31:02 | 15:00 | 0 | 5 | | | |
| 11:31:02 | 11:39:00 | 07:58 | 3 | 1 | | | |
| 03-05-2018 | Mayo | Jueves | 8:52:30 | 9:07:30 | 15:00 | 1 | 0 |
| | | | 9:07:30 | 9:22:30 | 15:00 | 0 | 0 |
| | | | 9:22:30 | 9:37:30 | 15:00 | 5 | 3 |
| | | | 9:37:30 | 9:52:30 | 15:00 | 12 | 10 |
| | | | 9:52:30 | 10:07:30 | 15:00 | 0 | 1 |
| | | | 10:07:30 | 10:22:30 | 15:00 | 1 | 4 |
| | | | 10:22:30 | 10:37:30 | 15:00 | 0 | 1 |
| | | | 10:37:30 | 10:52:30 | 15:00 | 2 | 2 |
| | | | 10:52:30 | 11:07:30 | 15:00 | 12 | 4 |
| | | | 11:07:30 | 11:22:30 | 15:00 | 0 | 1 |
| | | | 11:22:30 | 11:37:30 | 15:00 | 11 | 0 |
| | | | 11:37:30 | 11:52:30 | 15:00 | 2 | 0 |
| 11:52:30 | 12:07:30 | 15:00 | 2 | 4 | | | |
| 12:07:30 | 12:14:07 | 06:37 | 2 | 0 | | | |
| 26-05-2018 | Mayo | Sábado | 8:30:46 | 8:45:46 | 15:00 | 6 | 4 |
| | | | 8:45:46 | 9:00:46 | 15:00 | 18 | 14 |
| | | | 9:00:46 | 9:15:46 | 15:00 | 27 | 22 |
| | | | 9:15:46 | 9:30:46 | 15:00 | 34 | 1 |
| | | | 10:35:20 | 10:50:20 | 15:00 | 8 | 28 |



Estudio de la interacción entre vehículos motorizados y ciclistas mediante microsimulación. Propuestas de mejoras de la CV-50 del PK 76+550 al PK 83+500 (Valencia).



| Fecha | Mes | Día | Hora de inicio | Hora de fin | Duración | Flujo ciclista | |
|------------|------------|--------|----------------|-------------|----------|----------------|--------|
| | | | | | | Ingreso | Salida |
| 21-08-2018 | Agosto | Martes | 10:50:20 | 11:05:20 | 15:00 | 1 | 16 |
| | | | 11:05:20 | 11:20:20 | 15:00 | 4 | 9 |
| | | | 11:20:20 | 11:35:20 | 15:00 | 2 | 5 |
| | | | 11:35:20 | 11:38:42 | 03:22 | 3 | 0 |
| | | | 7:49:00 | 8:04:00 | 15:00 | 2 | 0 |
| | | | 8:04:00 | 8:19:00 | 15:00 | 0 | 1 |
| | | | 8:19:00 | 8:34:00 | 15:00 | 0 | 8 |
| | | | 8:34:00 | 8:49:00 | 15:00 | 3 | 8 |
| | | | 8:49:00 | 9:04:00 | 15:00 | 0 | 3 |
| | | | 9:04:00 | 9:19:00 | 15:00 | 14 | 1 |
| | | | 9:19:00 | 9:34:00 | 15:00 | 9 | 14 |
| | | | 9:34:00 | 9:49:00 | 15:00 | 20 | 1 |
| | | | 9:49:00 | 10:04:00 | 15:00 | 0 | 3 |
| | | | 10:04:00 | 10:19:00 | 15:00 | 1 | 1 |
| 10:19:00 | 10:34:00 | 15:00 | 0 | 1 | | | |
| 10:34:00 | 10:49:00 | 15:00 | 2 | 4 | | | |
| 10:49:00 | 11:04:00 | 15:00 | 2 | 5 | | | |
| 11:04:00 | 11:15:00 | 11:00 | 0 | 3 | | | |
| 22-09-2018 | Septiembre | Sábado | 8:53:06 | 9:08:06 | 15:00 | 30 | 13 |
| | | | 9:08:06 | 9:23:06 | 15:00 | 43 | 11 |
| | | | 9:23:06 | 9:38:06 | 15:00 | 14 | 18 |
| | | | 9:38:06 | 9:48:22 | 10:16 | 6 | 0 |
| | | | 9:48:22 | 10:03:22 | 15:00 | 4 | 10 |
| | | | 10:03:22 | 10:18:22 | 15:00 | 14 | 11 |
| | | | 10:18:22 | 10:33:22 | 15:00 | 4 | 5 |
| | | | 10:33:22 | 10:48:22 | 15:00 | 3 | 23 |
| | | | 10:48:22 | 11:03:22 | 15:00 | 14 | 23 |
| | | | 11:03:22 | 11:18:22 | 15:00 | 7 | 11 |
| 11:18:22 | 11:33:22 | 15:00 | 4 | 7 | | | |
| 11:33:22 | 11:39:10 | 05:48 | 8 | 9 | | | |

Tabla 1 Aforos ciclistas realizados en el tramo de estudio agrupados cada 15 minutos

| Fecha | Mes | Día | Hora de inicio | Hora de fin | Entrada vehículos | | Salida vehículos | |
|------------|----------|---------|----------------|-------------|---------------------------|---------|------------------|---------|
| | | | | | Ligeros | Pesados | Ligeros | Pesados |
| 27-01-2018 | Enero | Sábado | 9:26:52 | 9:41:52 | 50 | 1 | 28 | 0 |
| 12-04-2018 | Abril | Jueves | 8:31:02 | 8:46:02 | 33 | 9 | 43 | 3 |
| | | | 8:46:02 | 9:01:02 | 27 | 8 | 55 | 7 |
| | | | 9:01:02 | 9:16:02 | 40 | 11 | 37 | 4 |
| | | | 9:16:02 | 9:31:02 | 29 | 9 | 54 | 4 |
| | | | 10:31:02 | 10:46:02 | Sin videos (Aforo Manual) | | | |
| | | | 10:46:02 | 11:01:02 | | | | |
| | | | 11:01:02 | 11:16:02 | | | | |
| 11:16:02 | 11:31:02 | | | | | | | |
| 11:31:02 | 11:39:00 | | | | | | | |
| 03-05-2018 | Mayo | Jueves | 9:37:30 | 9:52:30 | 32 | 3 | 37 | 7 |
| 26-05-2018 | Mayo | Sábado | 9:00:46 | 9:15:46 | 30 | 1 | 28 | 0 |
| 21-08-2018 | Agosto | Martes | 7:49:00 | 8:04:00 | 28 | 10 | 55 | 5 |
| | | | 8:04:00 | 8:19:00 | 23 | 7 | 31 | 4 |
| | | | 8:19:00 | 8:34:00 | 16 | 11 | 40 | 9 |
| | | | 8:34:00 | 8:49:00 | 30 | 5 | 40 | 5 |
| | | | 8:49:00 | 9:04:00 | 34 | 8 | 31 | 6 |
| | | | 9:04:00 | 9:19:00 | 31 | 8 | 44 | 2 |
| | | | 9:19:00 | 9:34:00 | 28 | 4 | 37 | 3 |
| | | | 9:34:00 | 9:49:00 | 28 | 7 | 41 | 5 |
| Septiembre | Sábado | 8:53:06 | 9:08:06 | 22 | 4 | 28 | 2 | |
| | | 9:08:06 | 9:23:06 | 30 | 2 | 23 | 0 | |



Estudio de la interacción entre vehículos motorizados y ciclistas mediante microsimulación. Propuestas de mejoras de la CV-50 del PK 76+550 al PK 83+500 (Valencia).



| Fecha | Mes | Día | Hora de inicio | Hora de fin | Entrada vehículos | | Salida vehículos | |
|------------|-----|-----|----------------|-------------|-------------------|---------|------------------|---------|
| | | | | | Ligeros | Pesados | Ligeros | Pesados |
| 22-09-2018 | | | 9:23:06 | 9:38:06 | 28 | 1 | 23 | 2 |
| | | | 9:38:06 | 9:48:22 | Sin videos | | | |
| | | | 9:48:22 | 10:03:22 | 43 | 2 | 36 | 0 |
| | | | 10:03:22 | 10:18:22 | 52 | 3 | 35 | 1 |
| | | | 10:18:22 | 10:33:22 | 48 | 5 | 44 | 3 |
| | | | 10:33:22 | 10:48:22 | 48 | 3 | 46 | 3 |
| | | | 10:48:22 | 11:03:22 | 35 | 1 | 41 | 1 |
| | | | 11:03:22 | 11:18:22 | 42 | 4 | 51 | 2 |
| | | | 11:18:22 | 11:33:22 | 34 | 1 | 49 | 1 |

Tabla 2 Aforos vehiculares realizados en el tramo de estudio agrupados cada 15 minutos.



Estudio de la interacción entre vehículos motorizados y ciclistas mediante microsimulación. Propuestas de mejoras de la CV-50 del PK 76+550 al PK 83+500 (Valencia).



| Configuración | N.º | ID | Vi relativa (m/s) | Vf relativa (m/s) | Vi bicicleta (m/s) | Vf bicicleta (m/s) | Inicio adelantamiento (H) | Fin adelantamiento (h) | Tiempo de viaje (s) | Tiempo adelantamiento (s) | Acceleración (m/s ²) | Longitud pelotón (m) |
|---------------|-----|------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------------|----------------------|
| LÍNEA | 10 | 2647 | 21,39 | 18,06 | 5,56 | 5,28 | 9:06:57,000 | 9:06:59,000 | 1.383,00 | 2,00 | -1,67 | 39,44 |
| LÍNEA | 10 | 2649 | 8,61 | 7,50 | 5,56 | 5,56 | 9:07:41,000 | 9:07:44,000 | 1.383,00 | 3,00 | -0,37 | 24,17 |
| LÍNEA | 10 | 2652 | 15,00 | 11,67 | 6,11 | 5,83 | 9:07:46,000 | 9:07:48,000 | 1.383,00 | 2,00 | -1,67 | 26,67 |
| LÍNEA | 10 | 2653 | 12,78 | 10,56 | 6,67 | 6,11 | 9:07:50,000 | 9:07:53,000 | 1.383,00 | 3,00 | -0,74 | 35,00 |
| LÍNEA | 10 | 2660 | 12,50 | 10,56 | 7,22 | 6,94 | 9:10:29,000 | 9:10:33,000 | 1.383,00 | 4,00 | -0,49 | 46,11 |
| LÍNEA | 10 | 2662 | 10,83 | 9,72 | 6,39 | 6,94 | 9:10:49,000 | 9:10:53,000 | 1.383,00 | 4,00 | -0,28 | 41,11 |
| LÍNEA | 10 | 2663 | 12,22 | 11,39 | 6,39 | 6,39 | 9:10:55,000 | 9:10:59,000 | 1.383,00 | 4,00 | -0,21 | 47,22 |
| LÍNEA | 10 | 2665 | 13,06 | 12,50 | 6,67 | 6,11 | 9:10:59,000 | 9:11:02,000 | 1.383,00 | 3,00 | -0,19 | 38,33 |
| LÍNEA | 10 | 2673 | 20,00 | 15,56 | 5,00 | 4,72 | 9:14:27,000 | 9:14:30,000 | 1.383,00 | 3,00 | -1,48 | 53,33 |
| LÍNEA | 10 | 2675 | 26,67 | 23,06 | 2,50 | 3,61 | 9:15:25,000 | 9:15:27,000 | 1.383,00 | 2,00 | -1,81 | 49,72 |
| LÍNEA | 10 | 2676 | 25,56 | 21,39 | 2,50 | 3,61 | 9:15:26,000 | 9:15:28,000 | 1.383,00 | 2,00 | -2,08 | 46,94 |
| LÍNEA | 10 | 2677 | 23,61 | 20,00 | 2,78 | 3,61 | 9:15:27,000 | 9:15:29,000 | 1.383,00 | 2,00 | -1,81 | 43,61 |
| LÍNEA | 10 | 2679 | 16,11 | 14,17 | 2,22 | 3,61 | 9:16:21,000 | 9:16:27,000 | 1.383,00 | 6,00 | -0,32 | 90,83 |
| LÍNEA | 10 | 2680 | 16,39 | 12,22 | 2,50 | 3,61 | 9:16:22,000 | 9:16:28,000 | 1.383,00 | 6,00 | -0,69 | 85,83 |
| LÍNEA | 10 | 2681 | 16,11 | 11,11 | 2,22 | 3,61 | 9:16:24,000 | 9:16:30,000 | 1.383,00 | 6,00 | -0,83 | 81,67 |
| LÍNEA | 10 | 2683 | 20,00 | 17,50 | 5,00 | 2,22 | 9:16:53,000 | 9:16:59,000 | 1.383,00 | 6,00 | -0,42 | 112,50 |
| LÍNEA | 10 | 2684 | 15,00 | 13,33 | 5,00 | 4,44 | 9:17:27,000 | 9:17:33,000 | 1.383,00 | 6,00 | -0,28 | 85,00 |
| LÍNEA | 10 | 2687 | 19,17 | 17,50 | 4,72 | 4,17 | 9:17:45,000 | 9:17:49,000 | 1.383,00 | 4,00 | -0,42 | 73,33 |
| LÍNEA | 10 | 2689 | 19,17 | 15,28 | 3,33 | 3,06 | 9:18:58,000 | 9:19:00,000 | 1.383,00 | 2,00 | -1,94 | 34,44 |
| LÍNEA | 10 | 2690 | 25,83 | 21,11 | 4,44 | 4,17 | 9:19:57,000 | 9:19:59,000 | 1.383,00 | 2,00 | -2,36 | 46,94 |
| LÍNEA | 10 | 2691 | 8,33 | 16,11 | 5,28 | 4,44 | 9:20:26,000 | 9:20:29,000 | 1.383,00 | 3,00 | 2,59 | 36,67 |
| LÍNEA | 10 | 2693 | 18,61 | 16,11 | 5,56 | 5,56 | 9:21:03,000 | 9:21:05,000 | 1.383,00 | 2,00 | -1,25 | 34,72 |
| LÍNEA | 10 | 2696 | 14,72 | 12,22 | 8,89 | 9,17 | 9:21:59,000 | 9:22:02,000 | 1.383,00 | 3,00 | -0,83 | 40,42 |
| LÍNEA | 10 | 2700 | 21,94 | 20,28 | 5,00 | 5,00 | 9:24:14,000 | 9:24:16,000 | 1.383,00 | 2,00 | -0,83 | 42,22 |
| LÍNEA | 10 | 2704 | 8,61 | 8,33 | 5,28 | 5,00 | 9:24:44,000 | 9:24:47,000 | 1.383,00 | 3,00 | -0,09 | 25,42 |
| LÍNEA | 10 | 2705 | 7,78 | 7,78 | 5,28 | 5,00 | 9:24:45,000 | 9:24:50,000 | 1.383,00 | 5,00 | 0,00 | 38,89 |
| LÍNEA | 10 | 2709 | 20,56 | 18,06 | 5,00 | 4,72 | 9:25:06,000 | 9:25:08,000 | 1.383,00 | 2,00 | -1,25 | 38,61 |
| LÍNEA | 10 | 2713 | 18,89 | 14,72 | 5,00 | 4,44 | 9:27:12,000 | 9:27:17,000 | 1.383,00 | 5,00 | -0,83 | 84,03 |
| LÍNEA | 10 | 2716 | 13,33 | 11,11 | 5,28 | 5,00 | 9:27:40,000 | 9:27:45,000 | 1.383,00 | 5,00 | -0,44 | 61,11 |
| LÍNEA | 10 | 2721 | 15,56 | 12,78 | 4,72 | 4,17 | 9:29:14,000 | 9:29:18,000 | 1.383,00 | 4,00 | -0,69 | 56,67 |
| LÍNEA | 10 | 2722 | 10,56 | 9,44 | 3,61 | 4,17 | 9:29:21,000 | 9:29:26,000 | 1.383,00 | 5,00 | -0,22 | 50,00 |
| LÍNEA | 10 | 2723 | 8,89 | 8,06 | 3,33 | 4,17 | 9:29:22,000 | 9:29:28,000 | 1.383,00 | 6,00 | -0,14 | 50,83 |
| LÍNEA | 10 | 2724 | 9,17 | 8,61 | 4,17 | 5,00 | 9:29:33,000 | 9:29:40,000 | 1.383,00 | 7,00 | -0,08 | 62,22 |
| LÍNEA | 10 | 2725 | 16,67 | 15,83 | 5,00 | 5,28 | 9:29:53,000 | 9:29:58,000 | 1.383,00 | 5,00 | -0,17 | 81,25 |
| LÍNEA | 10 | 2733 | 4,72 | 6,67 | 8,06 | 6,94 | 9:32:27,000 | 9:32:35,000 | 1.383,00 | 8,00 | 0,24 | 45,56 |



Estudio de la interacción entre vehículos motorizados y ciclistas mediante microsimulación. Propuestas de mejoras de la CV-50 del PK 76+550 al PK 83+500 (Valencia).



| Configuración | N.º | ID | Vi relativa (m/s) | Vf relativa (m/s) | Vi bicicleta (m/s) | Vf bicicleta (m/s) | Inicio adelantamiento (H) | Fin adelantamiento (h) | Tiempo de viaje (s) | Tiempo adelantamiento (s) | Aceleración (m/s ²) | Longitud pelotón (m) |
|---------------|-----|------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------|
| LÍNEA | 10 | 2736 | 10,28 | 8,89 | 6,94 | 6,39 | 9:32:33,000 | 9:32:39,000 | 1.383,00 | 6,00 | -0,23 | 57,50 |
| PARALELO | 10 | 2747 | 10,00 | 9,17 | 4,17 | 4,17 | 9:46:44,000 | 9:46:46,000 | 1.018,00 | 2,00 | -0,42 | 19,17 |
| PARALELO | 10 | 2750 | 16,94 | 15,00 | 4,44 | 4,44 | 9:47:14,000 | 9:47:15,000 | 1.018,00 | 1,00 | -1,94 | 15,97 |
| PARALELO | 10 | 2756 | 13,89 | 12,22 | 3,89 | 3,89 | 9:48:07,000 | 9:48:08,000 | 1.018,00 | 1,00 | -1,67 | 13,06 |
| PARALELO | 10 | 2762 | 14,17 | 11,11 | 3,61 | 3,61 | 9:49:55,000 | 9:49:57,000 | 1.018,00 | 2,00 | -1,53 | 25,28 |
| PARALELO | 10 | 2763 | 14,72 | 13,06 | 3,89 | 3,89 | 9:50:02,000 | 9:50:03,000 | 1.018,00 | 1,00 | -1,67 | 13,89 |
| PARALELO | 10 | 2765 | 3,33 | 6,67 | 4,72 | 4,72 | 9:50:15,000 | 9:50:17,000 | 1.018,00 | 2,00 | 1,67 | 10,00 |
| PARALELO | 10 | 2767 | 11,94 | 9,17 | 5,83 | 5,83 | 9:50:31,000 | 9:50:32,000 | 1.018,00 | 1,00 | -2,78 | 10,56 |
| PARALELO | 10 | 2768 | 13,06 | 10,56 | 5,83 | 6,11 | 9:50:32,000 | 9:50:34,000 | 1.018,00 | 2,00 | -1,25 | 23,61 |
| PARALELO | 10 | 2769 | 18,06 | 15,28 | 7,22 | 7,50 | 9:50:43,000 | 9:50:44,000 | 1.018,00 | 1,00 | -2,78 | 16,67 |
| PARALELO | 10 | 2787 | 11,11 | 9,17 | 8,61 | 8,61 | 9:53:57,000 | 9:53:59,000 | 1.018,00 | 2,00 | -0,97 | 20,28 |
| PARALELO | 10 | 2788 | 11,67 | 11,39 | 8,61 | 8,61 | 9:54:03,000 | 9:54:04,000 | 1.018,00 | 1,00 | -0,28 | 11,53 |
| PARALELO | 10 | 2793 | 18,33 | 15,83 | 5,00 | 5,00 | 9:55:11,000 | 9:55:12,000 | 1.018,00 | 1,00 | -2,50 | 17,08 |
| PARALELO | 10 | 2794 | 19,72 | 16,94 | 5,56 | 5,56 | 9:55:49,000 | 9:55:50,000 | 1.018,00 | 1,00 | -2,78 | 18,33 |
| PARALELO | 10 | 2796 | 14,72 | 14,17 | 6,67 | 6,94 | 9:56:14,000 | 9:56:15,000 | 1.018,00 | 1,00 | -0,56 | 14,44 |
| PARALELO | 10 | 2797 | 16,11 | 15,28 | 6,94 | 6,67 | 9:56:16,000 | 9:56:17,000 | 1.018,00 | 1,00 | -0,83 | 15,69 |
| PARALELO | 10 | 2799 | 7,78 | 7,50 | 3,61 | 3,61 | 9:56:31,000 | 9:56:33,000 | 1.018,00 | 2,00 | -0,14 | 15,28 |
| PARALELO | 10 | 2824 | 5,28 | 6,94 | 8,89 | 8,89 | 10:00:55,000 | 10:01:00,000 | 1.018,00 | 5,00 | 0,33 | 30,56 |
| PARALELO | 10 | 2842 | 8,06 | 9,17 | 7,50 | 6,94 | 10:04:42,000 | 10:04:45,000 | 1.018,00 | 3,00 | 0,37 | 25,83 |
| PARALELO | 10 | 2843 | 5,56 | 5,83 | 6,39 | 6,11 | 10:04:52,000 | 10:04:55,000 | 1.018,00 | 3,00 | 0,09 | 17,08 |
| PARALELO | 10 | 2846 | 17,22 | 14,44 | 7,78 | 7,78 | 10:06:27,000 | 10:06:29,000 | 1.018,00 | 2,00 | -1,39 | 31,67 |
| PARALELO | 10 | 2960 | 13,06 | 12,50 | 3,61 | 4,17 | 9:31:59,000 | 9:32:00,000 | 969,00 | 1,00 | -0,56 | 12,78 |
| PARALELO | 10 | 2965 | 14,17 | 11,94 | 3,61 | 4,17 | 9:33:36,000 | 9:33:37,000 | 969,00 | 1,00 | -2,22 | 13,06 |
| PARALELO | 10 | 2970 | 18,06 | 16,11 | 3,33 | 3,61 | 9:35:37,000 | 9:35:38,000 | 969,00 | 1,00 | -1,94 | 17,08 |
| PARALELO | 10 | 2972 | 16,67 | 16,11 | 3,61 | 3,89 | 9:35:44,000 | 9:35:45,000 | 969,00 | 1,00 | -0,56 | 16,39 |
| PARALELO | 10 | 2988 | 4,44 | 6,94 | 7,22 | 6,39 | 9:40:32,000 | 9:40:38,000 | 969,00 | 6,00 | 0,42 | 34,17 |
| PARALELO | 10 | 2989 | 11,67 | 11,67 | 6,11 | 6,39 | 9:41:05,000 | 9:41:08,000 | 969,00 | 3,00 | 0,00 | 35,00 |
| PARALELO | 10 | 3000 | 13,33 | 12,22 | 12,78 | 13,33 | 9:43:41,000 | 9:43:43,000 | 969,00 | 2,00 | -0,56 | 25,56 |
| PARALELO | 10 | 3013 | 6,11 | 7,50 | 9,17 | 8,33 | 9:46:41,000 | 9:46:44,000 | 969,00 | 3,00 | 0,46 | 20,42 |
| PARALELO | 10 | 3014 | 14,44 | 13,06 | 8,06 | 8,61 | 9:46:51,000 | 9:46:53,000 | 969,00 | 2,00 | -0,69 | 27,50 |
| PARALELO | 10 | 3015 | 6,39 | 8,06 | 8,33 | 7,78 | 9:47:10,000 | 9:47:14,000 | 969,00 | 4,00 | 0,42 | 28,89 |
| 1+2 | 3 | 601 | 5,28 | 15,56 | 6,11 | 6,11 | 12:10:06 | 12:10:08 | 1072 | 2,00 | 5,14 | 20,83 |
| 1+2 | 3 | 609 | 8,89 | 20,28 | 5,83 | 5,83 | 12:12:10 | 12:12:12 | 1072 | 2,00 | 5,69 | 29,17 |
| 1+2 | 3 | 615 | 12,22 | 12,78 | 6,67 | 6,11 | 12:13:33 | 12:13:35 | 1072 | 2,00 | 0,28 | 25,00 |
| 1+2 | 3 | 617 | 6,39 | 11,94 | 6,67 | 6,11 | 12:13:35 | 12:13:38 | 1072 | 3,00 | 1,85 | 27,50 |



Estudio de la interacción entre vehículos motorizados y ciclistas mediante microsimulación. Propuestas de mejoras de la CV-50 del PK 76+550 al PK 83+500 (Valencia).



| Configuración | N.º | ID | Vi relativa (m/s) | Vf relativa (m/s) | Vi bicicleta (m/s) | Vf bicicleta (m/s) | Inicio adelantamiento (H) | Fin adelantamiento (h) | Tiempo de viaje (s) | Tiempo adelantamiento (s) | Acceleración (m/s ²) | Longitud pelotón (m) |
|---------------|-----|------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------------|----------------------|
| 1+2 | 3 | 626 | 7,22 | 14,44 | 6,11 | 6,39 | 12:15:45 | 12:15:47 | 1072 | 2,00 | 3,61 | 21,67 |
| 1+2 | 3 | 629 | 17,50 | 16,94 | 6,11 | 6,11 | 12:16:05 | 12:16:07 | 1072 | 2,00 | -0,28 | 34,44 |
| 1+2 | 3 | 631 | 9,44 | 20,00 | 6,11 | 6,11 | 12:16:17 | 12:16:19 | 1072 | 2,00 | 5,28 | 29,44 |
| 1+2 | 3 | 639 | 16,39 | 16,94 | 5,28 | 5,28 | 12:19:00 | 12:19:02 | 1072 | 2,00 | 0,28 | 33,33 |
| 1+2 | 3 | 640 | 11,67 | 11,94 | 5,28 | 5,28 | 12:19:04 | 12:19:07 | 1072 | 3,00 | 0,09 | 35,42 |
| 1+2 | 3 | 642 | 20,00 | 18,89 | 5,28 | 5,28 | 12:19:11 | 12:19:13 | 1072 | 2,00 | -0,56 | 38,89 |
| 1+2 | 3 | 658 | 16,94 | 19,44 | 4,44 | 4,72 | 12:23:07 | 12:23:09 | 1072 | 2,00 | 1,25 | 36,39 |
| 1+2 | 3 | 675 | 15,00 | 10,28 | 4,17 | 4,44 | 12:27:07 | 12:27:09 | 1072 | 2,00 | -2,36 | 25,28 |
| 1+2 | 3 | 677 | 9,72 | 5,28 | 3,89 | 4,44 | 12:27:22 | 12:27:24 | 1072 | 2,00 | -2,22 | 15,00 |
| 1+2 | 3 | 678 | 12,50 | 4,72 | 4,72 | 4,44 | 12:27:29 | 12:27:32 | 1072 | 3,00 | -2,59 | 25,83 |
| 1+2 | 3 | 679 | 13,06 | 8,33 | 4,44 | 3,89 | 12:27:37 | 12:27:39 | 1072 | 2,00 | -2,36 | 21,39 |
| 1+2 | 3 | 681 | 6,11 | 6,39 | 4,17 | 4,17 | 12:27:46 | 12:27:49 | 1072 | 3,00 | 0,09 | 18,75 |
| 1+2 | 3 | 1597 | 5,00 | 5,00 | 5,83 | 5,28 | 11:47:39 | 11:47:40 | 1162 | 1,00 | 0,00 | 5,00 |
| 1+2 | 3 | 1605 | 13,33 | 13,33 | 5,83 | 5,83 | 11:49:03 | 11:49:04 | 1162 | 1,00 | 0,00 | 13,33 |
| 1+2 | 3 | 1617 | 3,33 | 3,33 | 6,67 | 6,67 | 11:51:22 | 11:51:23 | 1162 | 1,00 | 0,00 | 3,33 |
| 1+2 | 3 | 1621 | 4,17 | 4,17 | 6,11 | 6,11 | 11:52:24 | 11:52:25 | 1162 | 1,00 | 0,00 | 4,17 |
| 1+2 | 3 | 1678 | 7,78 | 7,78 | 9,44 | 9,44 | 12:02:29 | 12:02:30 | 1162 | 1,00 | 0,00 | 7,78 |
| 1+2 | 3 | 1703 | 7,22 | 7,22 | 5,56 | 5,56 | 12:06:51 | 12:06:52 | 1162 | 1,00 | 0,00 | 7,22 |
| 1+2 | 3 | 1706 | 6,11 | 6,11 | 4,72 | 4,72 | 12:07:41 | 12:07:42 | 1162 | 1,00 | 0,00 | 6,11 |
| 1+2 | 3 | 1716 | 4,72 | 4,72 | 8,89 | 8,89 | 12:11:36 | 12:11:37 | 1162 | 1,00 | 0,00 | 4,72 |
| 2+1 | 3 | 125 | 12,22 | 15,28 | 4,17 | 4,44 | 9:12:04 | 9:12:05 | 938 | 1,00 | 3,06 | 13,75 |
| 2+1 | 3 | 153 | 12,22 | 15,28 | 6,67 | 6,67 | 9:18:48 | 9:18:49 | 938 | 1,00 | 3,06 | 13,75 |
| 2+1 | 3 | 169 | 9,44 | 14,17 | 10,00 | 9,72 | 9:22:23 | 9:22:24 | 938 | 1,00 | 4,72 | 11,81 |
| 2+1 | 3 | 174 | 7,50 | 12,78 | 6,67 | 6,94 | 9:23:25 | 9:23:26 | 938 | 1,00 | 5,28 | 10,14 |
| 2+1 | 3 | 175 | 8,33 | 10,28 | 6,67 | 7,22 | 9:23:26 | 9:23:27 | 938 | 1,00 | 1,94 | 9,31 |
| 2+1 | 3 | 197 | 13,61 | 19,17 | 8,06 | 7,78 | 9:27:28 | 9:27:29 | 938 | 1,00 | 5,56 | 16,39 |
| 2+1 | 3 | 202 | 11,94 | 15,28 | 7,50 | 7,50 | 9:27:54 | 9:27:55 | 938 | 1,00 | 3,33 | 13,61 |
| 2+1 | 3 | 205 | 4,72 | 5,83 | 8,06 | 7,78 | 9:28:08 | 9:28:10 | 938 | 2,00 | 0,56 | 10,56 |
| 2+1 | 3 | 1095 | 13,89 | 21,39 | 5,83 | 5,83 | 9:20:44 | 9:20:45 | 895 | 1,00 | 7,50 | 17,64 |
| 2+1 | 3 | 1113 | 11,11 | 16,67 | 4,72 | 5,00 | 9:22:56 | 9:22:57 | 895 | 1,00 | 5,56 | 13,89 |
| 2+1 | 3 | 1121 | 7,78 | 12,50 | 6,94 | 6,67 | 9:24:37 | 9:24:38 | 895 | 1,00 | 4,72 | 10,14 |
| 2+1 | 3 | 1123 | 8,89 | 13,89 | 9,17 | 9,44 | 9:25:39 | 9:25:40 | 895 | 1,00 | 5,00 | 11,39 |
| 2+1 | 3 | 1144 | 7,50 | 15,83 | 6,94 | 7,50 | 9:29:41 | 9:29:44 | 895 | 3,00 | 2,78 | 35,00 |
| 2+1 | 3 | 1146 | 12,78 | 20,56 | 8,33 | 7,78 | 9:30:08 | 9:30:09 | 895 | 1,00 | 7,78 | 16,67 |
| 2+1 | 3 | 1147 | 13,33 | 20,83 | 8,06 | 7,78 | 9:30:09 | 9:30:10 | 895 | 1,00 | 7,50 | 17,08 |



Estudio de la interacción entre vehículos motorizados y ciclistas mediante microsimulación. Propuestas de mejoras de la CV-50 del PK 76+550 al PK 83+500 (Valencia).



| Configuración | N.º | ID | Vi relativa (m/s) | Vf relativa (m/s) | Vi bicicleta (m/s) | Vf bicicleta (m/s) | Inicio adelantamiento (H) | Fin adelantamiento (h) | Tiempo de viaje (s) | Tiempo adelantamiento (s) | Acceleración (m/s ²) | Longitud pelotón (m) |
|---------------|-----|------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------------|----------------------|
| 2+1 | 3 | 1154 | 9,44 | 7,78 | 9,17 | 9,44 | 9:31:30 | 9:31:31 | 895 | 1,00 | -1,67 | 8,61 |
| 2+1 | 3 | 1162 | 4,72 | 7,22 | 9,72 | 9,72 | 9:32:20 | 9:32:22 | 895 | 2,00 | 1,25 | 11,94 |
| 2+1 | 3 | 1178 | 6,39 | 11,11 | 8,06 | 7,78 | 9:34:18 | 9:34:19 | 895 | 1,00 | 4,72 | 8,75 |
| 2+1 | 3 | 1195 | 5,28 | 8,61 | 8,06 | 8,06 | 9:36:28 | 9:36:29 | 895 | 1,00 | 3,33 | 6,94 |
| 2+1 | 3 | 1197 | 6,94 | 11,67 | 8,33 | 8,33 | 9:36:59 | 9:37:00 | 895 | 1,00 | 4,72 | 9,31 |
| 2+1 | 3 | 1204 | 6,67 | 10,28 | 8,33 | 8,33 | 9:38:20 | 9:38:21 | 895 | 1,00 | 3,61 | 8,47 |
| 2+1 | 3 | 1206 | 5,83 | 9,44 | 8,33 | 8,33 | 9:38:27 | 9:38:28 | 895 | 1,00 | 3,61 | 7,64 |
| AL | 4 | 212 | 6,94 | 6,94 | 7,78 | 7,22 | 9:45:08 | 9:45:10 | 1154 | 2,00 | 0,00 | 13,89 |
| 4L | 4 | 219 | 9,44 | 8,61 | 6,94 | 6,67 | 9:46:05 | 9:46:06 | 1154 | 1,00 | -0,83 | 9,03 |
| 4L | 4 | 269 | 16,94 | 13,61 | 7,50 | 7,50 | 9:58:09 | 9:58:10 | 1154 | 1,00 | -3,33 | 15,28 |
| 4L | 4 | 270 | 9,17 | 7,22 | 7,50 | 7,78 | 9:58:14 | 9:58:15 | 1154 | 1,00 | -1,94 | 8,19 |
| 4L | 4 | 284 | 8,89 | 7,22 | 3,89 | 4,72 | 10:04:05 | 10:04:08 | 1154 | 3,00 | -0,56 | 24,17 |
| 4L | 4 | 285 | 10,83 | 9,17 | 3,89 | 5,00 | 10:04:07 | 10:04:10 | 1154 | 3,00 | -0,56 | 30,00 |
| 4L | 4 | 295 | 6,39 | 6,11 | 11,11 | 11,67 | 10:06:27 | 10:06:28 | 1154 | 1,00 | -0,28 | 6,25 |
| 4L | 4 | 300 | 4,72 | 6,11 | 10,00 | 9,44 | 10:07:35 | 10:07:39 | 1154 | 4,00 | 0,35 | 21,67 |
| 4F | 4 | 305 | 18,89 | 16,11 | 4,72 | 4,72 | 10:22:54 | 10:22:55 | 950 | 1,00 | -2,78 | 17,50 |
| 4F | 4 | 313 | 18,61 | 15,00 | 4,44 | 4,17 | 10:25:46 | 10:25:47 | 950 | 1,00 | -3,61 | 16,81 |
| 4F | 4 | 314 | 24,17 | 18,89 | 5,00 | 5,28 | 10:26:19 | 10:26:20 | 950 | 1,00 | -5,28 | 21,53 |
| 4F | 4 | 329 | 21,39 | 17,50 | 5,00 | 5,28 | 10:31:14 | 10:31:15 | 950 | 1,00 | -3,89 | 19,44 |
| 4F | 4 | 348 | 6,67 | 13,06 | 8,61 | 8,89 | 10:37:41 | 10:37:42 | 950 | 1,00 | 6,39 | 9,86 |
| 4F | 4 | 353 | 15,28 | 12,22 | 7,50 | 7,22 | 10:38:19 | 10:38:20 | 950 | 1,00 | -3,06 | 13,75 |
| 4F | 4 | 356 | 13,61 | 9,44 | 7,78 | 7,78 | 10:39:42 | 10:39:43 | 950 | 1,00 | -4,17 | 11,53 |
| 4F | 4 | 357 | 14,44 | 11,94 | 7,78 | 8,06 | 10:39:44 | 10:39:46 | 950 | 2,00 | -1,25 | 26,39 |
| 4F | 4 | 360 | 5,56 | 4,44 | 8,06 | 8,89 | 10:40:41 | 10:40:43 | 950 | 2,00 | -0,56 | 10,00 |
| 4F | 4 | 368 | 9,44 | 7,22 | 7,78 | 8,06 | 10:41:20 | 10:41:21 | 950 | 1,00 | -2,22 | 8,33 |
| 4F | 4 | 1342 | 8,06 | 5,83 | 12,50 | 12,78 | 10:49:10 | 10:49:12 | 813 | 2,00 | -1,11 | 13,89 |
| 4F | 4 | 1344 | 10,83 | 8,06 | 13,06 | 13,33 | 10:49:21 | 10:49:22 | 813 | 1,00 | -2,78 | 9,44 |
| 2L | 2 | 1 | 9,17 | 12,78 | -9,17 | 6,39 | 8:38:56 | 8:38:58 | 1134 | 2,00 | 1,81 | 21,94 |
| 2L | 2 | 4 | 10,00 | 12,50 | -10,00 | 6,39 | 8:39:06 | 8:39:09 | 1134 | 3,00 | 0,83 | 33,75 |
| 2L | 2 | 5 | 5,28 | 15,28 | -5,28 | 7,22 | 8:39:17 | 8:39:20 | 1134 | 3,00 | 3,33 | 30,83 |
| 2L | 2 | 10 | 3,61 | 9,44 | 7,50 | 7,50 | 8:39:31 | 8:39:34 | 1134 | 3,00 | 1,94 | 19,58 |
| 2L | 2 | 13 | 5,28 | 6,94 | 6,94 | 7,50 | 8:39:45 | 8:39:48 | 1134 | 3,00 | 0,56 | 18,33 |
| 2L | 2 | 14 | 5,56 | 8,61 | 6,94 | 7,22 | 8:39:50 | 8:39:53 | 1134 | 3,00 | 1,02 | 21,25 |
| 2L | 2 | 16 | 6,11 | 10,83 | 7,22 | 6,39 | 8:39:54 | 8:39:56 | 1134 | 2,00 | 2,36 | 16,94 |
| 2L | 2 | 31 | 13,06 | 20,00 | 7,50 | 7,50 | 8:42:47 | 8:42:49 | 1134 | 2,00 | 3,47 | 33,06 |



Estudio de la interacción entre vehículos motorizados y ciclistas mediante microsimulación. Propuestas de mejoras de la CV-50 del PK 76+550 al PK 83+500 (Valencia).



| Configuración | N.º | ID | Vi relativa (m/s) | Vf relativa (m/s) | Vi bicicleta (m/s) | Vf bicicleta (m/s) | Inicio adelantamiento (H) | Fin adelantamiento (h) | Tiempo de viaje (s) | Tiempo adelantamiento (s) | Acceleración (m/s ²) | Longitud pelotón (m) |
|---------------|-----|------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------------|----------------------|
| 2L | 2 | 32 | 18,89 | 22,78 | 6,94 | 7,22 | 8:42:51 | 8:42:53 | 1134 | 2,00 | 1,94 | 41,67 |
| 2L | 2 | 35 | 13,61 | 16,94 | 6,94 | 6,67 | 8:43:07 | 8:43:09 | 1134 | 2,00 | 1,67 | 30,56 |
| 2L | 2 | 51 | 12,22 | 16,39 | 5,28 | 5,56 | 8:46:00 | 8:46:01 | 1134 | 1,00 | 4,17 | 14,31 |
| 2L | 2 | 52 | 7,50 | 20,56 | 5,28 | 5,56 | 8:46:04 | 8:46:05 | 1134 | 1,00 | 13,06 | 14,03 |
| 2L | 2 | 53 | 19,44 | 26,39 | 5,83 | 6,11 | 8:46:24 | 8:46:25 | 1134 | 1,00 | 6,94 | 22,92 |
| 2L | 2 | 56 | 16,67 | 22,22 | 5,28 | 5,00 | 8:46:57 | 8:46:58 | 1134 | 1,00 | 5,56 | 19,44 |
| 2L | 2 | 73 | 10,28 | 13,33 | 8,61 | 8,33 | 8:53:00 | 8:53:02 | 1134 | 2,00 | 1,53 | 23,61 |
| 2L | 2 | 77 | 15,56 | 21,11 | 6,94 | 6,94 | 8:53:12 | 8:53:14 | 1134 | 2,00 | 2,78 | 36,67 |
| 2L | 2 | 79 | 21,11 | 25,83 | 5,56 | 5,56 | 8:54:13 | 8:54:14 | 1134 | 1,00 | 4,72 | 23,47 |
| 2L | 2 | 85 | 16,94 | 21,39 | 5,83 | 6,39 | 8:55:11 | 8:55:12 | 1134 | 1,00 | 4,44 | 19,17 |
| 2L | 2 | 91 | 17,50 | 23,33 | 5,56 | 5,56 | 8:56:57 | 8:56:58 | 1134 | 1,00 | 5,83 | 20,42 |
| 2L | 2 | 93 | 10,56 | 22,78 | 5,28 | 5,28 | 8:57:03 | 8:57:04 | 1134 | 1,00 | 12,22 | 16,67 |
| 2L | 2 | 94 | 19,17 | 25,00 | 5,28 | 5,28 | 8:57:15 | 8:57:16 | 1134 | 1,00 | 5,83 | 22,08 |
| 2L | 2 | 95 | 18,61 | 23,61 | 5,28 | 5,56 | 8:57:17 | 8:57:18 | 1134 | 1,00 | 5,00 | 21,11 |
| 2L | 2 | 98 | 9,72 | 17,78 | 3,33 | 3,61 | 8:58:14 | 8:58:16 | 1134 | 2,00 | 4,03 | 27,50 |
| 2L | 2 | 99 | 13,61 | 18,06 | 3,33 | 3,61 | 8:58:15 | 8:58:17 | 1134 | 2,00 | 2,22 | 31,67 |
| 2L | 2 | 101 | 12,50 | 17,50 | 3,61 | 3,33 | 8:58:27 | 8:58:29 | 1134 | 2,00 | 2,50 | 30,00 |
| 2L | 2 | 102 | 18,61 | 22,50 | 3,89 | 3,89 | 8:58:37 | 8:58:39 | 1134 | 2,00 | 1,94 | 41,11 |
| 2L | 2 | 104 | 18,89 | 23,89 | 5,83 | 6,67 | 8:59:09 | 8:59:10 | 1134 | 1,00 | 5,00 | 21,39 |
| 2L | 2 | 109 | 8,89 | 21,67 | 11,94 | 11,67 | 9:00:02 | 9:00:03 | 1134 | 1,00 | 12,78 | 15,28 |
| 2L | 2 | 1003 | 6,11 | 7,78 | 5,83 | 6,67 | 8:51:32 | 8:51:35 | 1135 | 3,00 | 0,56 | 20,83 |
| 2L | 2 | 1004 | 10,28 | 13,61 | 8,06 | 8,06 | 8:51:48 | 8:51:51 | 1135 | 3,00 | 1,11 | 35,83 |
| 2L | 2 | 1006 | 10,28 | 13,06 | 7,22 | 6,94 | 8:52:30 | 8:52:32 | 1135 | 2,00 | 1,39 | 23,33 |
| 2L | 2 | 1011 | 11,94 | 14,17 | 6,67 | 6,67 | 8:53:48 | 8:53:50 | 1135 | 2,00 | 1,11 | 26,11 |
| 2L | 2 | 1020 | 8,89 | 11,39 | 6,67 | 7,22 | 8:56:19 | 8:56:22 | 1135 | 3,00 | 0,83 | 30,42 |
| 2L | 2 | 1021 | 11,11 | 13,33 | 7,22 | 7,22 | 8:56:24 | 8:56:26 | 1135 | 2,00 | 1,11 | 24,44 |
| 2L | 2 | 1022 | 10,56 | 13,33 | 7,22 | 7,22 | 8:56:28 | 8:56:31 | 1135 | 3,00 | 0,93 | 35,83 |
| 2L | 2 | 1024 | 10,56 | 12,50 | 7,50 | 7,50 | 8:56:41 | 8:56:44 | 1135 | 3,00 | 0,65 | 34,58 |
| 2L | 2 | 1025 | 8,61 | 11,39 | 7,50 | 7,50 | 8:56:44 | 8:56:46 | 1135 | 2,00 | 1,39 | 20,00 |
| 2L | 2 | 1041 | 23,06 | 27,50 | 4,44 | 4,44 | 9:00:27 | 9:00:28 | 1135 | 1,00 | 4,44 | 25,28 |
| 2L | 2 | 1042 | 19,72 | 23,06 | 4,17 | 4,17 | 9:00:32 | 9:00:34 | 1135 | 2,00 | 1,67 | 42,78 |
| 2L | 2 | 1043 | 13,89 | 15,28 | 4,17 | 4,44 | 9:00:39 | 9:00:42 | 1135 | 3,00 | 0,46 | 43,75 |
| 2L | 2 | 1044 | 13,89 | 16,94 | 4,17 | 4,44 | 9:00:41 | 9:00:44 | 1135 | 3,00 | 1,02 | 46,25 |
| 2L | 2 | 1047 | 16,67 | 20,28 | 4,44 | 5,00 | 9:01:27 | 9:01:28 | 1135 | 1,00 | 3,61 | 18,47 |
| 2L | 2 | 1050 | 16,67 | 20,00 | 5,56 | 5,28 | 9:02:15 | 9:02:17 | 1135 | 2,00 | 1,67 | 36,67 |



Estudio de la interacción entre vehículos motorizados y ciclistas mediante microsimulación. Propuestas de mejoras de la CV-50 del PK 76+550 al PK 83+500 (Valencia).



| Configuración | N.º | ID | Vi relativa (m/s) | Vf relativa (m/s) | Vi bicicleta (m/s) | Vf bicicleta (m/s) | Inicio adelantamiento (H) | Fin adelantamiento (h) | Tiempo de viaje (s) | Tiempo adelantamiento (s) | Aceleración (m/s²) | Longitud pelotón (m) |
|---------------|-----|------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|--------------------|----------------------|
| 2L | 2 | 1052 | 18,61 | 20,28 | 5,56 | 5,56 | 9:03:29 | 9:03:31 | 1135 | 2,00 | 0,83 | 38,89 |
| 2L | 2 | 1056 | 17,22 | 20,83 | 6,94 | 6,94 | 9:04:31 | 9:04:32 | 1135 | 1,00 | 3,61 | 19,03 |
| 2L | 2 | 1059 | 5,83 | 11,11 | 8,33 | 8,06 | 9:05:12 | 9:05:16 | 1135 | 4,00 | 1,32 | 33,89 |
| 2L | 2 | 1060 | 8,61 | 11,94 | 8,33 | 8,06 | 9:05:14 | 9:05:18 | 1135 | 4,00 | 0,83 | 41,11 |
| 2L | 2 | 1061 | 13,89 | 16,94 | 7,78 | 7,50 | 9:05:28 | 9:05:31 | 1135 | 3,00 | 1,02 | 46,25 |
| 2L | 2 | 1062 | 13,89 | 18,61 | 7,50 | 6,94 | 9:05:31 | 9:05:34 | 1135 | 3,00 | 1,57 | 48,75 |
| 2L | 2 | 1069 | 10,83 | 13,06 | 6,11 | 6,11 | 9:09:00 | 9:09:02 | 1135 | 2,00 | 1,11 | 23,89 |
| 2L | 2 | 1078 | 13,06 | 17,78 | 5,28 | 5,28 | 9:11:08 | 9:11:10 | 1135 | 2,00 | 2,36 | 30,83 |
| 2L | 2 | 1080 | 15,83 | 21,39 | 5,00 | 5,00 | 9:11:25 | 9:11:27 | 1135 | 2,00 | 2,78 | 37,22 |
| 2L | 2 | 1084 | 11,11 | 12,78 | 11,11 | 11,39 | 9:12:55 | 9:12:56 | 1135 | 1,00 | 1,67 | 11,94 |
| individual | 1 | 486 | 25,83 | - | 5,83 | - | - | - | 760 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 490 | 13,89 | - | 11,67 | - | - | - | 760 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 492 | 18,33 | - | 10,83 | - | - | - | 760 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 501 | 11,39 | - | 13,06 | - | - | - | 760 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 502 | 15,28 | - | 10,56 | - | - | - | 760 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 503 | 14,44 | - | 10,56 | - | - | - | 760 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 514 | 10,56 | - | 8,06 | - | - | - | 760 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 515 | 10,56 | - | 8,33 | - | - | - | 760 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 518 | 15,83 | - | 9,72 | - | - | - | 760 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 523 | 8,33 | - | 7,50 | - | - | - | 760 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 524 | 8,61 | - | 7,22 | - | - | - | 760 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 525 | 5,56 | - | 6,94 | - | - | - | 760 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 531 | 11,11 | - | 8,33 | - | - | - | 760 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 532 | 23,06 | - | 8,06 | - | - | - | 760 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 540 | 24,72 | - | 5,28 | - | - | - | 842 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 545 | 25,56 | - | 4,72 | - | - | - | 842 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 546 | 16,94 | - | 5,56 | - | - | - | 842 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 551 | 20,83 | - | 5,83 | - | - | - | 842 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 555 | 12,78 | - | 6,67 | - | - | - | 842 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 556 | 13,33 | - | 6,67 | - | - | - | 842 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 559 | 5,56 | - | 8,89 | - | - | - | 842 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 560 | 8,89 | - | 9,44 | - | - | - | 842 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 563 | 6,94 | - | 10,28 | - | - | - | 842 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 567 | 19,17 | - | 10,56 | - | - | - | 842 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 570 | 9,44 | - | 8,89 | - | - | - | 842 | - | - | 1,70 |



Estudio de la interacción entre vehículos motorizados y ciclistas mediante microsimulación. Propuestas de mejoras de la CV-50 del PK 76+550 al PK 83+500 (Valencia).



| Configuración | N.º | ID | Vi relativa (m/s) | Vf relativa (m/s) | Vi bicicleta (m/s) | Vf bicicleta (m/s) | Inicio adelantamiento (H) | Fin adelantamiento (h) | Tiempo de viaje (s) | Tiempo adelantamiento (s) | Aceleración (m/s ²) | Longitud pelotón (m) |
|---------------|-----|------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------|
| individual | 1 | 578 | 18,06 | - | 9,17 | - | - | - | 842 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 585 | 14,44 | - | 8,06 | - | - | - | 842 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 589 | 11,11 | - | 9,17 | - | - | - | 842 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 1466 | 15,00 | - | 7,22 | - | - | - | 828 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 1471 | 10,28 | - | 6,11 | - | - | - | 828 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 1474 | 2,78 | - | 5,56 | - | - | - | 828 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 1475 | 15,56 | - | 9,44 | - | - | - | 828 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 1480 | 16,11 | - | 8,61 | - | - | - | 828 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 1481 | 10,83 | - | 9,72 | - | - | - | 828 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 1482 | 10,83 | - | 9,44 | - | - | - | 828 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 1484 | 12,22 | - | 10,00 | - | - | - | 828 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 1485 | 14,44 | - | 10,00 | - | - | - | 828 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 1489 | 16,67 | - | 6,67 | - | - | - | 828 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 1512 | 3,06 | - | 8,06 | - | - | - | 828 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 1536 | 9,17 | - | 8,61 | - | - | - | 828 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 1543 | 6,39 | - | 6,67 | - | - | - | 794 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 1547 | 22,22 | - | 6,39 | - | - | - | 794 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 1548 | 23,06 | - | 6,67 | - | - | - | 794 | - | - | 1,70 |
| individual | 1 | 1554 | 11,94 | - | 5,56 | - | - | - | 794 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 369 | 8,06 | - | 5,83 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 380 | 8,06 | - | 7,22 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 383 | 8,33 | - | 6,67 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 384 | 12,50 | - | 6,94 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 387 | 12,22 | - | 6,67 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 396 | 14,44 | - | 6,94 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 401 | 14,72 | - | 6,11 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 405 | 15,28 | - | 6,11 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 419 | 6,39 | - | 4,44 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 420 | 6,11 | - | 4,17 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 433 | 18,06 | - | 6,11 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 437 | 14,72 | - | 6,67 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 444 | 20,00 | - | 5,83 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 446 | 20,56 | - | 6,11 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 448 | 8,33 | - | 5,56 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 452 | 15,28 | - | 5,28 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |



Estudio de la interacción entre vehículos motorizados y ciclistas mediante microsimulación. Propuestas de mejoras de la CV-50 del PK 76+550 al PK 83+500 (Valencia).



| Configuración | N.º | ID | Vi relativa (m/s) | Vf relativa (m/s) | Vi bicicleta (m/s) | Vf bicicleta (m/s) | Inicio adelantamiento (H) | Fin adelantamiento (h) | Tiempo de viaje (s) | Tiempo adelantamiento (s) | Aceleración (m/s ²) | Longitud pelotón (m) |
|---------------|-----|------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------|
| 2F | 2 | 455 | 13,89 | - | 5,56 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 456 | 22,78 | - | 5,56 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 458 | 16,67 | - | 7,22 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 463 | 20,83 | - | 8,06 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 464 | 14,44 | - | 9,44 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 470 | 11,11 | - | 7,78 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 471 | 10,56 | - | 7,78 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 473 | 9,72 | - | 7,50 | - | - | - | 1139 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1387 | 5,28 | - | 6,11 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1388 | 6,67 | - | 6,11 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1391 | 13,61 | - | 6,67 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1392 | 10,83 | - | 7,22 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1395 | 8,61 | - | 6,67 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1396 | 11,67 | - | 6,94 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1397 | 11,94 | - | 7,22 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1401 | 10,83 | - | 7,22 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1408 | 8,33 | - | 7,22 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1409 | 12,78 | - | 7,78 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1410 | 17,22 | - | 7,78 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1413 | 15,83 | - | 7,22 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1420 | 14,17 | - | 7,78 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1421 | 13,61 | - | 7,50 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1422 | 13,33 | - | 7,50 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1425 | 6,94 | - | 6,94 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1431 | 41,94 | - | 6,39 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1436 | 11,39 | - | 5,83 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1438 | 19,72 | - | 6,11 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1442 | 13,06 | - | 7,22 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1444 | 18,61 | - | 8,33 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1446 | 18,89 | - | 7,22 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1453 | 11,39 | - | 7,50 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1458 | 19,17 | - | 5,83 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |
| 2F | 2 | 1459 | 15,56 | - | 5,56 | - | - | - | 953 | - | - | 1,70 |

Tabla 3 Base de datos observaciones semi-naturalísticas según configuración de los pelotones (Elaboración propia)



Estudio de la interacción entre vehículos motorizados y ciclistas mediante microsimulación. Propuestas de mejoras de la CV-50 del PK 76+550 al PK 83+500 (Valencia).



| Configuración | Sentido | Date | In_Idvideo | In_Hinicio | In_Hfin | Inicio tramo (video) | Fin tramo (video) | Inicio tramo | Fin tramo | Tiempo viaje |
|--------------------|-----------|------------|------------|------------|----------|----------------------|-------------------|--------------|-----------|--------------|
| LÍNEA | Norte-Sur | 18-11-2017 | VIRB0003 | 9:01:44 | 9:25:40 | 0:07:20 | 0:23:56 | 9:09:04 | 9:25:40 | 0:16:36 |
| LÍNEA | | | VIRB0004 | 9:25:39 | 9:33:38 | 0:00:00 | 0:06:27 | 9:25:39 | 9:32:06 | 0:06:27 |
| PARALELO | Sur-Norte | 18-11-2017 | VIRB0005 | 9:43:58 | 10:07:54 | 0:01:42 | 0:18:40 | 9:45:40 | 10:02:38 | 0:16:58 |
| PARALELO | | 19-11-2017 | VIRB0012 | 9:26:44 | 9:50:40 | 0:04:12 | 0:20:21 | 9:30:56 | 9:47:05 | 0:16:09 |
| individual | Sur-Norte | 03-05-2018 | VIRB0092 | 11:37:49 | 11:58:18 | 0:01:48 | 0:15:50 | 11:39:37 | 11:53:39 | 0:14:02 |
| | | 03-05-2018 | VIRB0241 | 11:37:44 | 11:55:38 | 0:01:22 | 0:14:02 | 11:39:06 | 11:51:46 | 0:12:40 |
| | | 04-05-2018 | VIRB0101 | 11:23:38 | 11:43:06 | 0:01:17 | 0:15:05 | 11:24:55 | 11:38:43 | 0:13:48 |
| | | 04-05-2018 | VIRB0251 | 11:21:05 | 11:38:40 | 0:00:59 | 0:14:13 | 11:22:04 | 11:35:18 | 0:13:14 |
| Dos en paralelo | Norte-Sur | 03-05-2018 | VIRB0239 | 11:11:02 | 11:34:58 | 0:04:25 | 0:23:24 | 11:15:27 | 11:34:26 | 0:18:59 |
| | | 03-05-2018 | VIRB0240 | 11:34:58 | 11:35:38 | 0:00:00 | 0:00:00 | 11:34:58 | 11:34:58 | 0:00:00 |
| | | 04-05-2018 | VIRB0250 | 10:58:34 | 11:20:08 | 0:04:36 | 0:20:28 | 11:03:10 | 11:19:02 | 0:15:52 |
| Dos en línea | Norte-Sur | 03-05-2018 | VIRB0083 | 8:36:50 | 9:00:46 | 0:05:15 | 0:23:56 | 8:42:05 | 9:00:46 | 0:18:41 |
| | | 03-05-2018 | VIRB0084 | 9:00:47 | 9:02:36 | 0:00:00 | 0:00:13 | 9:00:47 | 9:01:00 | 0:00:13 |
| | | 04-05-2018 | VIRB0094 | 8:50:25 | 9:14:22 | 0:06:42 | 0:25:37 | 8:57:07 | 9:16:02 | 0:18:55 |
| 1+2 | Norte-Sur | 03-05-2018 | VIRB0093 | 12:07:50 | 12:30:40 | 0:06:04 | 0:23:56 | 12:13:54 | 12:31:46 | 0:17:52 |
| | | 04-05-2018 | VIRB0252 | 11:45:41 | 12:09:38 | 0:06:07 | 0:23:57 | 11:51:48 | 12:09:38 | 0:17:50 |
| | | 04-05-2018 | VIRB0253 | 12:09:37 | 12:12:20 | 0:00:00 | 0:01:32 | 12:09:37 | 12:11:09 | 0:01:32 |
| 2+1 | Sur-Norte | 03-05-2018 | VIRB0085 | 9:06:18 | 9:28:58 | 0:03:01 | 0:18:39 | 9:09:19 | 9:24:57 | 0:15:38 |
| | | 04-05-2018 | VIRB0096 | 9:19:15 | 9:39:22 | 0:01:30 | 0:16:25 | 9:20:45 | 9:35:40 | 0:14:55 |
| Cuatro en paralelo | Sur-Norte | 03-05-2018 | VIRB0237 | 10:20:36 | 10:42:58 | 0:01:48 | 0:17:38 | 10:22:24 | 10:38:14 | 0:15:50 |
| | | 04-05-2018 | VIRB0249 | 10:35:39 | 10:57:08 | 0:03:29 | 0:17:02 | 10:39:08 | 10:52:41 | 0:13:33 |
| Cuatro en línea | Norte-Sur | 03-05-2018 | VIRB0235 | 9:42:58 | 10:06:54 | 0:05:03 | 0:23:56 | 9:48:01 | 10:06:54 | 0:18:53 |
| | | 03-05-2018 | VIRB0236 | 10:06:53 | 10:08:18 | 0:00:00 | 0:00:21 | 10:06:53 | 10:07:14 | 0:00:21 |
| | | 04-05-2018 | VIRB0247 | 9:55:33 | 10:19:30 | 0:07:48 | 0:23:57 | 10:03:21 | 10:19:30 | 0:16:09 |
| | | 04-05-2018 | VIRB0248 | 10:19:29 | 10:21:46 | 0:00:00 | 0:01:16 | 10:19:29 | 10:20:45 | 0:01:16 |

Tabla 4 Tiempo de viaje y velocidad de las diferentes configuraciones según sentido y día de observación (Elaboración propia)



15.2 Anejo II: Calibración del microsimulador

| Itera | Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón | largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|-------|----------|----------|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| 3 | 85,94 | 85,94 | 22,54 | 0,02042 | 1,16 | 1,95 | 0,47 | 0,36 |
| | 46,88 | 61,91 | 22,54 | 0,02042 | 2,31 | | 0,41 | |
| | 57,76 | 59,83 | 22,54 | 0,02042 | 2,03 | | 0,22 | |
| | 50,41 | 59,51 | 22,54 | 0,02042 | 2,27 | | 0,38 | |
| | 52,75 | 65,81 | 22,54 | 0,02042 | 2,00 | | 0,20 | |
| | 53,84 | 55,04 | 22,54 | 0,02042 | 2,30 | | 0,41 | |
| | 47,56 | 76,90 | 22,54 | 0,02042 | 1,85 | | 0,09 | |
| | 49,12 | 61,90 | 22,54 | 0,02042 | 2,23 | | 0,36 | |
| | 53,37 | 68,61 | 22,54 | 0,02042 | 1,91 | | 0,14 | |
| | 56,77 | 67,43 | 22,54 | 0,02042 | 1,86 | | 0,10 | |
| | 58,53 | 69,17 | 22,54 | 0,02042 | 1,78 | | 0,04 | |
| | 57,88 | 70,01 | 22,54 | 0,02042 | 1,78 | | 0,04 | |
| | 64,17 | 74,53 | 22,54 | 0,02042 | 1,57 | | 0,12 | |
| | 47,98 | 64,99 | 22,54 | 0,02042 | 2,17 | | 0,31 | |
| | 44,46 | 78,35 | 22,54 | 0,02042 | 1,89 | | 0,12 | |
| | 47,53 | 61,02 | 22,54 | 0,02042 | 2,32 | | 0,41 | |
| | 52,10 | 66,36 | 22,54 | 0,02042 | 2,00 | | 0,20 | |
| | 58,05 | 70,85 | 22,54 | 0,02042 | 1,75 | | 0,02 | |
| 52,71 | 63,20 | 22,54 | 0,02042 | 2,08 | 0,25 | | | |
| 60,61 | 71,73 | 22,54 | 0,02042 | 1,68 | 0,03 | | | |
| 5 | 85,94 | 85,94 | 22,54 | 0,01800 | 1,022 | 1,7270 | 0,60 | 0,26 |
| | 46,87 | 61,91 | 22,54 | 0,01800 | 2,034 | | 0,22 | |
| | 57,84 | 59,90 | 22,54 | 0,01800 | 1,784 | | 0,04 | |
| | 50,40 | 59,51 | 22,54 | 0,01800 | 1,999 | | 0,20 | |
| | 52,74 | 65,81 | 22,54 | 0,01800 | 1,764 | | 0,03 | |
| | 53,84 | 50,27 | 22,54 | 0,01800 | 2,195 | | 0,33 | |
| | 47,40 | 76,89 | 22,54 | 0,01800 | 1,636 | | 0,07 | |
| | 49,12 | 61,89 | 22,54 | 0,01800 | 1,966 | | 0,18 | |
| | 53,36 | 64,06 | 22,54 | 0,01800 | 1,791 | | 0,05 | |
| | 56,75 | 67,42 | 22,54 | 0,01800 | 1,639 | | 0,07 | |
| | 58,52 | 69,16 | 22,54 | 0,01800 | 1,569 | | 0,12 | |
| | 58,74 | 70,66 | 22,54 | 0,01800 | 1,537 | | 0,15 | |
| | 64,64 | 74,90 | 22,54 | 0,01800 | 1,372 | | 0,29 | |
| | 47,99 | 64,99 | 22,54 | 0,01800 | 1,908 | | 0,13 | |
| | 44,87 | 78,35 | 22,54 | 0,01800 | 1,658 | | 0,05 | |
| | 47,51 | 61,01 | 22,54 | 0,01800 | 2,043 | | 0,23 | |
| | 52,13 | 66,39 | 22,54 | 0,01800 | 1,765 | | 0,03 | |
| | 58,06 | 70,86 | 22,54 | 0,01800 | 1,546 | | 0,14 | |
| 52,72 | 63,20 | 22,54 | 0,01800 | 1,829 | 0,08 | | | |
| 60,61 | 71,75 | 22,54 | 0,01800 | 1,485 | 0,19 | | | |

Tabla 5 maniobras observadas en la calibración etapa II de la configuración 1+2



| Itera | Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón | largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|-------|----------|----------|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| 2 | 102,51 | 102,51 | 27,45 | 0,013 | 0,62 | 1,00 | 0,59 | 0,28 |
| | 76,68 | 77,01 | 27,45 | 0,013 | 0,94 | | 0,23 | |
| | 56,93 | 68,90 | 27,45 | 0,013 | 1,30 | | 0,12 | |
| | 64,57 | 76,94 | 27,45 | 0,013 | 1,07 | | 0,10 | |
| | 72,13 | 83,89 | 27,45 | 0,013 | 0,91 | | 0,25 | |
| | 54,19 | 77,77 | 27,45 | 0,013 | 1,20 | | 0,02 | |
| | 72,34 | 77,77 | 27,45 | 0,013 | 0,97 | | 0,20 | |
| | 54,94 | 68,14 | 27,45 | 0,013 | 1,36 | | 0,16 | |
| | 53,14 | 78,73 | 27,45 | 0,013 | 1,20 | | 0,03 | |
| | 71,32 | 82,71 | 27,45 | 0,013 | 0,93 | | 0,23 | |
| | 52,85 | 78,13 | 27,45 | 0,013 | 1,22 | | 0,04 | |
| | 72,74 | 84,64 | 27,45 | 0,013 | 0,90 | | 0,27 | |
| | 80,90 | 93,07 | 27,45 | 0,013 | 0,78 | | 0,40 | |
| | 52,02 | 77,49 | 27,45 | 0,013 | 1,24 | | 0,06 | |
| | 73,38 | 85,89 | 27,45 | 0,013 | 0,89 | | 0,28 | |
| | 63,54 | 75,57 | 27,45 | 0,013 | 1,10 | | 0,07 | |
| | 96,08 | 100,39 | 27,45 | 0,013 | 0,65 | | 0,54 | |
| 91,19 | 91,19 | 27,45 | 0,013 | 0,73 | 0,46 | | | |
| 3 | 102,51 | 102,51 | 27,44 | 0,015 | 0,72 | 1,1693 | 0,47 | 0,25 |
| | 78,87 | 78,90 | 27,44 | 0,015 | 1,05 | | 0,12 | |
| | 56,81 | 68,80 | 27,44 | 0,015 | 1,53 | | 0,30 | |
| | 63,81 | 76,19 | 27,44 | 0,015 | 1,27 | | 0,09 | |
| | 71,73 | 83,49 | 27,44 | 0,015 | 1,08 | | 0,09 | |
| | 54,12 | 77,77 | 27,44 | 0,015 | 1,40 | | 0,20 | |
| | 72,31 | 77,77 | 27,44 | 0,015 | 1,13 | | 0,04 | |
| | 54,85 | 68,06 | 27,44 | 0,015 | 1,59 | | 0,35 | |
| | 53,14 | 78,73 | 27,44 | 0,015 | 1,40 | | 0,20 | |
| | 71,29 | 82,67 | 27,44 | 0,015 | 1,09 | | 0,08 | |
| | 52,84 | 78,13 | 27,44 | 0,015 | 1,42 | | 0,22 | |
| | 72,74 | 84,63 | 27,44 | 0,015 | 1,05 | | 0,11 | |
| | 79,01 | 91,48 | 27,44 | 0,015 | 0,93 | | 0,23 | |
| | 51,99 | 77,47 | 27,44 | 0,015 | 1,45 | | 0,24 | |
| | 73,36 | 85,88 | 27,44 | 0,015 | 1,03 | | 0,13 | |
| | 63,54 | 75,57 | 27,44 | 0,015 | 1,28 | | 0,10 | |
| | 95,28 | 100,39 | 27,44 | 0,015 | 0,77 | | 0,41 | |
| 91,19 | 91,19 | 27,44 | 0,015 | 0,85 | 0,33 | | | |
| 4 | 102,51 | 102,51 | 27,44 | 0,015 | 0,72 | 1,1740 | 0,46 | 0,25 |
| | 78,88 | 78,89 | 27,44 | 0,015 | 1,05 | | 0,11 | |
| | 56,80 | 68,80 | 27,44 | 0,015 | 1,53 | | 0,31 | |
| | 63,81 | 76,19 | 27,44 | 0,015 | 1,27 | | 0,09 | |
| | 71,73 | 83,49 | 27,44 | 0,015 | 1,08 | | 0,09 | |
| | 54,12 | 77,77 | 27,44 | 0,015 | 1,41 | | 0,21 | |
| | 72,31 | 77,77 | 27,44 | 0,015 | 1,14 | | 0,03 | |
| | 54,85 | 68,06 | 27,44 | 0,015 | 1,59 | | 0,36 | |
| | 53,14 | 78,73 | 27,44 | 0,015 | 1,41 | | 0,21 | |
| | 71,29 | 82,67 | 27,44 | 0,015 | 1,09 | | 0,07 | |
| | 52,84 | 78,13 | 27,44 | 0,015 | 1,43 | | 0,22 | |
| | 72,72 | 84,63 | 27,44 | 0,015 | 1,06 | | 0,11 | |
| | 78,96 | 91,43 | 27,44 | 0,015 | 0,94 | | 0,23 | |
| | 51,99 | 77,46 | 27,44 | 0,015 | 1,45 | | 0,24 | |
| | 73,36 | 85,88 | 27,44 | 0,015 | 1,04 | | 0,13 | |
| | 63,54 | 75,57 | 27,44 | 0,015 | 1,29 | | 0,10 | |
| | 95,36 | 100,39 | 27,44 | 0,015 | 0,77 | | 0,41 | |
| 91,19 | 91,19 | 27,44 | 0,015 | 0,85 | 0,32 | | | |

Tabla 6 maniobras observadas en la calibración etapa II de la configuración 2+1



Estudio de la interacción entre vehículos motorizados y ciclistas mediante microsimulación. Propuestas de mejoras de la CV-50 del PK 76+550 al PK 83+500 (Valencia).



| Iteración | Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón | Largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE | | | |
|-----------|----------|----------|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|--------|------|------|
| 1 | 58,52 | 77,62 | 22,06 | 0,03 | 2,19 | 2,27 | 0,15 | 0,49 | | | |
| | 60,72 | 77,01 | 22,06 | 0,03 | 2,16 | | 0,12 | | | | |
| | 65,34 | 72,85 | 22,06 | 0,03 | 2,14 | | 0,11 | | | | |
| | 43,56 | 74,00 | 22,06 | 0,03 | 2,75 | | 0,50 | | | | |
| | 41,28 | 67,49 | 22,06 | 0,03 | 3,12 | | 0,71 | | | | |
| | 51,66 | 65,39 | 22,06 | 0,03 | 2,77 | | 0,51 | | | | |
| | 47,75 | 77,47 | 22,06 | 0,03 | 2,49 | | 0,34 | | | | |
| | 65,65 | 74,25 | 22,06 | 0,03 | 2,11 | | 0,09 | | | | |
| | 63,28 | 73,07 | 22,06 | 0,03 | 2,19 | | 0,14 | | | | |
| | 58,37 | 74,39 | 22,06 | 0,03 | 2,28 | | 0,20 | | | | |
| | 57,18 | 72,44 | 22,06 | 0,03 | 2,36 | | 0,26 | | | | |
| | 57,79 | 72,75 | 22,06 | 0,03 | 2,33 | | 0,24 | | | | |
| | 59,18 | 74,32 | 22,06 | 0,03 | 2,26 | | 0,19 | | | | |
| | 59,65 | 74,77 | 22,06 | 0,03 | 2,23 | | 0,17 | | | | |
| | 71,64 | 79,34 | 22,06 | 0,03 | 1,89 | | 0,07 | | | | |
| | 48,97 | 67,23 | 22,06 | 0,03 | 2,80 | | 0,53 | | | | |
| | 67,72 | 71,84 | 22,06 | 0,03 | 2,11 | | 0,09 | | | | |
| | 41,73 | 69,47 | 22,06 | 0,03 | 3,01 | | 0,65 | | | | |
| | 56,34 | 73,71 | 22,06 | 0,03 | 2,35 | | 0,25 | | | | |
| | 58,98 | 76,15 | 22,06 | 0,03 | 2,22 | | 0,16 | | | | |
| | 60,73 | 78,08 | 22,06 | 0,03 | 2,13 | | 0,10 | | | | |
| | 47,42 | 85,38 | 22,06 | 0,03 | 2,28 | | 0,20 | | | | |
| | 56,35 | 56,60 | 22,06 | 0,03 | 2,93 | | 0,61 | | | | |
| | 48,28 | 87,59 | 22,06 | 0,03 | 2,20 | | 0,15 | | | | |
| | 53,90 | 90,36 | 22,06 | 0,03 | 2,01 | | 0,02 | | | | |
| | 58,60 | 96,28 | 22,06 | 0,03 | 1,82 | | 0,12 | | | | |
| | 89,25 | 89,25 | 22,06 | 0,03 | 1,50 | | 0,36 | | | | |
| | 89,66 | 89,66 | 22,06 | 0,03 | 1,49 | | 0,37 | | | | |
| | 82,48 | 89,66 | 22,06 | 0,03 | 1,58 | | 0,30 | | | | |
| | 55,22 | 77,31 | 22,06 | 0,03 | 2,28 | | 0,21 | | | | |
| | 4 | 58,86 | 72,30 | 22,06 | 0,02 | | 2,03 | | 1,9850 | 0,03 | 0,36 |
| | | 61,04 | 72,36 | 22,06 | 0,02 | | 1,98 | | | 0,00 | |
| 65,68 | | 70,99 | 22,06 | 0,02 | 1,91 | 0,06 | | | | | |
| 43,56 | | 67,89 | 22,06 | 0,02 | 2,62 | 0,42 | | | | | |
| 41,28 | | 67,49 | 22,06 | 0,02 | 2,73 | 0,49 | | | | | |
| 51,66 | | 64,21 | 22,06 | 0,02 | 2,46 | 0,32 | | | | | |
| 47,75 | | 77,47 | 22,06 | 0,02 | 2,18 | 0,13 | | | | | |
| 65,62 | | 74,23 | 22,06 | 0,02 | 1,84 | 0,10 | | | | | |
| 63,27 | | 73,06 | 22,06 | 0,02 | 1,91 | 0,05 | | | | | |
| 58,37 | | 74,48 | 22,06 | 0,02 | 1,99 | 0,00 | | | | | |
| 57,18 | | 72,44 | 22,06 | 0,02 | 2,06 | 0,06 | | | | | |
| 57,78 | | 72,74 | 22,06 | 0,02 | 2,04 | 0,04 | | | | | |
| 59,22 | | 74,34 | 22,06 | 0,02 | 1,97 | 0,01 | | | | | |
| 59,66 | | 74,78 | 22,06 | 0,02 | 1,95 | 0,02 | | | | | |
| 72,08 | | 79,71 | 22,06 | 0,02 | 1,64 | 0,26 | | | | | |
| 48,97 | | 67,23 | 22,06 | 0,02 | 2,45 | 0,31 | | | | | |
| 70,07 | | 72,37 | 22,06 | 0,02 | 1,79 | 0,14 | | | | | |
| 41,73 | | 69,47 | 22,06 | 0,02 | 2,63 | 0,43 | | | | | |
| 56,34 | | 73,71 | 22,06 | 0,02 | 2,05 | 0,05 | | | | | |
| 58,99 | | 76,15 | 22,06 | 0,02 | 1,94 | 0,03 | | | | | |
| 60,73 | | 78,09 | 22,06 | 0,02 | 1,86 | 0,09 | | | | | |
| 47,42 | | 85,38 | 22,06 | 0,02 | 1,99 | 0,00 | | | | | |
| 56,37 | | 69,21 | 22,06 | 0,02 | 2,17 | 0,13 | | | | | |
| 48,28 | | 87,59 | 22,06 | 0,02 | 1,92 | 0,04 | | | | | |
| 53,93 | | 90,38 | 22,06 | 0,02 | 1,76 | 0,16 | | | | | |
| 71,90 | | 96,44 | 22,06 | 0,02 | 1,42 | 0,43 | | | | | |
| 89,25 | | 89,25 | 22,06 | 0,02 | 1,31 | 0,52 | | | | | |
| 89,66 | | 89,66 | 22,06 | 0,02 | 1,30 | 0,53 | | | | | |
| 83,31 | | 89,66 | 22,06 | 0,02 | 1,37 | 0,47 | | | | | |



| Iteración | Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón | Largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|-----------|----------|----------|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| 5 | 44,17 | 77,31 | 22,06 | 0,02 | 2,28 | 1,9826 | 0,20 | 0,36 |
| | 58,87 | 72,30 | 22,06 | 0,02 | 2,02 | | 0,03 | |
| | 61,04 | 72,36 | 22,06 | 0,02 | 1,97 | | 0,01 | |
| | 65,69 | 70,99 | 22,06 | 0,02 | 1,90 | | 0,06 | |
| | 43,56 | 67,89 | 22,06 | 0,02 | 2,62 | | 0,42 | |
| | 41,28 | 67,49 | 22,06 | 0,02 | 2,73 | | 0,48 | |
| | 51,66 | 64,21 | 22,06 | 0,02 | 2,46 | | 0,32 | |
| | 47,75 | 77,47 | 22,06 | 0,02 | 2,17 | | 0,13 | |
| | 65,62 | 74,23 | 22,06 | 0,02 | 1,84 | | 0,10 | |
| | 63,27 | 73,06 | 22,06 | 0,02 | 1,91 | | 0,05 | |
| | 58,37 | 74,48 | 22,06 | 0,02 | 1,99 | | 0,00 | |
| | 57,18 | 72,44 | 22,06 | 0,02 | 2,06 | | 0,05 | |
| | 57,78 | 72,74 | 22,06 | 0,02 | 2,04 | | 0,04 | |
| | 59,22 | 74,34 | 22,06 | 0,02 | 1,97 | | 0,01 | |
| | 59,66 | 74,78 | 22,06 | 0,02 | 1,95 | | 0,02 | |
| | 72,08 | 79,71 | 22,06 | 0,02 | 1,64 | | 0,26 | |
| | 48,97 | 67,23 | 22,06 | 0,02 | 2,44 | | 0,31 | |
| | 70,07 | 72,38 | 22,06 | 0,02 | 1,79 | | 0,14 | |
| | 41,73 | 69,47 | 22,06 | 0,02 | 2,63 | | 0,42 | |
| | 56,34 | 73,71 | 22,06 | 0,02 | 2,05 | | 0,05 | |
| | 58,99 | 76,15 | 22,06 | 0,02 | 1,94 | | 0,03 | |
| | 60,73 | 78,08 | 22,06 | 0,02 | 1,86 | | 0,09 | |
| | 47,42 | 85,38 | 22,06 | 0,02 | 1,99 | | 0,00 | |
| | 56,37 | 69,21 | 22,06 | 0,02 | 2,16 | | 0,13 | |
| | 48,28 | 87,59 | 22,06 | 0,02 | 1,92 | | 0,04 | |
| | 53,93 | 90,38 | 22,06 | 0,02 | 1,76 | | 0,16 | |
| | 71,91 | 96,44 | 22,06 | 0,02 | 1,42 | | 0,43 | |
| | 89,25 | 89,25 | 22,06 | 0,02 | 1,31 | | 0,52 | |
| | 89,66 | 89,66 | 22,06 | 0,02 | 1,30 | | 0,53 | |
| | 83,32 | 89,66 | 22,06 | 0,02 | 1,37 | | 0,48 | |
| | 44,172 | 77,31 | 22,06 | 0,02 | 2,28 | | 0,20 | |

Tabla 7 maniobras observadas en la calibración etapa II de la configuración 2L

| Iteración | Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón | Largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|-----------|----------|----------|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| 1 | 43,70 | 67,48 | 21,68 | 0,02 | 1,71 | 1,49 | 0,29 | 0,68 |
| | 74,45 | 79,04 | 21,68 | 0,02 | 1,05 | | 0,84 | |
| | 40,71 | 62,44 | 21,68 | 0,02 | 1,93 | | 0,12 | |
| | 59,00 | 66,14 | 21,68 | 0,02 | 1,41 | | 0,52 | |
| | 60,42 | 67,32 | 21,68 | 0,02 | 1,37 | | 0,55 | |
| | 82,83 | 72,25 | 21,68 | 0,02 | 1,04 | | 0,85 | |
| | 48,68 | 61,17 | 21,68 | 0,02 | 1,74 | | 0,26 | |
| | 54,08 | 58,00 | 21,68 | 0,02 | 1,68 | | 0,30 | |
| 2 | 43,86 | 67,59 | 21,68 | 0,02 | 2,46 | 2,16 | 0,24 | 0,36 |
| | 73,22 | 77,91 | 21,68 | 0,02 | 1,55 | | 0,41 | |
| | 40,71 | 68,18 | 21,68 | 0,02 | 2,55 | | 0,30 | |
| | 58,99 | 72,41 | 21,68 | 0,02 | 1,90 | | 0,14 | |
| | 60,40 | 73,39 | 21,68 | 0,02 | 1,85 | | 0,18 | |
| | 63,41 | 60,85 | 21,68 | 0,02 | 2,07 | | 0,02 | |
| | 48,68 | 61,17 | 21,68 | 0,02 | 2,51 | | 0,27 | |
| | 54,09 | 58,00 | 21,68 | 0,02 | 2,43 | | 0,22 | |
| 3 | 43,87 | 67,59 | 21,68 | 0,02 | 2,38 | 2,10 | 0,19 | 0,34 |
| | 73,35 | 78,03 | 21,68 | 0,02 | 1,50 | | 0,45 | |
| | 40,71 | 68,18 | 21,68 | 0,02 | 2,48 | | 0,25 | |
| | 58,99 | 72,41 | 21,68 | 0,02 | 1,84 | | 0,18 | |
| | 60,41 | 73,39 | 21,68 | 0,02 | 1,79 | | 0,22 | |
| | 63,52 | 60,94 | 21,68 | 0,02 | 2,00 | | 0,07 | |
| | 48,68 | 61,17 | 21,68 | 0,02 | 2,44 | | 0,23 | |
| | 54,09 | 58,00 | 21,68 | 0,02 | 2,36 | | 0,17 | |



Tabla 8 maniobras observadas en la calibración etapa II de la configuración 4L

| Iteración | Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón | Largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|-----------|----------|----------|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|--------|
| 1 | 52,29 | 64,68 | 26,82 | 0,01 | 1,69 | 1,13 | 0,25 | 0,38 |
| | 57,34 | 69,62 | 26,82 | 0,01 | 1,46 | | 0,07 | |
| | 92,57 | 92,57 | 26,82 | 0,01 | 0,81 | | 0,54 | |
| | 87,07 | 90,44 | 26,82 | 0,01 | 0,86 | | 0,48 | |
| | 52,74 | 78,64 | 26,82 | 0,01 | 1,38 | | 0,00 | |
| | 72,00 | 84,38 | 26,82 | 0,01 | 1,04 | | 0,30 | |
| | 74,44 | 86,43 | 26,82 | 0,01 | 1,00 | | 0,35 | |
| | 85,56 | 88,75 | 26,82 | 0,01 | 0,89 | | 0,46 | |
| | 50,39 | 73,94 | 26,82 | 0,01 | 1,51 | | 0,12 | |
| | 71,64 | 83,44 | 26,82 | 0,01 | 1,06 | | 0,29 | |
| | 83,70 | 71,51 | 26,82 | 0,01 | 1,05 | | 0,29 | |
| 91,61 | 91,61 | 26,82 | 0,01 | 0,83 | 0,52 | | | |
| 3 | 52,29 | 64,69 | 26,82 | 0,02 | 2,05 | 1,3818 | 0,51 | 0,3594 |
| | 54,71 | 67,55 | 26,82 | 0,02 | 1,89 | | 0,40 | |
| | 92,57 | 92,57 | 26,82 | 0,02 | 0,99 | | 0,36 | |
| | 86,44 | 89,54 | 26,82 | 0,02 | 1,06 | | 0,29 | |
| | 52,75 | 78,65 | 26,82 | 0,02 | 1,67 | | 0,24 | |
| | 71,99 | 84,37 | 26,82 | 0,02 | 1,26 | | 0,10 | |
| | 74,44 | 86,44 | 26,82 | 0,02 | 1,21 | | 0,15 | |
| | 85,16 | 88,75 | 26,82 | 0,02 | 1,08 | | 0,27 | |
| | 50,40 | 73,95 | 26,82 | 0,02 | 1,83 | | 0,36 | |
| | 71,66 | 83,46 | 26,82 | 0,02 | 1,28 | | 0,09 | |
| | 83,70 | 71,51 | 26,82 | 0,02 | 1,28 | | 0,09 | |
| 91,61 | 91,61 | 26,82 | 0,02 | 1,00 | 0,34 | | | |
| 4 | 52,29 | 64,69 | 26,82 | 0,02 | 2,04 | 1,376 | 0,51 | 0,3564 |
| | 54,72 | 67,56 | 26,82 | 0,02 | 1,88 | | 0,39 | |
| | 92,57 | 92,57 | 26,82 | 0,02 | 0,98 | | 0,36 | |
| | 86,46 | 89,87 | 26,82 | 0,02 | 1,05 | | 0,29 | |
| | 52,75 | 78,65 | 26,82 | 0,02 | 1,66 | | 0,23 | |
| | 71,99 | 84,37 | 26,82 | 0,02 | 1,26 | | 0,10 | |
| | 74,44 | 86,44 | 26,82 | 0,02 | 1,20 | | 0,15 | |
| | 83,17 | 88,75 | 26,82 | 0,02 | 1,09 | | 0,26 | |
| | 50,40 | 73,95 | 26,82 | 0,02 | 1,82 | | 0,36 | |
| | 71,66 | 83,47 | 26,82 | 0,02 | 1,27 | | 0,09 | |
| | 83,70 | 71,51 | 26,82 | 0,02 | 1,27 | | 0,09 | |
| 5 | 91,61 | 91,61 | 26,82 | 0,02 | 1,00 | 1,37526 | 0,35 | 0,3562 |
| | 52,29 | 64,69 | 26,82 | 0,02 | 2,03 | | 0,51 | |
| | 54,72 | 67,56 | 26,82 | 0,02 | 1,88 | | 0,39 | |
| | 92,57 | 92,57 | 26,82 | 0,02 | 0,98 | | 0,36 | |
| | 86,46 | 89,88 | 26,82 | 0,02 | 1,05 | | 0,29 | |
| | 52,75 | 78,65 | 26,82 | 0,02 | 1,66 | | 0,23 | |
| | 71,99 | 84,37 | 26,82 | 0,02 | 1,25 | | 0,10 | |
| | 74,44 | 86,44 | 26,82 | 0,02 | 1,20 | | 0,15 | |
| | 83,17 | 88,75 | 26,82 | 0,02 | 1,09 | | 0,26 | |
| | 50,40 | 73,95 | 26,82 | 0,02 | 1,82 | | 0,35 | |
| | 71,66 | 83,47 | 26,82 | 0,02 | 1,27 | | 0,09 | |
| 83,70 | 71,51 | 26,82 | 0,02 | 1,27 | 0,09 | | | |
| 91,61 | 91,61 | 26,82 | 0,02 | 0,99 | 0,35 | | | |

Tabla 9 maniobras observadas en la calibración etapa II de la configuración 4F



| Iteración | Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón | Largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|-----------|----------|----------|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|-------|
| 3 | 55,78 | 67,61 | 25,01 | 0,020 | 1,95 | 1,50 | 0,06 | 0,69 |
| | 47,26 | 67,32 | 25,01 | 0,020 | 2,22 | | 0,13 | |
| | 66,19 | 76,88 | 25,01 | 0,020 | 1,54 | | 0,37 | |
| | 98,01 | 98,01 | 25,01 | 0,020 | 0,98 | | 0,86 | |
| | 97,08 | 97,08 | 25,01 | 0,020 | 0,99 | | 0,84 | |
| | 94,33 | 103,24 | 25,01 | 0,020 | 0,97 | | 0,87 | |
| | 84,65 | 84,65 | 25,01 | 0,020 | 1,20 | | 0,65 | |
| | 74,45 | 84,65 | 25,01 | 0,020 | 1,31 | | 0,56 | |
| | 81,51 | 81,51 | 25,01 | 0,020 | 1,27 | | 0,60 | |
| | 90,16 | 90,16 | 25,01 | 0,020 | 1,10 | | 0,75 | |
| | 89,11 | 89,11 | 25,01 | 0,020 | 1,12 | | 0,73 | |
| | 50,21 | 75,41 | 25,01 | 0,020 | 1,89 | | 0,10 | |
| | 47,39 | 60,99 | 25,01 | 0,020 | 2,45 | | 0,28 | |
| | 81,41 | 69,23 | 25,01 | 0,020 | 1,42 | | 0,46 | |
| | 101,05 | 101,05 | 25,01 | 0,020 | 0,94 | | 0,89 | |
| | 55,35 | 90,06 | 25,01 | 0,020 | 1,50 | | 0,40 | |
| | 54,91 | 80,02 | 25,01 | 0,020 | 1,69 | | 0,25 | |
| | 73,36 | 94,68 | 25,01 | 0,020 | 1,21 | | 0,64 | |
| | 57,04 | 81,45 | 25,01 | 0,020 | 1,62 | | 0,31 | |
| | 61,20 | 85,31 | 25,01 | 0,020 | 1,48 | | 0,41 | |
| 49,11 | 85,22 | 25,01 | 0,020 | 1,70 | 0,24 | | | |
| 43,83 | 67,30 | 25,01 | 0,020 | 2,34 | 0,21 | | | |
| 4 | 43,34 | 72,63 | 25,01 | 0,027 | 2,95 | 1,878 | 0,58 | 0,49 |
| | 60,23 | 69,85 | 25,01 | 0,027 | 2,43 | | 0,26 | |
| | 92,26 | 92,26 | 25,01 | 0,027 | 1,44 | | 0,45 | |
| | 59,19 | 81,97 | 25,01 | 0,027 | 2,13 | | 0,07 | |
| | 71,03 | 88,63 | 25,01 | 0,027 | 1,77 | | 0,19 | |
| | 73,76 | 88,63 | 25,01 | 0,027 | 1,73 | | 0,22 | |
| | 75,32 | 88,63 | 25,01 | 0,027 | 1,71 | | 0,24 | |
| | 77,71 | 88,63 | 25,01 | 0,027 | 1,67 | | 0,27 | |
| | 48,12 | 82,29 | 25,01 | 0,027 | 2,42 | | 0,26 | |
| | 70,44 | 95,99 | 25,01 | 0,027 | 1,67 | | 0,27 | |
| | 47,24 | 80,58 | 25,01 | 0,027 | 2,50 | | 0,31 | |
| | 70,24 | 88,18 | 25,01 | 0,027 | 1,79 | | 0,17 | |
| | 87,73 | 87,73 | 25,01 | 0,027 | 1,55 | | 0,36 | |
| | 106,60 | 106,60 | 25,01 | 0,027 | 1,19 | | 0,66 | |
| | 111,53 | 100,31 | 25,01 | 0,027 | 1,20 | | 0,65 | |
| | 102,37 | 102,37 | 25,01 | 0,027 | 1,26 | | 0,61 | |
| | 50,69 | 86,65 | 25,01 | 0,027 | 2,23 | | 0,13 | |
| | 79,89 | 79,89 | 25,01 | 0,027 | 1,77 | | 0,19 | |
| | 79,89 | 79,89 | 25,01 | 0,027 | 1,77 | | 0,19 | |
| | 75,12 | 98,64 | 25,01 | 0,027 | 1,57 | | 0,34 | |
| 53,43 | 93,80 | 25,01 | 0,027 | 2,00 | 0,02 | | | |
| 45,42 | 79,89 | 25,01 | 0,027 | 2,58 | 0,36 | | | |
| 53,35 | 72,63 | 25,01 | 0,029 | 2,79 | 0,49 | | | |
| 6 | 60,25 | 69,87 | 25,01 | 0,029 | 2,65 | 2,032 | 0,40 | 0,466 |
| | 92,26 | 92,26 | 25,01 | 0,029 | 1,58 | | 0,34 | |
| | 59,20 | 81,98 | 25,01 | 0,029 | 2,33 | | 0,20 | |
| | 71,05 | 88,63 | 25,01 | 0,029 | 1,94 | | 0,07 | |
| | 73,79 | 88,63 | 25,01 | 0,029 | 1,89 | | 0,10 | |
| | 75,35 | 88,63 | 25,01 | 0,029 | 1,86 | | 0,12 | |
| | 77,73 | 88,63 | 25,01 | 0,029 | 1,82 | | 0,15 | |
| | 48,13 | 82,30 | 25,01 | 0,029 | 2,64 | | 0,40 | |
| | 70,46 | 95,99 | 25,01 | 0,029 | 1,82 | | 0,15 | |
| | 47,25 | 80,59 | 25,01 | 0,029 | 2,73 | | 0,45 | |
| 70,24 | 88,18 | 25,01 | 0,029 | 1,96 | 0,05 | | | |



| Iteración | Vi coche | Vf coche | Velocidad Pelotón | Largo pelotón (km) | Tiempo adelantamiento (s) | TA medio (s) | GEH | RMSE |
|-----------|----------|----------|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------|------|------|
| | 87,73 | 87,73 | 25,01 | 0,029 | 1,69 | | 0,25 | |
| | 106,60 | 106,60 | 25,01 | 0,029 | 1,30 | | 0,57 | |
| | 111,53 | 100,31 | 25,01 | 0,029 | 1,31 | | 0,56 | |
| | 102,37 | 102,37 | 25,01 | 0,029 | 1,37 | | 0,51 | |
| | 50,72 | 86,68 | 25,01 | 0,029 | 2,43 | | 0,27 | |
| | 79,89 | 79,89 | 25,01 | 0,029 | 1,93 | | 0,07 | |
| | 79,89 | 79,89 | 25,01 | 0,029 | 1,93 | | 0,07 | |
| | 75,18 | 98,69 | 25,01 | 0,029 | 1,71 | | 0,23 | |
| | 53,42 | 93,82 | 25,01 | 0,029 | 2,18 | | 0,10 | |
| | 45,43 | 79,89 | 25,01 | 0,029 | 2,82 | | 0,51 | |

Tabla 10 maniobras observadas en la calibración etapa II de la configuración 10F

15.3 Anejo III: Validación del microsimulador

| Dato | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|----------|----------------|----------------|
| Modelado | 15 | 8,46667 |
| Real | 1 | 9,0 |

Estadístico = 0,0119403 Valor-P = 0,912987

Tabla 1 Prueba de Kruskal-Wallis Validación tiempo de viaje de ciclista individual

| Dato | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|----------|----------------|----------------|
| Modelado | 15 | 8,26667 |
| Real | 1 | 12,0 |

Estadístico = 0,657718 Valor-P = 0,417366

Tabla 12 Prueba de Kruskal-Wallis Validación tiempo de viaje ciclista dos en paralelo

| Dato | Tamaño muestra | Rango promedio |
|----------|----------------|----------------|
| Modelado | 15 | 8,2 |
| Real | 1 | 13,0 |

Estadístico = 1,03846 Valor-P = 0,308178

Tabla 13 Prueba de Kruskal-Wallis Validación tiempo de viaje ciclista dos en línea

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 0,000247742 | 1 | 0,000247742 | 0,00 | 0,9748 |
| Intra grupos | 7,10332 | 29 | 0,244942 | | |
| Total (Corr.) | 7,10357 | 30 | | | |

Tabla 14 Tabla ANOVA Validación tiempo de adelantamiento ciclista dos en línea

| Dato | Tamaño muestra | Rango promedio |
|----------|----------------|----------------|
| Modelado | 14 | 7,92857 |
| Real | 1 | 9,0 |

Estadístico = 0,0595238 valor-p = 0,80725

Tabla 15 Prueba de Kruskal-Wallis Validación tiempo de viaje ciclista 1+2



| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 0,00174068 | 1 | 0,00174068 | 0,00 | 0,9125 |
| Intra grupos | 2,52109 | 18 | 00,140061 | | |
| Total (Corr.) | 2,52283 | 19 | | | |

Tabla 16 Tabla ANOVA Validación tiempo de adelantamiento ciclista 1+2

| Dato | Tamaño muestra | Rango promedio |
|----------|----------------|----------------|
| Modelado | 14 | 7,71429 |
| Real | 1 | 12,0 |

Estadístico = 1,0084 Valor-P = 0,315284

Tabla 17 Prueba de Kruskal-Wallis Validación tiempo de viaje ciclista 2+1

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 0,000299415 | 1 | 0,000299415 | 0,00 | 0,9580 |
| Intra grupos | 1,78271 | 17 | 0,104865 | | |
| Total (Corr.) | 1,78301 | 18 | | | |

Tabla 18 Tabla ANOVA Validación tiempo de adelantamiento ciclista 2+1

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 0,0132017 | 1 | 0,0132017 | 0,04 | 0,8447 |
| Intra grupos | 4,63957 | 14 | 0,331398 | | |
| Total (Corr.) | 4,65278 | 15 | | | |

Tabla 19 Prueba de ANOVA para validación tiempo de viaje ciclista 4F

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 0,0000923077 | 1 | 0,0000923077 | 0,00 | 0,9847 |
| Intra grupos | 2,6228 | 11 | 0,238436 | | |
| Total (Corr.) | 2,62289 | 12 | | | |

Tabla 20 Tabla ANOVA Validación tiempo de adelantamiento ciclista 4F

| Dato | Tamaño muestra | Rango promedio |
|----------|----------------|----------------|
| Modelado | 14 | 7,85714 |
| Real | 1 | 10,0 |

Estadístico = 0,252101 valor-p = 0,615599

Tabla 21 Prueba de Kruskal-Wallis Validación tiempo de viaje ciclista 4L

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 0,000014045 | 1 | 0,000014045 | 0,00 | 0,9902 |
| Intra grupos | 0,60723 | 7 | 0,0867472 | | |
| Total (Corr.) | 0,607244 | 8 | | | |

Tabla 22 Tabla ANOVA Validación tiempo de adelantamiento ciclista 4L

| Dato | Tamaño muestra | Rango promedio |
|----------|----------------|----------------|
| Modelado | 14 | 8,07143 |
| Real | 1 | 7,0 |

Estadístico = 0,0571429 Valor-P = 0,81107

Tabla 23 Prueba de Kruskal-Wallis Validación tiempo de viaje ciclista 10L



| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 0,0000301538 | 1 | 0,0000301538 | 0,00 | 0,9949 |
| Intra grupos | 17,4116 | 24 | 0,725484 | | |
| Total (Corr.) | 17,4116 | 25 | | | |

Tabla 24 Tabla ANOVA Validación tiempo de adelantamiento ciclista 10L

| Dato | Tamaño muestra | Rango promedio |
|----------|----------------|----------------|
| Modelado | 15 | 8,26667 |
| Real | 1 | 12,0 |

Estadístico = 0,594841 Valor-P = 0,440552

Tabla 25 Prueba de Kruskal-Wallis Validación tiempo de viaje ciclista 10F

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 0,000599131 | 1 | 0,000599131 | 0,00 | 0,9578 |
| Intra grupos | 4,38804 | 21 | 0,208954 | | |
| Total (Corr.) | 4,38864 | 22 | | | |

Tabla 26 Tabla ANOVA Validación tiempo de adelantamiento ciclista 10F