



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Organización Industrial

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS CICLOCARRILES EN
LA INTERACCIÓN ENTRE FLUJOS DE MOVILIDAD
EN UN ÁREA URBANA**

Autor:

Araujo Valle, María del Carmen

Tutelado por:

Pérez Rueda, M^a Ángeles

Pérez Blanco, Esteban

Valladolid, Octubre de 2019.



Universidad de Valladolid





Agradecimientos

En primer lugar, dar las gracias a mis tutores, M^a Ángeles y Esteban, por su tiempo y dedicación, pero, sobre todo, por su infinita comprensión en cada situación vivida durante la redacción de este proyecto.

A mi familia, por siempre estar, en cada suspenso y en cada aprobado, por darme el impulso para estudiar esta carrera y por enseñarme que todo reto en esta vida requiere esfuerzo y dedicación.

A Cristina, por tenernos la una a la otra desde el primer día de universidad, porque en estos años hemos crecido como profesionales, pero también como personas. A todos y cada uno de los que han formado parte de esta etapa, amigos y profesores, gracias.

A Javier, por llevar a mi lado desde antes de tener uso de razón, sin él hubiera sido mucho más difícil completar este ciclo tan importante de nuestras vidas.

Y para terminar, acordarme de los que ya no están, pero que nunca han dejado de estar presentes, ésto es para vosotros.



Universidad de Valladolid





Resumen

Solo el 7% de la población española usa a diario la bicicleta, por ello, hay que buscar una conversión de las prioridades, donde peatones, ciclistas y transporte público sean protagonistas frente a los vehículos privados motorizados. La idea no es hacer desaparecer el automóvil, sino potenciar aquella movilidad donde no existe un solo medio de transporte predominante, sino que todas las formas de moverse se complementan para hacer de las ciudades lugares que persiguen el logro de una movilidad más sostenible. Y es en esta tarea donde la bicicleta tiene mucho que aportar.

Este proyecto tiene como fin incitar al uso de la bicicleta mediante la incorporación de nuevos ciclocarriles y estudiar su correcta integración en un área residencial urbana como es el barrio de La Rondilla en Valladolid.

Con ayuda del software de simulación AIMSUN se han creado tres modelos, uno de la situación actual del barrio y dos de nuevas propuestas de tráfico, para poder compararlos entre ellos.

Palabras clave

AIMSUN, Bicicleta, Carril bici, Ciclocarril, Simulación.





Abstract

Only 7% of the Spanish population uses bicycles on a daily basis, so it is necessary to seek a conversion of priorities, where pedestrians, cyclists and public transport are protagonists as opposed to private motorized vehicles. The idea is not to make the car disappear, but to promote mobility where there is no single predominant means of transport, but all forms of movement complement each other to make cities places that pursue the achievement of a more sustainable mobility. And it is in this task that the bicycle has much to contribute.

The aim of this project is to encourage the use of bicycles through the incorporation of new bicycle paths and to study their correct integration in an urban residential area such as the La Rondilla neighbourhood in Valladolid.

With the help of the AIMSUN simulation software, three models have been created, one of the current situation of the neighbourhood and two of new traffic proposals, in order to be able to compare them among themselves.

Keywords

AIMSUN, Bicycle, Bike lane, Cycle lane, Simulation.





Índice de contenido

Capítulo 1: Introducción	15
1.1. Introducción.....	16
1.2. Objetivo	17
1.3. Organización de la memoria	18
Capítulo 2: Ingeniería de Tráfico	21
2.1. Conceptos generales de la teoría del tráfico	22
2.1.1. Conceptos y objetivos	22
2.1.2. Planeamiento vial.....	23
2.1.2.1. Recogida y análisis de datos	23
2.1.2.2. Planeamiento vial y de transportes.....	24
2.1.2.3. Trazado de vías	25
2.1.3. Organización de la Ingeniería de Tráfico	25
2.1.4. Conclusiones	27
2.2. Características básicas	28
2.2.1. Composición	29
2.2.2. Intensidad de tráfico.....	29
2.2.3. Velocidad	30
2.2.4. Densidad de tráfico	32
2.2.5. Relación ente intensidad y velocidad	33
2.2.6. Relaciones entre velocidad y densidad	34
2.2.7. Relación entre intensidad y velocidad	35
2.3. Capacidad y nivel de servicio	37
2.3.1. Capacidad.....	37
2.3.2. Nivel de servicio	39
2.3.3. Capacidad en intersección con semáforos	41



2.3.4. Calidad en los factores de servicio	43
2.4. Canalización y control del tráfico rodado	44
2.4.1. Introducción	44
2.4.2. Canalización	46
2.4.3. Comunicaciones	46
2.4.4. Límites de velocidad	47
2.5. Estudio y planificación del tráfico rodado	47
2.5.1. Estudio del transporte: Aforos	47
2.5.1.1. Objetivos de los aforos	47
2.5.1.2. Tipos de aforo	48
2.5.1.3. Aforos en zonas urbanas.....	50
2.5.2. Planificación del transporte	52
2.5.2.1. Etapas de la planificación	52
2.5.2.2. Concepto de costo.....	54
2.5.2.3. Encuestas para el estudio de la demanda del transporte	55
2.6. Tráfico no rodado: Movilidad urbana	59
2.6.1. Aspectos iniciales	60
2.6.2. Análisis del nivel de servicio	60
2.6.3. Movilidad en bicicleta	61
2.6.3.1. Carril exclusivo para bicicletas: Carril bici.....	62
2.6.3.2. Carriles de coexistencia: Ciclocarriles	65
2.6.3.3. Criterios básicos para una movilidad ciclista ideal	66
Capítulo 3: Estudio y análisis del tráfico en la Rondilla	71
3.1. Introducción.....	72
3.2. Descripción y construcción del modelo base	75
3.2.1. Introducción al Software AIMSUN	75
3.2.2. Desarrollo de un modelo AIMSUN	76



3.2.3. Recreación de la situación sin sendas ciclistas del barrio de La Rondilla con AIMSUN	77
3.2.3.1. Modelado de la demanda de tráfico	83
3.2.4. Tipo de modelo	88
3.2.5. Validación del modelo	89
3.3. Análisis de la situación sin sendas ciclistas del barrio de La Rondilla	91
3.3.1. Mapas de flujo	91
3.3.2. Análisis de los parámetros globales	92
3.3.3. Otras características de la red	98
3.4. Propuestas de nuevos modelos de tráfico	101
3.4.1. Análisis geométrico	101
3.4.1.1. Modelo 1	101
3.4.1.2. Modelo 2	104
3.4.1.3. Modelo 3	106
3.4.1.4. Conclusión	107
3.4.2. Análisis de demanda	108
3.4.2.1. Comparación del Escenario 1 con el Escenario 2.....	109
3.4.2.2. Comparación del Escenario 2 con el Escenario 3.....	114
3.4.2.3. Comparación del Escenario 3 con el Escenario 4.....	119
3.4.3. Análisis de resultados	124
Capítulo 4: Conclusiones	127
4.1. Líneas futuras de trabajo.....	129
Capítulo 5: Estudio económico.....	131
5.1. Cálculos	132
5.1.1. Costes directos.....	132
5.1.1.1. Costes de personal.....	132
5.1.1.2. Costes de amortización de material	138



5.1.1.3. Costes totales directos	140
5.1.2. Costes indirectos.....	142
5.2. Coste total del proyecto.....	142
Capítulo 6: Bibliografía	145



Índice de ilustraciones

Ilustración 2.2-1: Relación intensidad-densidad (Balaguer). Fuente: Manual de Carreteras, E., 2000, p. 162.....	34
Ilustración 2.2-2: Relación velocidad-densidad (Balaguer). Fuente: Manual de Carreteras, E., 2000, p. 163.....	35
Ilustración 2.2-3: Relación velocidad-intensidad (Balaguer). Fuente: Manual de Carreteras, E., 2000, p. 164.....	37
Ilustración 2.3-1: Capacidad máxima de un carril. Fuente: Apuntes Ingeniería de Transporte.....	39
Ilustración 2.3-2: Niveles de servicio. Fuente: Elaboración propia.....	41
Ilustración 2.3-3: Niveles de servicio en vías urbanas. Fuente: Manual de Carreteras, E., 2000, p. 211.....	42
Ilustración 2.6-1: Señalización de un ciclocarril. Fuente: El Norte de Castilla.....	66
Ilustración 3.1-1: Situación de la provincia de Valladolid. Fuente: Google Maps.	72
Ilustración 3.1-2: Barrio de la Rondilla en Valladolid. Fuente: Junta de Castilla y León.	73
Ilustración 3.1-3: Distribución de los viajes según la hora de inicio. Fuente: PIMUSSVA, Plan Integral de Movilidad Urbana Sostenible y Segura de la Ciudad de Valladolid, E., 2015, p. 54.....	75
Ilustración 3.2-1: Delimitación de la zona de estudio. Fuente: Ayuntamiento de Valladolid.	77
Ilustración 3.2-2: Secciones. Fuente: AIMSUN.....	78
Ilustración 3.2-3: Intersección. Fuente: AIMSUN.	79
Ilustración 3.2-4: Ciclos semafóricos. Fuente: AIMSUN.....	81
Ilustración 3.2-5: Representación de un coche. Fuente: AIMSUN.....	82
Ilustración 3.2-6: Representación de un autobús. Fuente: AIMSUN.....	82
Ilustración 3.2-7: Representación de una bicicleta. Fuente: AIMSUN.	82
Ilustración 3.2-8: Representación de un peatón. Fuente: AIMSUN.....	83
Ilustración 3.2-9: Lugares en los que se realizó encuesta. Fuente: Ayuntamiento de Valladolid.	84



Ilustración 3.2-10: Datos de aforo permanente expresados en IMD, vehículos/día. Fuente: PIMUSSVA, Plan Integral de Movilidad Urbana Sostenible y Segura de la Ciudad de Valladolid, E., 2015, p. 61. 86

Ilustración 3.2-11: Distribución de los viajes según hora de comienzo y modo básico. Fuente: PIMUSSVA, Plan Integral de Movilidad Urbana Sostenible y Segura de la Ciudad de Valladolid, E., 2015, p. 56. 87

Ilustración 3.2-12: Representación de valores (x, y). Fuente: Elaboración propia. 89

Ilustración 3.2-13: Validación de la simulación del modelo real. Fuente: Software AIMSUN. 90

Ilustración 3.3-1: Leyenda mapa de flujo (veh/h). Fuente: Software AIMSUN. ... 91

Ilustración 3.3-2: Mapa de flujo de la simulación real (veh/h). Fuente: Software AIMSUN. 92

Ilustración 3.3-3: Flujo de vehículos (veh/h). 93

Ilustración 3.3-4: Densidad de tráfico (veh/km). 94

Ilustración 3.3-5: Longitud media de cola (veh)..... 95

Ilustración 3.3-6: Velocidad (km/h). 95

Ilustración 3.3-7: Tiempo de demora (s/km)..... 96

Ilustración 3.3-8: Tiempo de viaje (s/km)..... 97

Ilustración 3.3-9: Tiempo de parada (s/km) y número de paradas..... 99

Ilustración 3.3-10: Distancia total viajada (km)..... 99

Ilustración 3.3-11: Tiempo total de viaje (s). 100

Ilustración 3.4-1: Mapa de Carriles Bici de Valladolid. Fuente: Ayuntamiento de Valladolid. 102

Ilustración 3.4-2: Inicio del Carril Bici de la Avenida de Palencia. Fuente: AIMSUN. 103

Ilustración 3.4-3: Intersección de los Carriles Bici del círculo verde. Fuente: AIMSUN. 103

Ilustración 3.4-4: Ciclocarriles proyectados. Fuente: Periódico El Mundo. 104

Ilustración 3.4-5: Continuidad del Carril Bici de la Avenida de Palencia. Fuente: AIMSUN. 105

Ilustración 3.4-6: Velocidad por secciones en las calles Soto y Mirabel. Fuente: AIMSUN. 106



Ilustración 3.4-7: Geometría del Modelo 3. Fuente: AIMSUN.	107
Ilustración 3.4-8: Barrio de la Rondilla conectado por vías aptas para el uso de bicicleta. Fuente: AIMSUN.	108
Ilustración 3.4-9: Comparación de flujos entre los Modelos 1 y 2.	109
Ilustración 3.4-10: Comparación del tiempo de viaje entre Modelos 1 y 2.	111
Ilustración 3.4-11: Comparación del tiempo de demora entre los Modelos 1 y 2.	112
Ilustración 3.4-12: Comparación de la velocidad entre los Modelos 1 y 2.	113
Ilustración 3.4-13: Comparación de flujos entre los Modelos 1 y 2.	115
Ilustración 3.4-14: Comparación del tiempo de viaje entre los Modelos 2 y 3.	116
Ilustración 3.4-15: Comparación del tiempo de demora entre los Modelos 2 y 3.	117
Ilustración 3.4-16: Comparación de la velocidad entre los Modelos 2 y 3.	118
Ilustración 3.4-17: Comparación del flujo entre el Modelo 3 del año actual y el Modelo 3 del año objetivo.	119
Ilustración 3.4-18: Comparación de los tiempos de viaje entre el Modelo 3 del año actual y el Modelo 3 del año objetivo.	121
Ilustración 3.4-19: Comparación del tiempo de demora entre el Modelo 3 del año actual y el Modelo 3 del año objetivo.	122
Ilustración 3.4-20: Comparación de la velocidad entre el Modelo 3 del año actual y el Modelo 3 del año objetivo.	123
Ilustración 5.2-1: Coste Total del Proyecto por conceptos.	143



Índice de tablas

Tabla 1.2-1: Modelos del objetivo del Trabajo de Fin de Grado.	18
Tabla 3.3-1: Análisis de parámetros globales. Valores medios.....	98
Tabla 3.3-2: Análisis de otras características. Valores.....	101
Tabla 3.4-1: Valores medios de flujo de los Modelo 1 y 2.	110
Tabla 3.4-2: Valores medios del tiempo de viaje de los Modelos 1 y 2.	111
Tabla 3.4-3: Valores medios del tiempo de demora de los Modelos 1 y 2.....	113
Tabla 3.4-4: Valores medios de la velocidad de los Modelo 1 y 2.	114
Tabla 3.4-5: Valores medios del flujo de los Modelos 1 y 2.	115
Tabla 3.4-6: Valores medios del tiempo de viaje de los Modelos 2 y 3.	116
Tabla 3.4-7: Valores medios del tiempo de demora de los Modelos 2 y 3.....	117
Tabla 3.4-8: Valores medios de la velocidad de los Modelos 2 y 3.....	118
Tabla 3.4-9: Valores medios del flujo del Modelo 3 del año actual y el Modelo 3 del año objetivo.	120
Tabla 3.4-10: Valores medios del tiempo de viaje del Modelo 3 del año actual y el Modelo 3 del año objetivo.	121
Tabla 3.4-11: Valores medios del tiempo de demora del Modelo 3 del año actual y del Modelo 3 del año objetivo.	122
Tabla 3.4-12: Valores medios de la velocidad del Modelo 3 del año actual y el Modelo 3 del año objetivo.	123
Tabla 3.4-13: Resultados obtenidos para los coches.....	124
Tabla 3.4-14: Resultados obtenidos para las bicicletas.....	124
Tabla 5.1-1: Horas efectivas de trabajo	133
Tabla 5.1-2: Sueldo y coste horario del Director de Proyecto.....	134
Tabla 5.1-3: Sueldo y coste horario del Ingeniero.	134
Tabla 5.1-4: Sueldo y coste horario del Técnico Informático.	134
Tabla 5.1-5: Sueldo y coste horario del Personal no cualificado.....	135
Tabla 5.1-6: Número de horas invertidas por el Director de Proyecto.....	135
Tabla 5.1-7: Número de horas invertidas por el Ingeniero en Organización Industrial.....	136
Tabla 5.1-8: Número de horas invertidas por el Técnico Informático.....	137
Tabla 5.1-9: Número de horas invertidas por el Personal no cualificado.	138



Tabla 5.1-10: Coste total de personal.	138
Tabla 5.1-11: Costes y vida útil del material utilizado.	139
Tabla 5.1-12: Coste de amortización.	140
Tabla 5.1-13: Coste de material.	141
Tabla 5.1-14: Total de costes directos.	142
Tabla 5.1-15: Total de costes indirectos.	142
Tabla 5.2-1: Coste Total de Proyecto.	143



Índice de ecuaciones

Ecuación 2.2-1: Factor de hora punta.....	30
Ecuación 2.2-2: Velocidad media local.....	31
Ecuación 2.2-3: Velocidad media de tramo.....	31
Ecuación 2.2-4: Densidad de tráfico.....	32
Ecuación 3.2-1: Ecuación de la recta.	89



Capítulo 1: Introducción



1.1. Introducción

El impacto del automóvil en la vida moderna ha superado con creces todas las provisiones, llegando a condicionar no sólo los modos de transporte, sino otros muchos aspectos del medio en que se desenvuelve el hombre actual, como son la configuración de las ciudades, la organización industrial, la agricultura, el turismo y la ordenación territorial.

El uso de los vehículos, tanto individuales como colectivos, se ha convertido en un elemento esencial de nuestras vidas. El índice de motorización que es el cociente entre el número de habitantes y el de vehículos residentes en un país es uno de los indicadores de su nivel económico y por su puesto es el origen de los problemas de circulación que han dado lugar al desarrollo de la Ingeniería de Tráfico.

Las oportunidades que ofrecían las ciudades españolas para resolver sus necesidades de desplazamiento gracias a la marcha a pie, bicicleta, y el transporte colectivo están siendo reducidas día a día como consecuencia de una ampliación de las distancias a recorrer y del incremento del número de automóviles.

Sin embargo, de un tiempo a esta parte, muchas ciudades de todo el mundo están apoyando activamente el ciclismo y han creado una infraestructura para bicicletas bien definida. Cada vez más personas recurren a las bicicletas como una forma ecológica y barata de moverse por la ciudad, así como una manera divertida de mantenerse en forma. Además, muchas empresas están recurriendo a la bicicleta, como medio de transporte para acercarse a sus clientes.

Los desplazamientos tienen lugar entre dos entornos, el urbano e interurbano, siendo diferentes las características de sus vías. La movilidad y accesibilidad han de garantizarse al ciudadano mediante un sistema eficaz de organización del tráfico. Para que exista una utilización óptima de las vías de transporte se debe hacer un estudio minucioso de cada caso, analizando la zona donde se va a implantar la vía en cuanto a su situación geográfica, población, nivel económico, etc.



No se debe de olvidar que, dentro de la ciudad, todo estudio de tráfico debe tener en cuenta a los peatones haciendo compatible su seguridad con la capacidad de movimiento.

El volumen de circulación varía a la vez en el espacio y en el tiempo. Estas variaciones son determinadas del modo en el que se utilizan las instalaciones de una vía, y controlan muchas de las condiciones exigibles, tanto en el planeamiento como en el proyecto, para dar un servicio satisfactorio a la demanda de tráfico. Dado que el volumen de tráfico no presenta una distribución uniforme a lo largo del día, normalmente las distintas vías se proyectan para hacer frente a las demandas punta que tienen lugar en periodos breves que pueden ir desde los 15 minutos a una hora. Consecuentemente para el resto de tiempo las carreteras están habitualmente infrautilizadas.

Debido a que la concentración de bicicletas ha aumentado en los últimos años, muchas de las infraestructuras existentes no se adaptan a las exigencias del tráfico. Ejemplo de esto es el caso urbano de las ciudades, como el de Valladolid. En definitiva, se hace necesaria una nueva planificación para así conseguir una optimización de la movilidad.

1.2. Objetivo

El Ayuntamiento de Valladolid, el pasado 2 de abril de 2019, hizo partícipes a sus ciudadanos mediante la prensa, de que la ciudad contará con la ampliación del número de ciclocarriles, diez nuevos kilómetros con limitación de velocidad a 30 km/h. que duplicarán los ya existentes y en los que el Ministerio del Interior y la Dirección General de Tráfico ya están trabajando.

Aprovechando esta propuesta real se ha establecido el objetivo de este Trabajo de Fin de Grado, el cual es la simulación de tres modelos desarrollados en el barrio de La Rondilla de la capital castellano-leonesa, que permitan estudiar cómo es, o sería, el comportamiento del tráfico, de coches y bicicletas, con la adicción de diferentes itinerarios adaptados a la movilidad ciclista.

Modelo 1	Simulación del tráfico teniendo en cuenta los carriles bici que encontramos en el barrio a día de hoy.	Existente en la actualidad.
Modelo 2	Simulación del tráfico añadiendo al Modelo 1 el itinerario de ciclocarriles que propone el Ayuntamiento en dos calles de la Rondilla.	No existente en la actualidad.
Modelo 3	Simulación del tráfico añadiendo al Modelo 2 otro itinerario de ciclocarriles que complementa y mejora el circuito ciclista dentro del barrio.	No existente en la actualidad.

Tabla 1.2-1: Modelos del objetivo del Trabajo de Fin de Grado.

A través de estas simulaciones, que crean y conectan itinerarios ciclistas para fomentar el uso de la bicicleta como transporte sostenible, se producirá un aumento de ciclistas en nuestras calles y una consiguiente reducción del tráfico rodado, así como la mejora de la seguridad vial en las condiciones de circulación.

1.3. Organización de la memoria

La siguiente memoria recoge los resultados que se han obtenido en la realización de este Trabajo de Fin de Grado. Se estructura en cuatro capítulos:



- Capítulo 1: Introducción, donde se presenta el tema y se plantean los objetivos.
- Capítulo 2: Aspectos teóricos de la Ingeniería de tráfico en la que se definen los conceptos fundamentales.
- Capítulo 3: Calibración y validación de los modelos de tráfico a través de las simulaciones y análisis de los resultados.
- Capítulo 4: Conclusiones y líneas de futuro.
- Capítulo 5: Estudio económico del proyecto donde se muestran los diferentes cálculos de costes.





Capítulo 2: Ingeniería de Tráfico



2.1. Conceptos generales de la teoría del tráfico

2.1.1. Conceptos y objetivos

La Ingeniería del Tráfico comienza cuando los problemas de concentración de vehículos superaron las medidas dictadas por una práctica elemental y aplicadas por la Policía, se orientó en un principio hacia el campo de la ordenación de la circulación y de la seguridad vial, en el sentido de buscar unos principios técnicos que permitiesen obtener un mayor rendimiento de las calles existentes.

En un principio, la regulación del tráfico fue una disciplina intermedia entre la Ingeniería y la Policía, y de este origen algo ambiguo, han surgido ciertas dificultades y confusiones entre las respectivas competencias de ingenieros y policías. A medida que los problemas de tráfico se fueron tratando con unos criterios ingenieriles, se ha ido enriqueciendo esta técnica. Por tanto, la Ingeniería del Tráfico es una nueva competencia que se inicia en el segundo tercio del siglo XX, de forma análoga a como se desarrollan otros aspectos de la Ingeniería Civil que surgió como consecuencia de nuevas necesidades para el bienestar del ser humano y para hacer posible distintas formas de convivencia.

La Ingeniería de Tráfico se definió como “la rama de la Ingeniería que trata del planeamiento, trazado y funcionamiento de las calles y carreteras, así como de los aparcamientos, terrenos colindantes y zonas de influencia y de su relación con otros medios de transporte. Su objetivo final es que el movimiento de personas y mercancías se realice de la forma más segura, eficaz y cómoda” (Instituto de Ingenieros de Tráfico de los Estados Unidos).

Esta definición expone los campos que competen a la Ingeniería de Tráfico, desde la solución de pequeños problemas locales, hasta la elaboración de complejos planes de transportes, y que ha sido aceptada universalmente.

Las actividades de la Ingeniería de Tráfico pueden dividirse en dos grandes grupos:



El primer grupo corresponde a lo que puede llamarse *Planeamiento del tráfico*, generalmente trata de problemas a largo plazo o al menos no de acción inmediata.

El segundo grupo, que ha sido en primitivo origen de esta rama de esta rama de ingeniería, comprende la *ordenación de la circulación* y generalmente se dedica al estudio de actuaciones inmediatas. El objetivo fundamental de este aspecto de la Ingeniería del Tráfico es lograr el máximo rendimiento de las redes varias existentes, sin modificar físicamente su estructura o al menos con modificaciones muy pequeñas.

En la actualidad se tiende a contemplar el campo más amplio del transporte en todas sus formas, ya que, principalmente en las zonas urbanas, no pueden aceptarse soluciones parciales que sólo se refieran al problema de la circulación de vehículos.

2.1.2. Planeamiento vial

El tráfico es un factor básico en la planificación de las carreteras y calles, puesto que en definitiva uno de los principales objetos de éstas es servir eficazmente a la circulación.

Por ello, en todos los trabajos de planificación de infraestructura, la Ingeniería de Tráfico ha de tener una participación importante, en colaboración con otras técnicas. A continuación, se explican los aspectos de la actuación de la Ingeniería de Tráfico en relación con su planificación.

2.1.2.1. Recogida y análisis de datos

La primera condición para abordar técnicamente un problema es su conocimiento objetivo. No es posible actuar solamente sobre hipótesis, aunque parezcan evidentes, puesto que los datos objetivos son la base de todo trabajo científico o ingenieril, aunque no puedan utilizarse sin ponderación.

Los datos pueden ser recogidos por cualquiera, pero precisamente uno de los éxitos de la Ingeniería del Tráfico ha sido la puesta a punto de procedimientos muy bien calibrados para que con un coste mínimo sea posible obtener



precisamente aquellos datos básicos que permiten tomar las medidas adecuadas.

Hasta el punto se ha desarrollado la técnica de la recogida de datos, que muchas veces se confunde la misión del ingeniero con la simple realización de unos aforos, o con la preparación de una encuesta, olvidando que dentro de sus funciones esto sólo representa un primer paso para conseguir los objetivos esenciales, que son el análisis crítico de las situaciones existentes y la aplicación de los resultados de los estudios a soluciones concretas de los problemas de planeamiento u ordenación que se hayan planteado.

A la hora de hacer análisis de las redes de transporte hay que tener en cuenta que una excesiva acumulación de datos representa un coste inútil y puede desviar la actuación de los ingenieros de sus objetivos más importante. Para la obtención de datos hay que buscar un modelo que permita pasar de la ciudad a un ordenador con la menor inversión posible.

1. Partimos del mapa de vías o carreteras.
2. Transformamos el mapa en un conjunto de nodos y eslabones (unidireccionales o bidireccionales).
3. Matriz de conectividades: colocamos en las filas todos los orígenes y en las columnas los destinos.
4. Creamos el vector de información para cada eslabón: longitud, capacidad y tiempo de recorrido.

2.1.2.2. Planeamiento vial y de transportes

El planeamiento de las estructuras viarias y de los sistemas de transportes en general, urbanos e interurbanos, y el estudio y comprobación de su comportamiento futuro es una de las tareas esenciales de la Ingeniería del Tráfico.

En este campo se impone la cooperación con otras técnicas, fundamentalmente economía y urbanismos y en muchos casos los sistemas de transporte, que no siempre son factores decisivos, pero sí condicionantes



esenciales, pueden imponer la solución, aunque no sea la más conveniente desde otros puntos de vista.

En las zonas urbanas especialmente, el transporte, complicado extraordinariamente desde la aparición del vehículo privado, ha hecho evolucionar muchos conceptos esenciales de la estructura de la ciudad. El problema existe tanto en las nuevas zonas urbanas como en las ciudades ya construidas, siendo todavía más grave en este último caso, en que las estructuras urbanas han sido concebidas antes de que existiesen los automóviles.

2.1.2.3. Trazado de vías

En el trazado de las calles y carreteras, especialmente en lo que se refiere a sus intersecciones y enlaces, la Ingeniería de Tráfico tiene un papel esencial.

Aunque muchos de los detalles de la técnica del trazado no son específicos de esta rama de la Ingeniería es preciso que los ingenieros que realizan los proyectos de trazado tengan una formación suficiente en tráfico y, en todo caso, es muy conveniente que algún ingeniero especialista en tráfico intervenga en la revisión de los planos finales.

Puede pues, considerarse como muy conveniente que los ingenieros de tráfico tengan, de forma más o menos directa, alguna intervención en las etapas finales del proyecto, al que deben aportar su visión de la explotación de la obra, completando su intervención en la planificación funcional.

2.1.3. Organización de la Ingeniería de Tráfico

La Ingeniería de Tráfico puede prestar servicios a organismos de varios tipos como los que se detallan a continuación:

- a) Administraciones de carreteras, a escala nacional o provincial, en las que su campo de actuación está en relación con la planificación y ordenación del tráfico fuera de las zonas urbanas.
- b) Municipios con problemas de ordenación de tráfico y de planificación urbana.



- c) Administraciones que controlan el urbanismo a escala nacional, regional, provincial y local, en las que los especialistas de tráfico están integrados en los equipos politécnicos que redactan o controlan los planes.
- d) Laboratorios y Centros de Investigación que no están al servicio directo de los organismos responsables de la administración y gestión del tráfico.
- e) Determinados organismos privados, como empresas de transportes o distribuidoras de carburantes y también empresas de ingenieros consultores, que trabajan para alguno de los Organismos antes mencionados.

Si hablamos de la organización a escala municipal, hay que hacer notar que, en casi todas las ciudades de más de 100.000 habitantes, e incluso en algunas de menor importancia existen serios problemas de circulación y estacionamiento. Estos problemas se agravan continuamente, porque los parques de vehículos crecen rápidamente y las condiciones físicas de las ciudades mejoran muy poco a poco y a veces, son prácticamente invariables.

Los primeros problemas de ordenación de tráfico suelen encomendarse a la policía con muy poca intervención de los ingenieros, pero en todos los países se observa la tendencia de que, al aumentar las dificultades, se acude a la Ingeniería de Tráfico, aunque ésta no puede resolver muchos de los problemas cuyo origen está en la planificación de la propia ciudad.

Si se consolida la tendencia que ahora se inicia de tener en cuenta el tráfico en la planificación urbana, será fácil que en las futuras zonas urbanas sea posible ordenar la circulación más eficazmente. Aunque en ciudades importantes, incluso con una planificación bien establecida, no puede evitarse que en un cierto futuro hayan de imponerse determinadas limitaciones al uso de los vehículos privados.

Las primeras actividades de la Ingeniería de Tráfico estuvieron dedicadas a resolver los problemas de ordenación y aun actualmente, éstos ocupan la atención preferente de la mayor parte de los ingenieros.

Son funciones típicas de esta actividad, el estudio de medidas tales como, la señalización de las calles, el establecimiento de sentidos únicos, el control del



estacionamiento y la prohibición de giros, todas ellas encaminadas a obtener un mayor rendimiento de las vías existentes. El arma fundamental de que disponen los ingenieros de tráfico para ordenar la circulación es la señalización -semáforos, señales, y marcas viales- mediante la cual se orienta y obliga a los conductores a cumplir las normas previamente estudiadas.

La correcta ordenación del tráfico es siempre necesaria para hacer posible una circulación segura. Pero a medida que se saturan las carreteras y las calles, aparece una segunda razón que justifica extremar el cuidado de la ordenación: hacer posible una circulación fluida. Esta segunda razón exige medidas más afinadas y ha contribuido decisivamente al considerable desarrollo de la Ingeniería de Tráfico en todo el mundo, siendo su actuación imprescindible, especialmente para la ordenación de las zonas urbanas.

Una tercera razón aconseja acentuar el cuidado en la ordenación del tráfico: Mejorar la integración de la vía en su entorno y reducir su impacto negativo en los que menos se benefician directamente de su uso, una vez los peatones y otras las personas que viven o trabajan en sus inmediaciones.

Por último, en la revisión y puesta a punto de las normas generales que regulan la circulación, tiene también un papel esencial la Ingeniería de Tráfico. A medida que surgen problemas nuevos, es preciso modificar las normas que hayan de aplicarse, generalmente en el sentido de imponer mayores restricciones a determinados usuarios para conseguir un beneficio general.

2.1.4. Conclusiones

La Ingeniería de Tráfico está sometida a una intensa y continua evolución. Esta evolución se presenta fundamentalmente orientada hacia una mayor amplitud de su campo de acción y a una mayor tendencia al establecimiento de leyes más o menos elaboradas.

Cuando llegó a Europa desde Estados Unidos, la Ingeniería de Tráfico era exclusivamente empírica, basada generalmente en una enorme masa de datos y observando a posteriori cómo se cumplen unas determinadas leyes empíricas, que constituyen luego la base de la nueva técnica, sin tratar de justificar



teóricamente las leyes que resultan. Los ingenieros europeos generalmente con mayor preparación teórica y matemática, pero con menos medios para reunir y analizar datos, tratan de llegar a leyes análogas basándose en razonamientos teóricos, matemáticamente justificados y así cada día la Ingeniería de Tráfico se enriquece con teorías más razonadas.

La Ingeniería de Tráfico surgió en América como una consecuencia más de la expansión del automóvil privado, en unos momentos en los que aparentemente este se iba a convertir en el único medio de transporte.

Sin embargo, en las ciudades europeas y también en algunas americanas, se observó que el automóvil creaba problemas insolubles, resultando evidente la necesidad de estudiar conjuntamente la solución del transporte privado y del colectivo. Existe ya una tendencia clara a extender el campo de la Ingeniería de Tráfico al más amplio de los transportes.

Estas técnicas se complican más ya que se ha comprobado que no es posible aislar el problema del transporte de otros aspectos del urbanismo. Ello hace que la Ingeniería de Tráfico se vaya implicando más con el urbanismo, hasta el punto de que la técnica del tráfico o del transporte ya no es sólo una rama más de la Ingeniería, sino que se está convirtiendo en un aspecto fundamental del urbanismo incluyéndose especialistas en tráfico y transportes en los equipos dedicados al urbanismo.

2.2. Características básicas

En el complejo fenómeno del tráfico destacan tres características, no independientes, que lo definen técnicamente.

Intensidad de tráfico o número de vehículos que pasan por una determinada sección de la vía o calle en una unidad de tiempo. Composición o clase de vehículos que forman la corriente de tráfico. La velocidad, bien sea del conjunto de la corriente de tráfico o bien de los vehículos aislados. Otras características, también interesantes para definir el tráfico son la separación entre vehículos, medido en unidades de longitud, el intervalo, unidades de tiempo y la densidad, en vehículos por unidad de longitud.

2.2.1. Composición

La corriente de tráfico está compuesta por vehículos de tipos muy distintos, que difieren entre sí en cuanto a peso, dimensiones y velocidad.

En la mayor parte de los estudios de tráfico que se realizan en España se distinguen 8 clases de vehículos (bicicletas, motos, coches, camionetas, tractores agrícolas, camiones sin remolque, camiones con remolque, autocares).

Puesto que cada tipo de vehículo recorre anualmente como media un número distinto de kilómetros y utiliza con diferente frecuencia cada una de las vías, la composición del tráfico no coincide con la composición del parque de vehículos, sino que depende de las características y función de la carretera o calle que se considere, y también varía con el tiempo.

2.2.2. Intensidad de tráfico

Desde el punto de vista de la Ingeniería de Tráfico interesan dos estados de esta variable en función del tiempo:

La intensidad media diaria anual (IMD): Número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal determinada de la vía durante un año entre los días que tiene un año, 365.

Intensidad máxima horaria (IMH) o intensidad punta: Número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal durante la hora que se considera representativa de las condiciones de mayor circulación.

La IMD importa fundamentalmente desde el punto de vista de Planeamiento: Clasificación de las vías, programas de mejora, cálculo de índices de accidentes, determinación de tendencias en el uso de las vías, proyectos de señalización e iluminación, estudios económicos y determinación de características geométricas de carácter general.

La IMH es más interesante desde el punto de vista del proyecto y de la ordenación: Capacidad e vía, características de las intersecciones y enlaces, control de tráfico, coordinación de semáforos y ordenación de la circulación.



El correcto funcionamiento de una calle o vía no se juzga por su capacidad para intensidades medias, sino para intensidades de hora punta.

La consideración de las intensidades puntas es de una importancia crítica en los análisis de capacidad. Si en el estudio de una carretera durante una hora tenemos un volumen de 4300 vehículos y una intensidad punta de 4800 vehículos/hora (medida en un tiempo de 15 minutos), en el supuesto de que la capacidad de la carretera fuera de 4500 vehículos/hora, esta se colapsaría durante el periodo horario punta de 15 minutos, aunque el volumen es inferior a la capacidad en la hora completa. Esta situación hay que tenerla muy en cuenta, porque la dinámica de disipación de un colapso puede extender los efectos de la congestión durante varias horas después de que ocurra el colapso.

Las intensidades punta se relacionan con los volúmenes horarios a través de la utilización del factor de hora punta. Este factor se define como la relación entre el volumen total horario y la intensidad punta en la hora:

$$PHF = (\text{Volumen horario})/(\text{Intensidad punta (dentro de la hora)})$$

Ecuación 2.2-1: Factor de hora punta.

2.2.3. Velocidad

La velocidad es, entre las características esenciales del tráfico, unas de las de definición más compleja. Al hablar de velocidad, es posible referirse a la de un vehículo determinado, la de grupo de vehículos o a una magnitud que tiene simultáneamente en cuenta las circunstancias ambientales y de la vía. La velocidad de un determinado vehículo puede definirse de tres maneras fundamentales:

- *Velocidad local:* Es decir, la velocidad de un vehículo al atravesar una determinada sección de una vía.

- *Velocidad de circulación* (V_c): Que es igual a la distancia recorrida en un tramo determinado dividida por el tiempo en que el vehículo está en movimiento.
- *Velocidad de recorrido* (V_r) o *velocidad momentánea* (V_m): Que es el cociente entre la distancia total recorrida en un tramo determinado y el tiempo que transcurre desde el instante en que el vehículo inicia el viaje hasta que llega a su destino, incluyendo las posibles detenciones y retrasos debidos al tráfico.

Cuando lo que interesa, como es lo normal en la ingeniería de tráfico, no es la velocidad de un vehículo aislado, sino de un grupo de vehículos, hay dos formas de obtener los valores medios:

Velocidad media local:

$$V_l = \frac{\sum_{j=1}^n V_j}{n}$$

Ecuación 2.2-2: Velocidad media local.

También llamada *velocidad media-temporal*; siendo n el número de vehículos observados y V_j la velocidad total del vehículo j .

Velocidad media en un tramo:

$$V_r = \frac{n * L}{\sum_{j=1}^n t_j}$$

Ecuación 2.2-3: Velocidad media de tramo.

También llamada *velocidad media-espacial*.



Cuando todos los vehículos circulan a velocidad uniforme, las dos velocidades medias son idénticas, pero si no es así, siempre es algo mayor la velocidad media local en el tiempo. La razón de esto es que en la velocidad media de recorrido en un tramo tiene mayor peso relativo los vehículos lentos, que ocupan durante un tiempo más prolongado el tramo de vía que se considera.

Otros conceptos de velocidades tienen también en cuenta las circunstancias de la vía:

- La *velocidad de proyecto* o aquella que se toma como base para definir los elementos geométricos de la vía: radios de curva, horizontales y verticales, distancias de visibilidad y peraltes.
- La *velocidad de servicio*, que es aquella a la que se puede circular por una determinada vía en situaciones atmosféricas favorables, en las condiciones de circulación existentes en cada momento y dentro de unos márgenes razonables de seguridad. Este concepto de velocidad tiene gran interés en la definición de la capacidad y de los niveles de servicio de los distintos tipos de calles y carreteras.

2.2.4. Densidad de tráfico

Se define como el número medio de vehículos por unidad de longitud de la vía en un momento dado:

$$d = \frac{n}{L}$$

Ecuación 2.2-4: Densidad de tráfico.

d: Densidad de vehículos en la calzada de longitud L en un instante de tiempo.

n: Número de vehículos en la carretera.

L: Longitud de la carretera.



2.2.5. Relación ente intensidad y velocidad

A un aumento de densidad corresponde una reducción de la velocidad media, hasta llegar a un punto de densidad crítica que corresponde a la máxima intensidad. A partir de este punto decrecen ambas: velocidad e intensidad.

Este comportamiento se observa en tramos completos mejor que en secciones aisladas y cuanto más largos sean los tramos, los resultados son de mayor consistencia.

La velocidad media se deduce del conjunto de las velocidades de cada vehículo que son menos dispersas a medida que la densidad es más alta.

La velocidad depende también de otros factores, independientes de la intensidad, y que son función unas veces de la vía, características geométricas y control de sus accesos, y otras de agentes externos, como las condiciones atmosféricas.

La relación intensidad – velocidad media en condiciones de circulación continua o ininterrumpida puede representarse por una curva del tipo de las que se recogen en la siguiente figura:

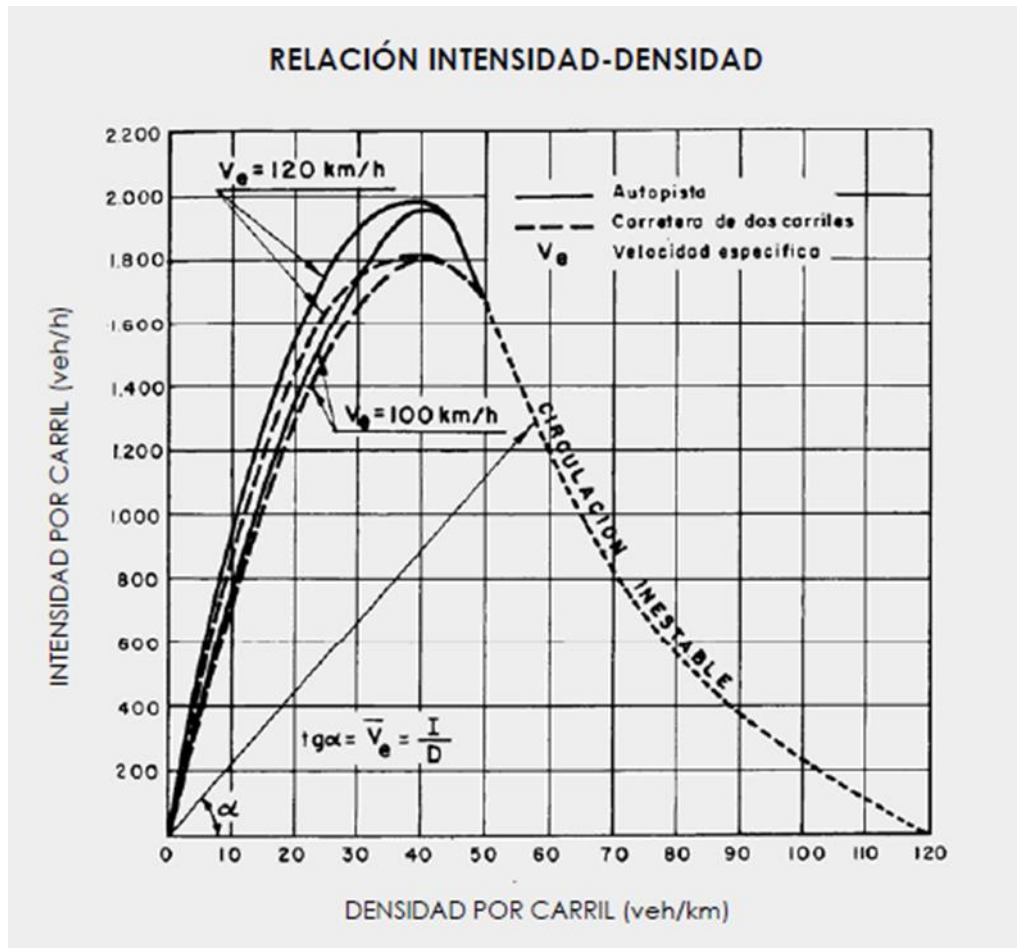


Ilustración 2.2-1: Relación intensidad-densidad (Balaguer). Fuente: Manual de Carreteras, E., 2000, p. 162.

2.2.6. Relaciones entre velocidad y densidad

De la representación de estas dos variables se extraen unas conclusiones que, aunque son obvias y de sentido común, arrojan luz sobre el funcionamiento del tráfico.

Como puede observarse, la velocidad media y la densidad de vehículos están relacionados de manera lineal, de forma que a bajas densidades de tráfico los vehículos pueden circular a la velocidad que libremente escojan, coartada únicamente por las limitaciones mecánicas del vehículo y el trazado de la vía por la que circulan.

Por el contrario, a medida que aumenta la densidad de vehículos la velocidad de circulación va reduciéndose al encontrar cada vehículo más dificultades de movilidad, hasta llegar al extremo de que esta sea imposible, encontrándose entonces en condiciones de máxima densidad a la que corresponde una velocidad de circulación nula.

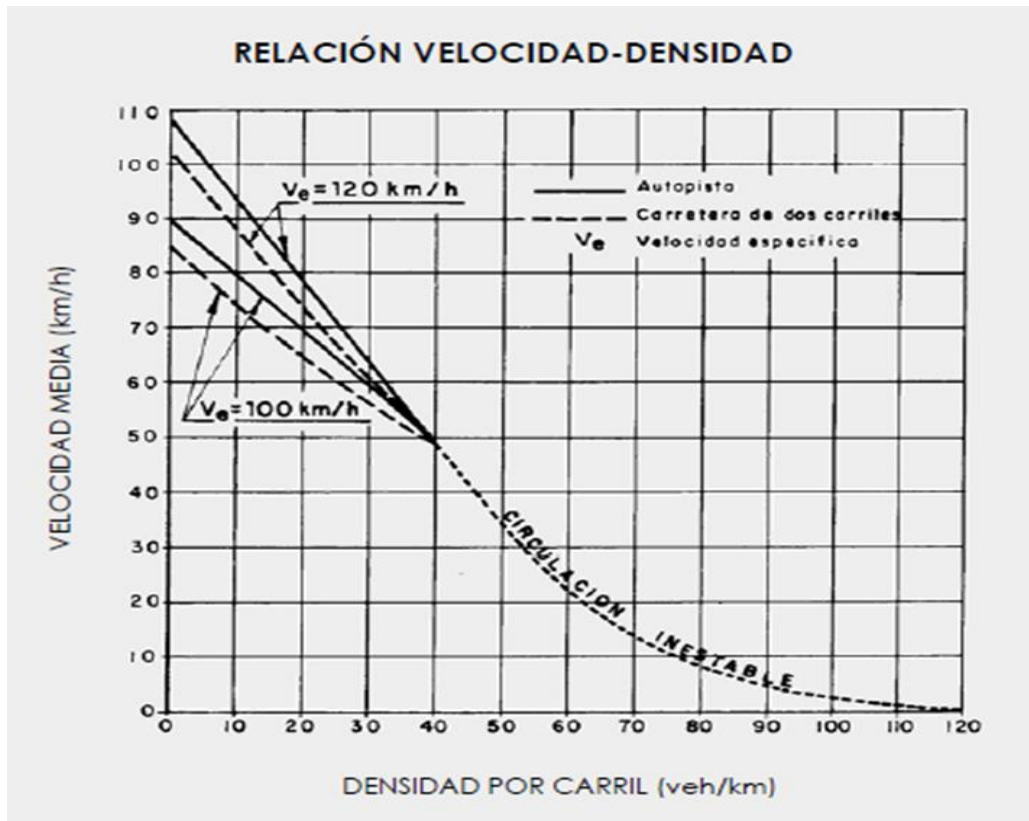


Ilustración 2.2-2: Relación velocidad-densidad (Balaguer). Fuente: Manual de Carreteras, E., 2000, p. 163.

Entre ambos extremos se halla toda una gama de diferentes estados de circulación, cada uno correspondiente a un nivel de calidad de la vía. Cuando la densidad de circulación es crítica, se dice que la vía ha alcanzado su capacidad.

2.2.7. Relación entre intensidad y velocidad

De las tres relaciones, esta es sin duda la más sencilla de obtener en la práctica y aquella con la que se determinará el nivel de servicio o calidad que ofrece una determinada vía, dado que relaciona las dos magnitudes más fáciles de



medir. Por ello, la gran mayoría de los estudios experimentales que se han realizado en carreteras y a partir de los cuales se extraen las principales conclusiones se basan en estas dos variables del tráfico.

La intensidad y la velocidad son variables directamente proporcionales, es decir, un aumento de la densidad corresponde una reducción de la velocidad media, hasta llegar a un punto de densidad crítica que corresponde a la máxima intensidad. Una vez llegados a este punto ambas decrecen. Este comportamiento se observa mejor en tramos completos que en secciones aisladas y cuantos más largos sean los tramos, los resultados son de mayor consistencia.

La velocidad media se deduce del conjunto de las velocidades de cada vehículo que son menos dispersas a medida que la densidad es más alta.

La velocidad depende también de otros factores, independientes de la intensidad, y que son función, unas veces de la vía, características geométricas y control de sus accesos y otras de agentes externos, como las condiciones atmosféricas.

La relación intensidad-velocidad media en condiciones de circulación continua o ininterrumpida puede representarse por una curva del tipo de las que se recogen en la figura 2.2-3.

En condiciones de circulación interrumpida o discontinua -que son normales por ejemplo en vías urbanas con semáforos- es difícil establecer la relación intensidad-velocidad.

La velocidad está condicionada por factores muy distintos: límites de velocidad, progresión de los semáforos o capacidad de intersecciones próximas. Los resultados obtenidos son poco consistentes.

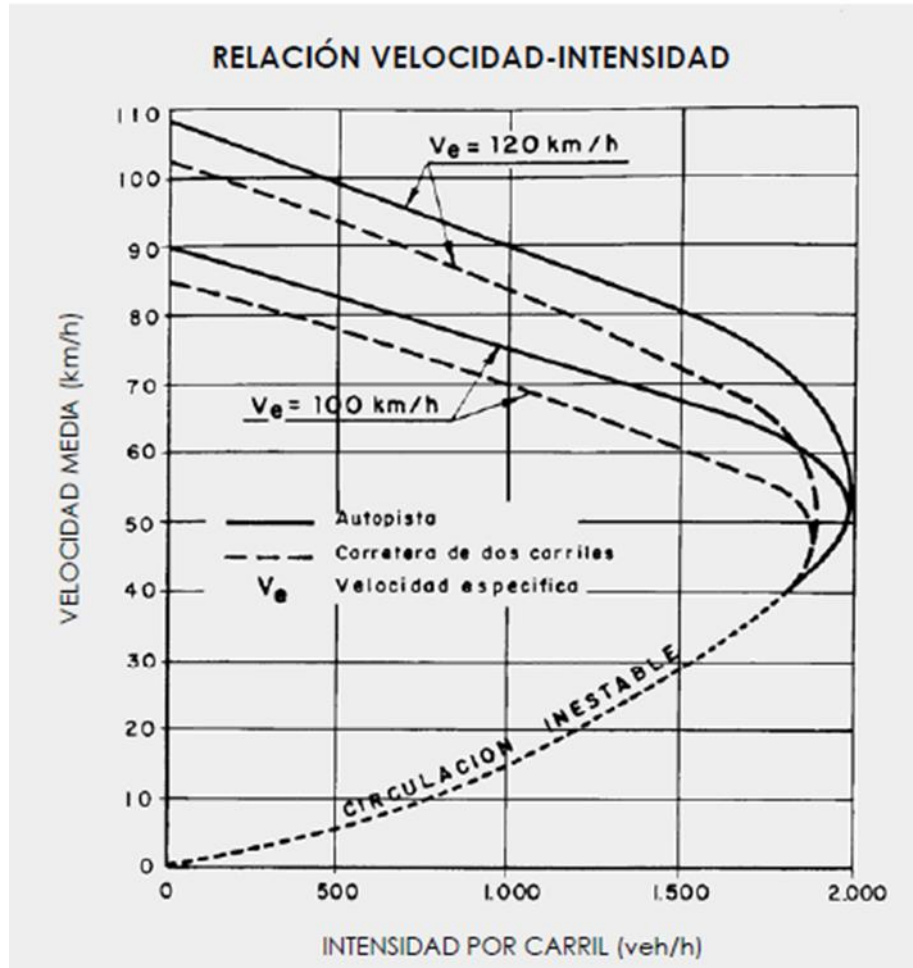


Ilustración 2.2-3: Relación velocidad-intensidad (Balaguer). Fuente: Manual de Carreteras, E., 2000, p. 164.

2.3. Capacidad y nivel de servicio

2.3.1. Capacidad

Se define capacidad teórica de una sección de carretera como el número de vehículos que pueden estar o atravesar la vía durante un determinado periodo de tiempo –normalmente una hora– para unas condiciones particulares de la vía y del tráfico. Dicho de otra forma, es la máxima intensidad capaz de albergar una vía sin colapsarse.

Basándose en el empleo de curvas de distribución de probabilidad, se han desarrollado mecanismos para determinar la capacidad real de una vía en relación con el concepto de capacidad teórica.



Dada la capacidad teórica de una vía existen características propias de esta que limitan el tiempo que emplean los vehículos en recorrer el trayecto, como son: clima, tonelaje, potencia, paradas y habilidad del operario del vehículo, limitaciones que determinan la existencia de un tiempo mínimo para recorrer la ruta.

Establecida la capacidad teórica de la vía en vehículos-hora podemos obtener un número teórico máximo de vehículos que pueden circular. Este valor no es adaptable al estudio real debido a que el tiempo de interferencia promedia para un conjunto de condiciones es proporcional al número de vehículos que operan en un tiempo dado.

La General Electric Company desarrolló los diagramas de avance horario que permiten obtener el número de vehículos máximo reales capaces de circular de modo que no se rebase la capacidad teórica de la vía. Es decir que la capacidad real utilizada sea menor que la capacidad teórica calculada. Dicha capacidad se obtiene de integrar la función de probabilidad de los diagramas de avance horario.

El empleo de estas curvas de probabilidad demuestra que a medida que nos acercamos a la capacidad máxima de una vía, la interferencia entre los vehículos crea demoras y hace aumentar los tiempos mínimos y promedios del viaje.

La capacidad de las carreteras se puede expresar mediante diferentes fórmulas matemáticas, estas expresiones matemáticas se encuentran restringidas por la "distancia segura" que el conductor adopta en su conducción, a su vez la capacidad de una carretera varía con la velocidad y la separación, el conductor tiende a aumentar la separación con la velocidad, aparecen pues los conceptos de separación y velocidad óptima que permita que un número máximo de vehículos pase por un punto en una hora.

Los estudios realizados estipulan que dicha capacidad teórica máxima se encuentra para un flujo de 2000 veh/h a 50 km/h, por otro lado, la máxima densidad se produce cuando hay tantos vehículos que el movimiento cesa por completo. Cuando la densidad aumenta de modo que no es posible rebasar,

el tráfico se mueve aproximadamente a la misma velocidad y la relativa entre vehículos se hace cero, este momento es la densidad crítica u óptima y cualquier aumento da lugar a una reducción en la velocidad y volumen del tráfico.

Las condiciones ideales para el flujo máximo no interrumpido son carriles de 3.66 m, 1.83 m de ancho libre entre acotaciones laterales, nada de vehículos comerciales, y visibilidad ilimitada.

Las interferencias pueden ser: de cruce marginal, intermedio, dirección contraria de un vehículo, etc. A continuación, podemos ver una gráfica que representa la capacidad máxima de un carril en diferentes situaciones.

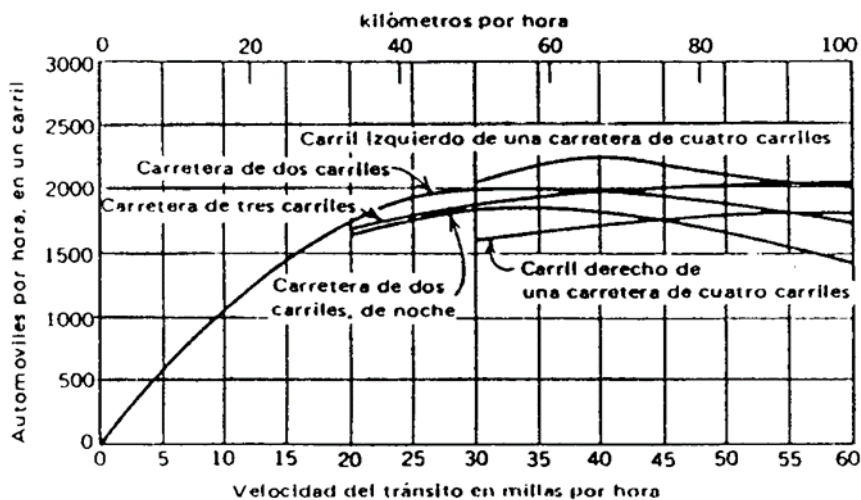


Ilustración 2.3-1: Capacidad máxima de un carril. Fuente: Apuntes Ingeniería de Transporte.

2.3.2. Nivel de servicio

El nivel de servicio en Ingeniería de Tráfico es una medida cualitativa del funcionamiento de una vía cuando soporta una determinada intensidad de tráfico (demanda). Indica la cantidad de transporte necesaria para satisfacer la demanda.

El nivel de servicio, en principio, debería tener en cuenta un conjunto de factores que ocurren en una vía cuando soporta una determinada intensidad de tráfico:



- Velocidad y tiempo de recorrido: tanto instantánea como para recorrer un tramo.
- Interrupciones: número de paradas por kilómetro y su duración, así como la magnitud y frecuencia de los bruscos cambios de velocidad necesarios para mantenerse en la corriente de tráfico.
- Libertad de maniobra para mantener la velocidad deseada.
- Comodidad en la conducción.
- Economía: coste económico directo de recorrer un tramo.
- Accesibilidad: facilidad para acceder a una determinada ruta.
- Frecuencia del servicio: importante en el transporte comercial de pasajeros.

Pero como es muy difícil valorar todos estos factores tan heterogéneos, el Manual de Capacidad de Carreteras (1995) recomienda identificar el nivel de servicio en función de la velocidad o tiempo empleado en recorrer un tramo, y añadir un segundo índice: la relación entre la intensidad de servicio o la intensidad de tráfico prevista y la capacidad, (índice de servicio o relación i/c). En la práctica el conjunto de estos dos índices permite identificar el nivel de servicio de cada tramo.

Para obtener estos índices es conveniente seguir los siguientes criterios:

1. La intensidad y la capacidad se miden en vehículos por hora para cada uno de los subtramos en los que es convenientes dividir el tramo.
2. Los niveles de servicio deben establecerse para tramos de cierta longitud, aunque varíe en ellos la capacidad por cambios físicos de la vía o el tráfico, por entradas y salidas. La clasificación del nivel de servicio del tramo debe tener en cuenta las diversas circunstancias de cada subtramo.
3. Conviene analizar la velocidad o el tiempo de recorrido y la intensidad en subtramos relativamente uniformes. La media ponderada de todos ellos define el nivel de servicio del tramo total.
4. Para definir los niveles de servicio se establecen separadamente valores de la velocidad y de los índices i/c para los siguientes tipos de vías:
 - Autopistas y autovías.

- Carreteras de cuatro o más carriles.
- Carreteras de dos o tres carriles.
- Grandes arterias urbanas.
- Calles céntricas.

Se establecen seis niveles de servicio que comprenden todas las situaciones de tráfico que se pueden producir:

Los niveles de A a D se definen en función de unos límites determinados para la velocidad de servicio y de los índices de servicio i/c . El nivel E corresponde a situaciones próximas a la saturación y el F cuando se rebasa la capacidad de la vía, las condiciones son inestables y la velocidad e intensidad pueden variar considerablemente. Veamos a continuación la figura 2.3-2 con la relación entre los diferentes niveles de servicio y otras variables.

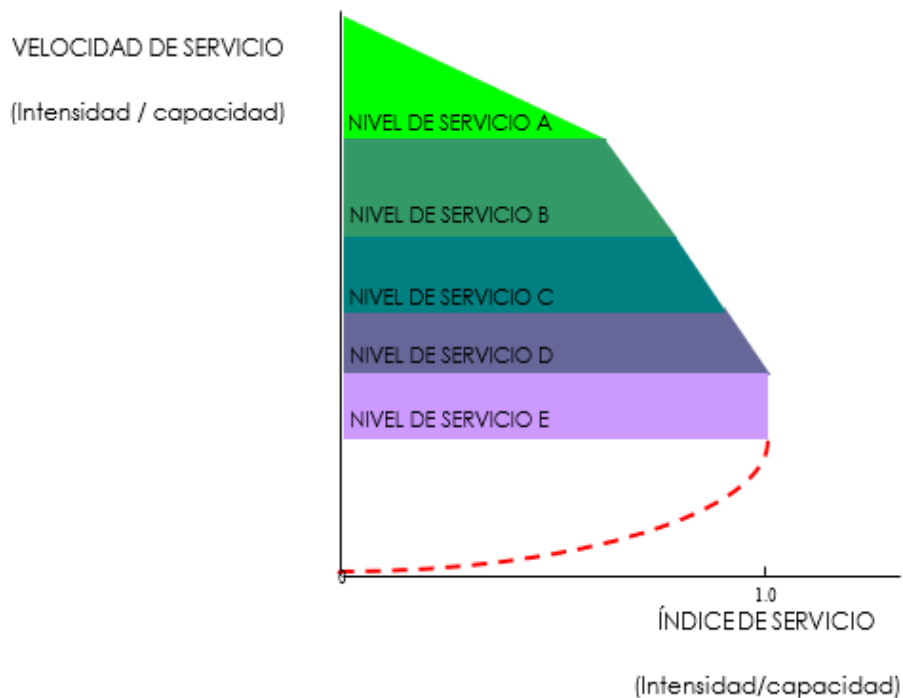


Ilustración 2.3-2: Niveles de servicio. Fuente: Elaboración propia.

2.3.3. Capacidad en intersección con semáforos

Una de las razones fundamentales de interrupción del flujo de tráfico son las intersecciones, principalmente si están reguladas por semáforos. Las

intersecciones que no están reguladas por semáforos mantienen un flujo sin interrumpir en la vía principal por medio de señales de stop en la vía secundaria.

Se establecen seis niveles de servicio en las intersecciones reguladas por semáforo, identificados por las letras A, B, C, D, E y F.

A	<ul style="list-style-type: none"> • Operaciones con muy poca demora (<5 s.) • El avance de vehículos es extremadamente favorable, sin apenas detenerse • La mayoría de los vehículos llegan a la intersección en la fase verde 	
B	<ul style="list-style-type: none"> • Operaciones con ligera demora (5-15 s.) • El avance de vehículos es favorable, produciéndose detenciones esporádicas • Se da en intersecciones con buena progresión y ciclos semafóricos cortos 	
C	<ul style="list-style-type: none"> • La demora es considerable (15 a 25 s.) • La progresión de los vehículos es de mediana calidad y el ciclo es más largo • Detención de un número significativo de vehículos 	
D	<ul style="list-style-type: none"> • La demora es elevada, entre 25 y 40 s. • Notable influencia de la congestión, con progresiones desfavorables y ciclos largos • Muchos vehículos se detienen • Falta de capacidad en ciclos individuales 	
E	<ul style="list-style-type: none"> • Operaciones con gran demora (40-60 s) • Avance lento de los vehículos y largas duraciones del ciclo • Alto grado de congestión • Frecuente falta de capacidad en ciclos individuales 	
F	<ul style="list-style-type: none"> • La demora supera el minuto por vehículo • Nivel inaceptable por los conductores • Sobresaturación: la intensidad de llegada supera la capacidad de la intersección • Progresión deficiente, ciclos prolongados 	

Ilustración 2.3-3: Niveles de servicio en vías urbanas. Fuente: Manual de Carreteras, E., 2000, p. 211.

Existen unos factores que influyen en el nivel de servicio y la capacidad de las intersecciones reguladas por semáforos:



a) Condiciones físicas y de operación: anchura del acceso, distancia de bordillo a bordillo y anchura de los carriles, si la operación es de uno o dos sentidos y si se permite el estacionamiento en las proximidades de la intersección.

b) Condiciones ambientales: factor de carga y factor de hora de máxima demanda. El factor de carga representa el grado en que la luz verde se utiliza mientras dura, es la relación entre el número de fases verdes que están totalmente utilizadas y el número de fases verdes que hay en ese mismo periodo. Varía de 0,0 (siempre que hay luz verde da tiempo a que salgan todos los vehículos que esperaban antes de volverse a cerrar el semáforo) y 1,0 (nunca da tiempo a que salgan todos los vehículos y siempre hay alguno que tiene que esperar más de un ciclo de semáforo). El factor de hora de máxima demanda mide la consistencia de la demanda, se define como la relación entre el número de vehículos contados durante la hora de máxima demanda y cuatro veces los contados durante los quince minutos consecutivos de mayor intensidad. Para intersecciones con cargas muy elevadas durante casi una hora se utilizan factores de 0,85 y para intersecciones con flujos elevados durante períodos cortos se suelen usar factores de 0,6-0,7.

c) Características del tránsito: porcentaje de vehículos que realizan giros (sobre todo a la izquierda), porcentaje de camiones y autobuses (aceleran más despacio que los turismos), autobuses urbanos con paradas en alguno de los accesos a la intersección (las paradas en el acceso de salida entorpecen menos que en el de entrada siempre que no haya muchos giros a la derecha).

d) Medidas de control: señales de tráfico, dónde están colocadas (su visibilidad), duración del ciclo de semáforo y relación entre el tiempo de luz verde y el del resto del ciclo, las marcas en el carril de acceso (que determinan su anchura), pasos de peatones, etc.

2.3.4. Calidad en los factores de servicio

Como ya hemos dicho, nivel de servicio indica la cantidad de transporte necesaria para satisfacer la demanda. La calidad de servicio refleja la manera en que ese servicio se encuentra disponible atendiendo a aspectos tales como:

- Seguridad y confiabilidad.
- Flexibilidad (volumen, mercancía y ruta).
- Rapidez.
- Tiempo de viaje puerta a puerta.
- Economía de energía.
- Efectos en la comunidad y medio ambiente.

2.4. Canalización y control del tráfico rodado

2.4.1. Introducción

La función de control persigue 3 objetivos principales:

- Lograr la máxima seguridad.
- Usar de forma eficiente la red.
- Confiabilidad del movimiento.

El control puede ser algo sencillo o sumamente complejo. Más que un vehículo sea operativo en el sistema de transporte, es necesario asegurar que la colisión no ocurra, o al menos que la probabilidad sea baja, sin embargo, se presenta la necesidad de mover los vehículos tan rápidamente como sea posible con las demoras mínimas. En definitiva, se trata de conseguir una intensidad de circulación máxima, pero esta intensidad es función de la velocidad, como viene reflejado en la ecuación fundamental, por tanto, la solución de nuestro problema será obtener la velocidad óptima de circulación.

Estos objetivos a veces entran en conflicto. Por ejemplo, los vehículos no pueden circular a gran velocidad y con seguridad si se encuentran demasiado próximos. Además de la seguridad, confiabilidad, y rapidez está el objetivo de aprovechar al máximo la capacidad de tránsito. Para ello tendremos en cuenta la velocidad máxima permitida y el horario.

Aunque los medios específicos para efectuar el control de vehículos varían considerablemente entre las tecnologías de transporte, el proceso básico lo podemos resumir en cuatro etapas:

1. Situación que requiera cambio en el movimiento del vehículo.



2. Detección de esa condición.
3. Variación de las fuerzas sobre el vehículo.
4. Cambio de la velocidad, dirección..., del vehículo.

El control incluye llevar registros del movimiento de todos los vehículos, también implica proporcionar información para fines operacionales.

Uno de los problemas principales consiste en determinar que parte del control debe ser automático y que parte se debe dejar al operador. En algunos sistemas el operador puede desempeñar únicamente funciones de vigilancia, combinadas a veces con la posibilidad de anular los controles automáticos en caso de emergencia o cambio de planes.

Los problemas relativos se derivan de la creciente complejidad de los aparatos de control, las velocidades sónicas y supersónicas de algunos transportes y las cada vez mayores densidades de tránsito en medios de densidad limitada, frente al tiempo de reacción y la capacidad de la mente y el cuerpo humano para comprender y tomar decisiones.

La meta es habilitar la detección de cualquier condición que pueda requerir un cambio ya sea en el movimiento, en la velocidad, dirección, altitud, etc., en un tiempo y distancia suficiente para evitar el peligro. Esto supone los cuatro pasos mostrados en el proceso anterior.

Hay muchos tipos diferentes de situaciones que pueden requerir un cambio en el movimiento del vehículo -uno por supuesto es un cambio en la dirección de la vía tal como una curva- que se puedan negociar con seguridad sólo a velocidades reducidas.

Este tipo de situación es fácilmente controlable porque la presencia del peligro potencial es conocida de antemano y se pueden anunciar señales de advertencia apropiadas al conductor.

Las situaciones temporales son más difíciles de tratar, por ejemplo, personas cruzando una calle, otros vehículos en la carretera, cruce de vehículos. Aunque diferentes tecnologías de transporte y asignación de rutas diferentes son sometidas a diferentes variaciones para estas situaciones imprevistas, todos los



movimientos de los vehículos deben ser controlados de manera que tengan en cuenta la posibilidad de imprevistos.

2.4.2. Canalización

Es probablemente la forma más común de control del movimiento de vehículos. La idea básica es la de segregar el movimiento de vehículos en categorías, tal que el movimiento de todos estos vehículos en una categoría sea lo más homogénea posible. Se ha observado que la mediana en las autopistas ha reducido probablemente los accidentes de tráfico más que ninguna otra invención de control de tráfico. La canalización es usada en todas las tecnologías de transporte.

2.4.3. Comunicaciones

Los primitivos sistemas de operación se apoyan en el hábito, las reglas, las señales, los banderines. El control de operaciones moderno no puede existir sin un sistema de comunicaciones adecuado. El telégrafo y más tarde el teléfono, eran suficientes para el transporte de otros tiempos; pero las operaciones actuales requieren extensos sistemas de telefonía, radio, teletipo, ..., que aumentan su efectividad. Hoy en día, en el transporte por carretera, los estudios van encaminados a sistemas que proporcionan una información detallada al usuario para proporcionar una mayor fluidez y aprovechamiento de las vías. Se trata de sistemas expertos que analizan el flujo de tráfico en tiempo real con lo que el conductor dispone de una información actualizada del estado de la vía. Ejemplo de esto, es el aumento en la utilización de dispositivos de GPS en los vehículos.

Las comunicaciones se emplean principalmente para despachar, es decir, para dirigir y seguir el rastro de los movimientos de los vehículos; ejemplo de ello son los taxis, los vehículos de servicio, las flotillas industriales y los vehículos de carga motorizadas.

De esta forma se mantiene el contacto por radio con cada vehículo, anotando los movimientos en un registro y dirigiéndolos hacia tareas sucesivas, consiguiendo así una efectividad mucho mayor.



2.4.4. Límites de velocidad

A menudo hay necesidad de limitar la velocidad de los vehículos en lugares específicos.

Para los sistemas de ferrocarril y carretera, esta limitación la mayoría de las veces se debe a la presencia de curvas o pendientes en la ruta, cercanías de muelles y áreas recreativas, las cuales podrían ser inseguras a elevadas velocidades. Tales restricciones de velocidad están indicadas por señales a lo largo de la ruta, con una antelación suficiente, para advertir la restricción y que el vehículo tenga tiempo de disminuir su velocidad. Igualmente, signos de precaución indican la probabilidad mayor de encontrarnos con condiciones de peligro.

El control del movimiento de vehículos y el control de la velocidad son aplicados para asegurar que un vehículo no colisione con otro viajado en la misma vía. En cruces esto es un problema importante de seguridad. El segundo vehículo debe mantener una distancia de seguridad y una velocidad tal, que pueda parar, o desviarse en el tiempo necesario para evitar al primero. Así el término control de seguimiento es aplicado para cubrir esta situación.

Y utilizamos el término seguimiento de comportamiento en caso donde la conducta humana es un elemento para el control del vehículo y proceso de decisión. Aquí el conductor de cada vehículo es responsable de que su vehículo no colisione con otros objetos y por lo tanto él debe tener en cuenta la posición y velocidad del vehículo que le precede. Por supuesto hay reglas de tráfico pero que no siempre son obedecidas.

2.5. Estudio y planificación del tráfico rodado

2.5.1. Estudio del transporte: Aforos

2.5.1.1. Objetivos de los aforos

Está claro que a la hora de realizar cualquier estudio de tráfico uno de los primeros pasos es la evaluación de los movimientos que se originan, para ello hay que medir el número de vehículos que pasan por un determinado carril en un intervalo de tiempo. Por lo tanto, todos los aforos van encaminados a

conocer aspectos importantes de demanda de tráfico, como, por ejemplo, la intensidad, composición, etc. A continuación, enumeramos los principales objetivos resumidamente:

1. Comparación, sobre bases objetivas, entre unas vías y otras, a los efectos de cualquier programa de actuación.
2. Justificación de las inversiones en las que el tráfico es una variable.
3. Determinación de las características físicas de las vías, especialmente en los cruces, de acuerdo con las necesidades del tráfico.
4. Establecimiento de señalización fija o automática.
5. Asignación de tráfico a nuevas vías.
6. Elemento de investigación.

De los datos de aforos en una vía ya sea calle o carretera, se pueden obtener muchas de las variables relacionadas con el tráfico que se han comentado y explicado anteriormente como son: IMD (intensidad media diaria anual), las intensidades horarias, la composición del tráfico, la distribución por sentidos, los movimientos de giro y la intensidad de tráfico de peatones.

2.5.1.2. Tipos de aforo

Los aforos pueden realizarse tanto manualmente como automáticamente. La utilización de un método u otro viene condicionada por dos aspectos fundamentales:

- Los medios disponibles (principalmente económicos).
- Los resultados que se pretenden.

Los aforos automáticos no son útiles en ciertas situaciones:

- Para estudiar los movimientos de giro.
- Para estudiar la composición del tráfico.
- Las condiciones físicas de la vía impiden la instalación de contadores automáticos.

Los aforos manuales se realizan con dificultad si:

- Las intensidades horarias son muy elevadas.



- Se requiere un conocimiento continuo de la intensidad.

Aforos manuales:

Este tipo de aforos consisten en que un observador anota el paso de cada vehículo rellenando un impreso especial o sobre unos contadores manuales montados sobre bandejas especiales, cada vez que un vehículo realiza el movimiento elemental que se está aforando o estudiando.

Las características principales de estos aforos son que suministran una información más completa durante periodos cortos de tiempo, requieren de un elevado personal adecuadamente preparado y si se pretende mantener la información permanentemente, son costosos y difíciles de llevar a cabo.

Cuando la intensidad horaria es elevada, o bien si se requiere información simultánea de muchos movimientos o de muchos tipos de vehículos, son necesarios varios observadores.

Es aconsejable no pasar de los 800 vehículos/hora por observador si es preciso clasificar los vehículos. A veces se realizan en periodos muy cortos - inferiores a 15 minutos- de este modo un mismo observador puede en una hora recoger datos de varios movimientos diferentes.

Aforos automáticos:

Como mencionamos con anterioridad, estos aforos automáticos no son útiles para estudiar movimientos de giro o la composición del tráfico, pero son muy útiles cuando la intensidad horaria del tráfico es muy elevada.

Los equipos empleados para realizar estos aforos son:

- a) Contadores automáticos: Utilizados hasta hace pocos años y que consistían en que, el vehículo al pisar un tubo de goma extendido sobre la calzada, transmitían un impulso que cerraba un circuito eléctrico (neumáticos).
- b) Totalizadores: con sistema análogo al anterior, solo que van acumulando todos los impulsos que reciben.

- c) Registradores: también funcionan con un sistema similar solo que sobre una cinta se imprime el número de vehículos que pasan en un cierto tiempo, para ello va provisto de un sistema de relojería. Son los más utilizados, pero también son los más caros. Algunos registran gráficamente el paso de vehículos.
- d) Otros sensores más complejos que se han extendido últimamente son los de presión, electromagnéticos, electrónicos o los fotoeléctricos.

El objetivo fundamental es contar el número de vehículos que pasa por la calzada, pero son utilizados cuando el objetivo no es sólo el aforo sino también para el control electrónico de un cruce, semáforo, ...

2.5.1.3. Aforos en zonas urbanas

Como es razonable pensar, el tráfico presenta unas características muy distintas en las vías urbanas y suburbanas que en las carreteras situadas en pleno campo. Los ciclos anual y diario son más uniformes, la saturación es más frecuente, las intersecciones están más próximas y la distribución por sentidos es casi siempre más equilibrada.

Además, los objetivos de los aforos son distintos. En las ciudades interesa más la intensidad en la hora punta que la IMD, y son más frecuentes los aforos encaminados al estudio de una solución determinada.

La uniformidad característica de los ciclos de tráfico urbano permite simplificar los planes de aforos pudiéndose reducir a estaciones de cobertura aforados durante 24 o 48 horas y a muy pocas estaciones de control o permanentes, e incluso se puede prescindir de los sábados, domingos y festivos, pues en estos días la intensidad es normalmente inferior.

El Plan de Aforos en una zona urbana consta de las siguientes etapas:

1. Definición del sistema viario que constituye la red a aforar. En años sucesivos se completa el plan inicial.
2. Establecimiento de al menos una estación permanente para definir las variaciones del tráfico, y en ciudades importantes, al menos cuatro estaciones permanentes o de control para definir los ciclos en: centro de



ciudad, vías de penetración al centro, vías tangenciales al centro y zonas periféricas.

3. Realización de programas de aforos de cobertura, con una duración de 24 o 48 horas, que cubra el conjunto de la red a estudiar. Es suficiente con la ubicación de este tipo de estaciones en los tramos de la calle comprendidos entre intersecciones de importancia; aun así, es necesaria una estación de aforo cada 2 a 4 km de calles.

En ocasiones debido a la dificultad que representa seguir el movimiento de cada vehículo, complejidad de movimientos y elevadas intensidades de tráfico, no es fácil conseguir la información, aunque se disponga de los medios, aparatos y operarios necesarios.

Hay movimientos que son prácticamente imposibles de medir mediante la utilización de aforos simples, es preciso obtenerlos a través de otros aforos. En casos muy complicados pueden emplearse procedimientos más complejos como son las encuestas. Uno de estos procedimientos consiste en la toma de matrícula de los vehículos que entran y salen de la intersección.

Hasta 500 vehículos/hora pueden ser registrados por dos operarios, si hay de 500 a 1.000 se utilizan cintas magnetofónicas y si supera los 1.000 veh/hora la toma de datos es prácticamente imposible. El proceso de toma de datos resulta complicado y se estima que son necesarias dos personas día por cada 1.000 vehículos. Si se realiza con ordenador se resuelve con un programa sencillo.

En intersecciones complicadas, pero sin gran intensidad de tráfico, se pueden realizar encuestas parando a los conductores en alguno de los accesos y realizando aforos en todos ellos. Está claro que este método no es válido para zonas céntricas con gran intensidad, por su difícil aplicación.

Las principales variables que intervienen a la hora de aforar una intersección son:

- Intensidad del tráfico.
- Composición.
- Número y disposición de los ramales.



- Espacio disponible y condiciones de observación para hacer los aforos.
- Distancia recorrida por los vehículos dentro de la intersección.

2.5.2. Planificación del transporte

La planificación del transporte tiene diferentes problemas y contienen diversos procedimientos que deberán variar con el nivel en que se lleve a cabo y el tipo de necesidad que se debe satisfacer.

La planificación la efectúan diversos organismos a muchos niveles. Por lo general breve y de índole privada; excepciones notables: empresas privadas que participan en el proyecto de financiación pública.

2.5.2.1. Etapas de la planificación

La planificación y ejecución de los planes sigue por lo general un patrón de acuerdo con las siguientes etapas. Estas etapas son flexibles en relación con el proyecto concreto.

1. Reconocimiento de la necesidad: La necesidad puede ser actual y grave o puede no ser evidente. Basta estudiar las necesidades presentes y futuras.
2. Metas de la planificación: La planificación ha de tener una dirección y un propósito específicos; esto es, establecer objetivos que representen los valores comunales, así como los medios necesarios para lograr estos objetivos.
3. Objetivos de la planificación: Representan la dirección en que una sociedad, (empresarial, urbana, regional o nacional), desea moverse. Los objetivos sirven para lograr las metas, los criterios se aplican para cuantificar los objetivos.
4. Análisis de demanda: Los estudios de demanda son el fondo de información a partir del cual se puede proceder a la planificación. Las cargas de tránsito que ha de soportar el sistema son, en buena medida, función del uso del suelo y de la población.



5. Proyecciones: Establecida la demanda, el tráfico se distribuye entre rutas y modalidades de transporte existentes. Se compara la capacidad actual con la demanda actual y se observa el exceso o falta de capacidad. Se efectúa ahora la elección de modalidades. La demanda del tránsito se proyecta al futuro; se asignan las rutas y se anotan nuevamente los excesos o las deficiencias de capacidad.
6. Diseño de soluciones: Considerar todas las soluciones posibles y desarrollar con más detalle las dos o tres que resulten más prometedoras. Selección de modalidad, diseño y ubicación de la red. Nivel de servicio que se espera dar y el coste económico de cada alternativa. Se toma nota de las consecuencias sociales y medioambientales.
7. Evaluación de alternativas: Se evalúan aquellas seleccionadas para su análisis detallado. Hay que considerar en la evaluación: utilidad o efectividad de las soluciones alternativas, calcular el coste económico de cada una, así como los costes sociales y ambientales y consecuencias significativas de cada solución alternativa. La aceptabilidad por parte del público es un criterio muy importante.
8. Presentación: Los planes que se recomiendan y las alternativas viables se presentan al correspondiente Consejo de Planificación. El cuerpo de planificación rara vez toma las decisiones. Conviene incluir los métodos de financiación que se sugieren.
9. Ejecución del plan: Una vez aprobado y autorizado el plan, establecer métodos de financiación que permitan preparar los planos y diseños finales, adquisición del terreno, presentación de presupuestos y la construcción, seguidos de la etapa final: la operación.

Existe interrelación entre todas las etapas y una coordinación muy estrecha. La planificación inicial puede indicar que el proyecto no se justifica o es impracticable, evitando en este caso un gasto innecesario de recursos y esfuerzos.



2.5.2.2. Concepto de costo

Por lo general el coste de proporcionar u obtener servicios de transporte determina la elección definitiva del tipo de transporte, salvo cuando prevalecen condiciones tecnológicas restrictivas.

El ingeniero de Organización se enfrenta constantemente al problema de elegir prácticas tecnológicas que den como resultado un coste mínimo.

El costo requiere una definición amplia; a continuación, se tratarán distintos tipos de costo y su importancia.

- Costos de capital y costos de operación:

Costes de capital: Lo que cuesta obtener la planta y el equipo iniciales, las ampliaciones y mejoras a esas instalaciones. Desglosamos estos costes en inversiones en ruta y estructura e inversiones en equipo.

Los costes de capital incluyen los intereses que se pagan por capital invertido.

Costes de operación: Los de manejo del negocio de transporte. Dividimos los costes de operación en:

- Mantenimiento de la ruta: Conservar carreteras, vías férreas, pavimentos, capas de apoyo, tuberías, puertos...
- Mantenimiento del equipo: Conservación del equipo motriz y rodante.
- Costes de transporte: Aquellos en los que se incurre al llevar a cabo el transporte; es decir, combustible y energía, sueldos de las tripulaciones, costes de terminal y sueldos de quienes dirigen el movimiento de vehículos.
- Costes de control de tránsito.
- Costes de tráfico: Son los de solicitud de carga, publicidad, publicación de tarifas y administración.
- Costes generales y diversos: Gastos de oficina, de asesoría legal y contabilidad, sueldos de los funcionarios generales y su personal.



- Costos fijos y variables:

Todos los costes se pueden expresar de una de estas dos formas:

Costes fijos: Son aquellos que tienen poca o ninguna relación con el volumen de tráfico e incluso se puede incurrir en ellos cuando no se mueve tráfico alguno. A los costes fijos se les llama también costes indirectos.

Coste variable: Son aquellos que fluctúan con las variaciones del tránsito. A los costes variables también se les llama costes directos.

Los costes fijos y variables se relacionan con el tiempo.

- Corto plazo: período suficientemente corto, como para que la capacidad permanezca fija.
- Largo plazo: período suficientemente largo para que se produzcan cambios en la capacidad.

Si estamos a corto plazo, un aumento del volumen de negocio da lugar al aumento de los costes variables o directos, mientras que a largo plazo un aumento del volumen de negocio puede dar lugar a un aumento de los costes de capital fijos y variables. Es decir, los costes fijos aumentan con los costes de capital y mantenimiento de las nuevas instalaciones, y los costes directos totales pueden aumentar también.

- Costos directos e indirectos:
 - Costes directos: Proviene de y son atribuibles a una operación individual. Son los llamados costes en efectivo.
 - Costes indirectos: Son aquellos en que se incurre debido a la operación de la modalidad de transporte. Solo son asignables a una operación individual, mediante un método de distribución contable más o menos arbitrario.

2.5.2.3. Encuestas para el estudio de la demanda del transporte

Utilizamos las encuestas para profundizar en el conocimiento real de la demanda del transporte, analizando sus características y objetivos, así como su relación con otros factores socioeconómicos.



El fundamento de las encuestas de transporte estriba en el hecho comprobado de que los viajes realizados por un determinado grupo de personas -en cuanto a su forma física y objetivos- se repiten con gran similitud día a día. Las encuestas tratan de identificar la forma en que, durante un día típico, una muestra representativa de cierto grupo de personas realiza sus viajes cotidianos.

No se trata de conocer opiniones ni de realizar preguntas hipotéticas, sino de recoger, clasificar y analizar convenientemente hechos comprobados de cuya consideración objetiva se deducen los resultados de la encuesta.

- Tipos de encuestas:

Según la forma de realizar la encuesta,

- Encuestas que se realizan en la vía pública, deteniendo a todos o a una parte de los vehículos que utilizan una calle o carretera determinada. Generalmente están orientadas a obtener información de viajes de vehículos.
- Encuestas a domicilio, mediante entrevistas con una o varias personas que residen en una misma vivienda. Orientadas a obtener información de viajes de personas, cualquiera que sea el medio de transporte utilizado.
- Encuestas bajo formularios, por tarjetas o impresos entregadas directamente o por correspondencia, orientadas según en qué casos a viajes de vehículos o personas.
- Encuestas por entrevista con fines específicos, como son las realizadas para estudios de estacionamiento o para determinar índices de atracción de viajes hacia determinados centros de actividades.

Otra clasificación sería:

- Internas: estudian el tráfico dentro de los límites de un área urbana.



- Externas: estudian la conexión de un núcleo con el entorno exterior, en general analizando el tráfico que cruza el anillo que lo rodea.

- Encuestas de origen-destino en vía pública:

El objeto fundamental es conocer el origen y destino de los viajes de los vehículos y algunas características de sus desplazamientos, tales como objetos, longitudes de los viajes y ocupación de los vehículos. Existen diferentes tipos:

- a) Para estudiar el tráfico entre la ciudad y el exterior, así como el recorrido interno que hacen los viajes con un extremo fuera de la ciudad. Las estaciones de control se sitúan alrededor de la ciudad o área urbana.
- b) Para conocer las características de los viajes que la cruzan, en muchas ocasiones como comprobación de los resultados obtenidos en una encuesta a domicilio. Se realiza estableciendo una pantalla a través de la zona en estudio.
- c) Para estudiar los desplazamientos de vehículos que efectúan recorridos largos. Con estaciones de control que cubran extensas superficies.

Las encuestas pueden servir para estudiar puntos concretos, o cruces difíciles que no pueden abordarse con simples aforos, por efectuarse dentro de ellas movimientos complicados, difíciles de observar a simple vista.

- Encuestas de origen destino a domicilio:

La entrevista debe recoger toda la información correspondiente a los viajes realizados por cada miembro de la familia o residente en la vivienda mayor de 5 años, en un día determinado, cualquiera que sea el medio de transporte utilizado.

Presentan las siguientes características:

- Es un sistema de información relativamente costoso, pero proporciona datos muy completos y fiables.



- La información es completa en cuanto a los viajes generados, es decir, aquellos en que uno de sus extremos coincide con el domicilio.
- También se puede tener información de los viajes no generados, pero necesito información complementaria: encuestas de aparcamiento, de pantalla o de grandes centros de atracción de viajes.
- Los viajes no generados en los domicilios tienen una importancia pequeña en el conjunto del área urbana - información generalmente cerca del 20%-. Aunque en las zonas céntricas puedan representar un porcentaje considerable de los desplazamientos totales.
- Es fundamental obtener de la encuesta datos que permitan relacionar la demanda del transporte con los factores socioeconómicos y de localización correspondientes al área urbana que se estudia. Se trata en estas encuestas, de obtener correlaciones entre demanda de transporte y factores socioeconómicos en especial datos referentes al uso del suelo.
- Otros tipos de encuestas:
 - Encuestas por tarjetas o correspondencia: Consiste en entregar directamente o enviar por correo unos cuestionarios referentes a las materias que interesa conocer, y que en general se refieren a los desplazamientos realizados durante un día.
 - Encuestas a determinados tipos de vehículos:
 - Vehículos comerciales: los resultados más interesantes de estos estudios suelen ser los que relacionan los viajes con el uso del suelo en el destino, que permiten caracterizar los factores de atracción.
 - Taxis: los resultados son interesantes por la gran presencia de estos vehículos en el centro de las grandes ciudades.
 - Encuestas de estacionamiento:

- Pretenden conocer la situación que existe en un cierto momento y en una determinada zona en cuanto al estacionamiento.
- Pueden estar orientadas:
 - A encontrar una solución a un problema concreto en una zona; se utilizarán estudios de inventario y estudios que determinan el uso del estacionamiento.
 - A obtener una información de base, para aplicarla a otro problema, actual o futuro, que tiene cierta analogía con el estacionamiento; se utilizarán muestreos, siendo más importante recoger aquellos datos que relacionan la demanda de estacionamiento con el uso del suelo, con el objeto de los viajes realizados por los vehículos estacionados y con la duración del propio estacionamiento.
- Hay una serie de factores que afectan a la futura evolución del estacionamiento en cada zona y que sólo se pueden conocer a través de los usuarios.

2.6. Tráfico no rodado: Movilidad urbana

En una ciudad como Valladolid, de un tamaño medio y núcleo denso, el 50% de la movilidad es peatonal.

Debido a que los peatones suponen un movimiento mayoritario se propone que tengan la importancia que requieren tanto en el espacio como en el tiempo.

La aparición de horas punta en el tráfico rodado aumenta el porcentaje de desplazamientos peatonales, así como la existencia de un centro con múltiples usos y servicios. Por otro lado, una alta capacidad económica favorece la movilidad del tráfico rodado.

En zonas urbanas la mayoría de las calles son utilizadas conjuntamente por peatones y vehículos, lo que hace indispensable el estudio del binomio peatón-automóvil para poder proyectar infraestructuras acordes a ambos grupos.

2.6.1. Aspectos iniciales

El movimiento de un vehículo suele ir asociado a un fin, mientras que la movilidad peatonal puede no tenerlo.

Existe la demanda de poder realizar esta actividad de manera placentera. Incluso en algunos casos existe una demanda de carácter deportivo.

Su hándicap es la falta de espacio y de continuidad en su trazado. La movilidad peatonal tiene como característica importante que el movimiento no está normalizado. Los peatones pueden hacer el movimiento que les interese. Esto se deberá tener en cuenta a la hora de diseñar el espacio para ofrecer a cada uno de los peatones espacio suficiente para realizar los movimientos adicionales que quiera.

Su movimiento no está canalizado y se evalúa mediante el cálculo de un Nivel de Servicio, ya que:

- Disponen de libertad de movimiento, de velocidad y de circulación agrupada
- A la hora de moverse, no todos los peatones quieren circular a la misma velocidad. Por ello, la velocidad no será uniforme y se tendrá que dar respuesta a todos.
- Su movimiento se produce por objetivos, placer o deporte.

2.6.2. Análisis del nivel de servicio

Para calcular el nivel de servicio tenemos que definir las variables de partida. Es importante conocer qué criterios siguen los peatones para establecer este nivel de servicio. Estos son:

- Facilidad del movimiento.
- Percepción del entorno, una valoración personal del entorno en el que se mueven.

Las variables de valoración cuantitativa con las que vamos a caracterizar el sistema son:



- Velocidad peatonal: Es la velocidad de marcha peatonal media. Debido a los diferentes tipos de peatones será no uniforme. Por tanto, se deberá tener en cuenta la velocidad media.
- Intensidad: Mide el número de peatones dividido entre la unidad de variación de este flujo. Se utiliza generalmente para un periodo de tiempo de quince minutos. Cuando se habla de intensidad debido a la variabilidad de anchura de los espacios peatonales, no sólo se hace por unidad de tiempo sino también por unidad de superficie.
- Densidad: Por la falta de canalización lo hacemos asignando a cada peatón una superficie.

2.6.3. Movilidad en bicicleta

En España, el uso de la bicicleta como medio de transporte es bastante bajo si lo comparamos con el uso que se le da, por ejemplo, en los países centroeuropeos, como Holanda, Dinamarca o Alemania, donde es una gran alternativa al coche para moverse por la ciudad.

Los ciclistas son uno de los usuarios de las vías urbanas más vulnerables; tienen que circular por calles llenas de vehículos más grandes, al igual que los motoristas no tienen una carrocería que les proteja, su velocidad y capacidad de aceleración es muy limitada, y lamentablemente muchos conductores tienden a ignorarlos o no respetarlos.

La mejor estrategia para dar más seguridad a los ciclistas, y para fomentar el uso de la bicicleta, es que existan carriles bici, separados de los carriles para automóviles y de la acera para peatones, bien diseñados, con la anchura suficiente, sin elementos que estorben ni sean peligrosos (alcantarillas, farolas) y con cruces protegidos. Pero no siempre es posible.

Allí donde no se puede tener un carril bici, ya sea porque no hay espacio, no hay la suficiente voluntad y decisión para crearlos, a costa de reducir espacio para los automóviles, o no hay suficiente dinero para realizar la obra; una



solución intermedia son los carriles de coexistencia, pensados para que las bicis convivan con los automóviles.

2.6.3.1. Carril exclusivo para bicicletas: Carril bici

Ciclovía, carril bici, bicicarril, bisisenda, ciclorruta, vía ciclista, o ciclopista es el nombre genérico dado a parte de la infraestructura pública u otras áreas destinadas de forma exclusiva o compartida para la circulación de bicicletas. La ciclovía puede ser cualquier carril de una vía pública que ha sido señalizado apropiadamente para este propósito o una vía independiente donde se permite el tránsito de bicicletas.

- Dimensiones:

Para que la circulación ciclista fluya de forma cómoda y segura, son necesarias unas dimensiones mínimas que tengan en cuenta, además del espacio que un ciclista necesita para pedalear, el espacio suficiente para que las maniobras de adelantamiento, circulación en paralelo y cruce de ciclistas se produzcan sin riesgo. Las tres dimensiones a tener en cuenta son anchura, radio de giro y pendiente.

- Anchura:

La anchura mínima va a estar determinada por el espacio ocupado por el conjunto cuerpo-vehículo y sus desplazamientos durante el pedaleo. El conjunto bicicleta-ciclista varía dependiendo de las dimensiones de ambos, aunque por regla general se aceptan anchuras de 0.75 metros, alturas de 2,00 metros y longitudes de 1.90 metros. Además, sobre estas medidas hay que tener en cuenta la necesidad de corregir la inestabilidad de la bicicleta mediante cambios de trayectoria, lo que hace que para velocidades normales de circulación de entre 15 y 30 Km/h, la desviación máxima de la trayectoria sobre la línea recta es de 12 centímetros. Por tanto, aceptamos que la sección total ocupada por un ciclista en marcha está en torno a 1 metros de ancho. Para decidir la anchura de la vía ciclista, también debemos tener en cuenta si se trata de una vía unidireccional o bidireccional. Los datos referidos a



continuación varían en función de las guías técnicas utilizadas, si bien, en todas son bastante similares:

- Vías unidireccionales:

En el caso de vías unidireccionales la dimensión mínima de la vía debe ser de 1.50 metros de anchura libre. Algunos documentos señalan que teniendo en cuenta la circulación en paralelo de dos bicicletas y los adelantamientos, se alcanzaría la comodidad con 2 metros.

- Vías bidireccionales:

En vías bidireccionales hemos de tener en cuenta el espacio necesario para que dos ciclistas se crucen de una manera cómoda y sin riesgo de colisión (resguardo de 25 centímetros) para lo cual necesitamos como mínimo 2,25 metros de ancho. Normalmente se recomiendan 2.50 metros para que el cruce de bicicletas se realice de una forma segura.

- Uso compartido:

En el caso de vías ciclistas de uso compartido, los carriles busbici tendrán un sobreecho de entre 0.5 y 1.25 metros, no pudiendo ser su anchura total inferior a 4 metros.

Por otro lado, las vías peatonales y ciclistas de uso compartido habrán de tener al menos 3 metros de anchura.

• Distancia lateral de seguridad:

Cuando la vía ciclista no es de anchura libre, sino que discurre junto a obstáculos laterales discontinuos como árboles, farolas, papeleras, bancos, etc. se recomienda una distancia mínima entre el borde de la vía y dichos obstáculos de 0.5 metros o 0.3 metros. Si el obstáculo es continuo, como por ejemplo una pared, o una valla, la distancia de seguridad será de 0.75 metros o 0.4 metros respectivamente.

En el caso de que la vía ciclista discurra junto a una banda de aparcamientos en línea, habrá que guardar una distancia de seguridad entre el bordillo del aparcamiento y el borde de la vía ciclista de 0.8 metros como mínimo,



permitiendo la apertura de las puertas sin peligro. De igual forma actuaremos en el caso de aparcamientos en batería, para así evitar que el morro de los vehículos invada la vía.

En el caso de que la vía ciclista transite junto a un talud para el que no existe ningún elemento de protección, es aconsejable mantener una distancia de seguridad lateral entre 0.60 metros y 1.5 metros según la pendiente del talud.

Con respecto a la circulación motorizada, debemos establecer un resguardo de seguridad lateral de 0.75 metros cuando la velocidad máxima de los vehículos a motor es de 50 Km/h y de 1.05 metros cuando los automóviles superan dicha velocidad. Estos resguardos serán de 0.5 metros y 0.8 metros respectivamente.

- Radio de giro:

El radio de giro requerido para que un ciclista tome una curva cómodamente depende de la velocidad a la que circula.

En general se recomienda utilizar un radio de giro de 9,98 metros para velocidades de 20km/h. Cuando puntualmente para salvar algún obstáculo o intersección, el radio de giro sea inferior a 3,18 metros (10km/h.) se debe señalar la curva como peligrosa. Cuando el radio es inferior a 2 metros es necesario montar algún dispositivo que obligue al ciclista a bajarse de la bicicleta. El peraltado de las curvas puede reducir en un 10-15% el radio mínimo de la curva.

- Pendiente:

Las pendientes muy pronunciadas hacen a los ciclistas desarrollar un gran esfuerzo, con lo que la vía se hace menos cómoda y pierde atractivo, pudiendo incluso disuadir a algunos ciclistas de utilizarla. Cuanto mayor es la pendiente, menor ha de ser la longitud de la misma.

Relación longitud-pendientes:

Pendientes (%)	Longitud máxima (m)
2	500
3	250
4	125
5	80

Para circunstancias especiales se podrán admitir pendientes superiores en tramos inferiores a 30 metros. En cuanto a pequeñas rampas para salvar obstáculos y bordillos se recomiendan pendiente de entre el 20-25 % como máximo.

2.6.3.2. Carriles de coexistencia: Ciclocarriles

Un ciclocarril es un carril de la calzada lo más a la derecha posible de una determinada calle, en el que se limita la velocidad máxima a la que los automóviles pueden circular, y donde las bicicletas tienen la preferencia. Una ciclocalle es lo mismo, pero para aquellas calles estrechas con un sólo sentido y un solo carril.

En estos carriles, el tráfico está más calmado que en el resto gracias a la inferior velocidad, si en general son 50 km/h en vías urbanas, son 30 km/h o menos en los ciclocarriles, se establece así para que la diferencia de velocidad entre las bicicletas y otros vehículos sea menor y no resulte tan peligroso. Además, las bicicletas pueden circular por el centro del carril, ésto precisamente es lo que indican los dos chevrones de ángulo abierto que se pintan en el centro del carril cada cierta distancia, estos chevrones se denominan sharrows (de share, compartir, y arrows, flechas) y van acompañados del símbolo de la bici y el límite de velocidad específico, con estas marcas viales reconocemos un ciclocarril.

Si un automóvil quiere adelantar a una bicicleta tendrá que proceder a realizar un adelantamiento en toda regla, es decir, hacerlo cambiando de carril, sin obligar al ciclista a ceñirse a la derecha sin dejar distancia lateral suficiente.

Esta solución es mucho más viable, rápida y económica que hacer carriles bici, pues no requiere alterar físicamente la calzada, ni realizar obras, solo emplear un poco de pintura y colocar alguna señal vertical que recuerde qué tipo de carril es.

Por supuesto las bicicletas pueden seguir circulando por cualquier carril de la vía pública como cualquier otro vehículo, pero gracias a los carriles bici o a los ciclocarriles pueden hacerlo con más seguridad.



Ilustración 2.6-1: Señalización de un ciclocarril. Fuente: El Norte de Castilla.

2.6.3.3. Criterios básicos para una movilidad ciclista ideal

El objetivo central no es circular por una vía exclusiva para bicicletas, sino circular en bicicleta de una manera cómoda, segura y atractiva a través de una red viaria adaptada para el tránsito de bicicletas. De aquí se podría deducir que los tres criterios fundamentales serían pues seguridad, comodidad y atractivo.

- Seguridad:

Es sin duda una de las características más importantes que ha de cumplir en la movilidad en bicicleta.

Depende en gran medida del tráfico motorizado: del flujo y la velocidad de vehículos a motor y del grado de segregación entre éstos y los ciclistas.

Cuando el flujo y la velocidad de los automóviles aumentan, aumenta la peligrosidad a la que está expuesto el ciclista, y, por tanto, hay que aumentar



las medidas de protección o segregación. A menor flujo y velocidad, podrán circular conjuntamente ciclistas y vehículos a motor.

Las intersecciones son puntos potencialmente peligrosos, que se ha de diseñar con elementos que favorezcan la seguridad de los ciclistas. Juegan un papel clave la señalización y la visibilidad.

El pavimento juega un papel importante en la seguridad ciclista. Es imprescindible que no resbale y que tenga un buen sistema de drenado de agua que impida la aparición de charcos. Los días lluviosos son especialmente peligrosos si el firme es deslizante.

También hay que considerar la seguridad de los peatones, evitando situaciones de colisión y atropellos. El mobiliario urbano, por ejemplo, contenedores de residuos, han de situarse en lugares en los que los peatones puedan acceder fácilmente sin necesidad de invadir las vías de movilidad ciclista.

- Comodidad y atractivo:

Esta característica determinará en gran medida la mayor o menor aceptación de la red ciclista. Se han de considerar diversos elementos para otorgar comodidad y atractivo a las vías:

- Pendiente: Se han de minimizar las pendientes y los esfuerzos.
- Condiciones climáticas: Tanto por su trazado como con la utilización de elementos físicos, se ha de proteger la vía de las condiciones climáticas extremas. Como, por ejemplo, árboles que aporten sombra.
- Iluminación: Tanto de día (de forma natural si es posible) como de noche (farolas).
- Señalización: Es fundamental una clara señalización, que permita a los ciclistas circular cómodamente, sin dudas de por dónde sigue el itinerario (en caso de acerado compartido, por ejemplo) o de quién posee prioridad en ciertas circunstancias.
- Mantenimiento: Cuando la vía ciclista discurre por zonas de jardines, o posee árboles que le aportan sombra, es necesario

un continuo mantenimiento y poda, evitando que la vegetación invada la vía y que las hojas o flores de los árboles ensucien el pavimento. También es fundamental, para la comodidad de la vía, que cualquier bache o agujero del firme sea rápidamente arreglado.

- Coherencia:

La vía ciclista debe ajustarse a las características geométricas adecuadas al número de usuarios y a la función de la vía. Ha de poseer la adecuada señalización, de manera que resulte evidente su trazado y presencia.

Se debe evitar el conflicto con peatones, no quitándoles espacio, comodidad o seguridad, sino creando un espacio real donde puedan circular las bicicletas. Además, el diseño ha de considerar que la vía esta transitada en todas las épocas del año, con las diferentes condiciones climatológicas.

Finalmente, es importante tener en cuenta no sólo los costes de construcción sino también del posterior mantenimiento de la vía.

- Red conectada y directa:

Las vías ciclistas de un municipio deben concebirse como una red, con todos los tramos e itinerarios conectados entre sí, nunca como piezas sueltas e inconexas. El diseño se creará considerando las ideas de camino más corto y trazados sin rodeos, evitando curvas, cambios de acera, y vueltas sin sentido.

La red debe diseñarse planificándola como un conjunto de vías bien conectadas y comunicadas, evitando tramos que obliguen a los usuarios a hacer cambios innecesarios.

Los cortes en las vías ciclistas provocan situaciones muy peligrosas dado que los usuarios se ven obligados a proseguir por el acerado o incorporarse a la calzada, creando situaciones de gran riesgo si esto no está previsto. Es importante evitar estos cortes. Cuando la vía acabe, es necesario planificarlo y crear un acerado compartido, o una suave incorporación a la calzada.



Por último, las intersecciones han de reducir al máximo el tiempo de espera. Se considera un tipo de corte en la vía ciclista, una intersección que obliga a los ciclistas a un tiempo de espera desmesurado.

Al hablar de red conectada es imprescindible hablar de intermodalidad: la conexión entre distintos medios de transporte urbano. Es uno de los principales factores a tener en cuenta cuando se habla del diseño de redes ciclistas, ya que la mejora que aporta a la movilidad de una localidad es considerable.

En definitiva, se trata de crear una red conectada entre sus distintos tramos ciclistas, pero además con los otros modos de transporte público.

Para ello debe llegar a nodos importantes como pueden ser estaciones de tren, de autobuses, tranvía o metro y aparcamientos disuasorios.

- Calidad:

Una red ciclista de calidad será aquella que cumpla todos los criterios descritos anteriormente. Además, es conveniente tener en cuenta la calidad y dureza del pavimento, que deberá ser adecuado para el tránsito en bicicleta y estar integrado en la zona donde transcurra, bien sea rural o urbana. En sitios como cascos urbanos históricos, o paisajes rurales, habrá que poner especial interés en la integración de las vías ciclistas en el entorno donde transcurren. En general, el diseño de su trazado ha de evitar el paso por zonas ruidosas y contaminadas.

Finalmente, es importante mantener una continuidad y uniformidad en toda la red, por ejemplo, en la señalización, y aunque los distintos tramos o itinerarios se realicen por diferentes constructoras, son necesarias armonía y uniformidad en la red de vías ciclistas, no abandonando los detalles al deseo de la constructora.





Capítulo 3: Estudio y análisis del tráfico en la Rondilla

3.1. Introducción

El área de aplicación de este proyecto es el barrio de la Rondilla, perteneciente a la ciudad de Valladolid, considerado dicho barrio comprendido dentro del entorno que forman las calles Rondilla de Santa Teresa, Santa Clara, Avenida Palencia y los ríos Pisuegra y Esgueva. El barrio de la Rondilla surgió del despegue industrial que Valladolid tuvo en los años 60-70, en los que la ciudad creció de forma desordenada extendiéndose en todas las direcciones e instalándose numerosas industrias a lo largo de las carreteras de acceso sin seguir ningún plan de ordenación. Esto hace que el barrio padezca los típicos problemas inherentes al crecimiento urbano no planificado: congestión del tráfico, fuertes densidades en todo el suelo urbano, falta de espacios libres y equipamientos.

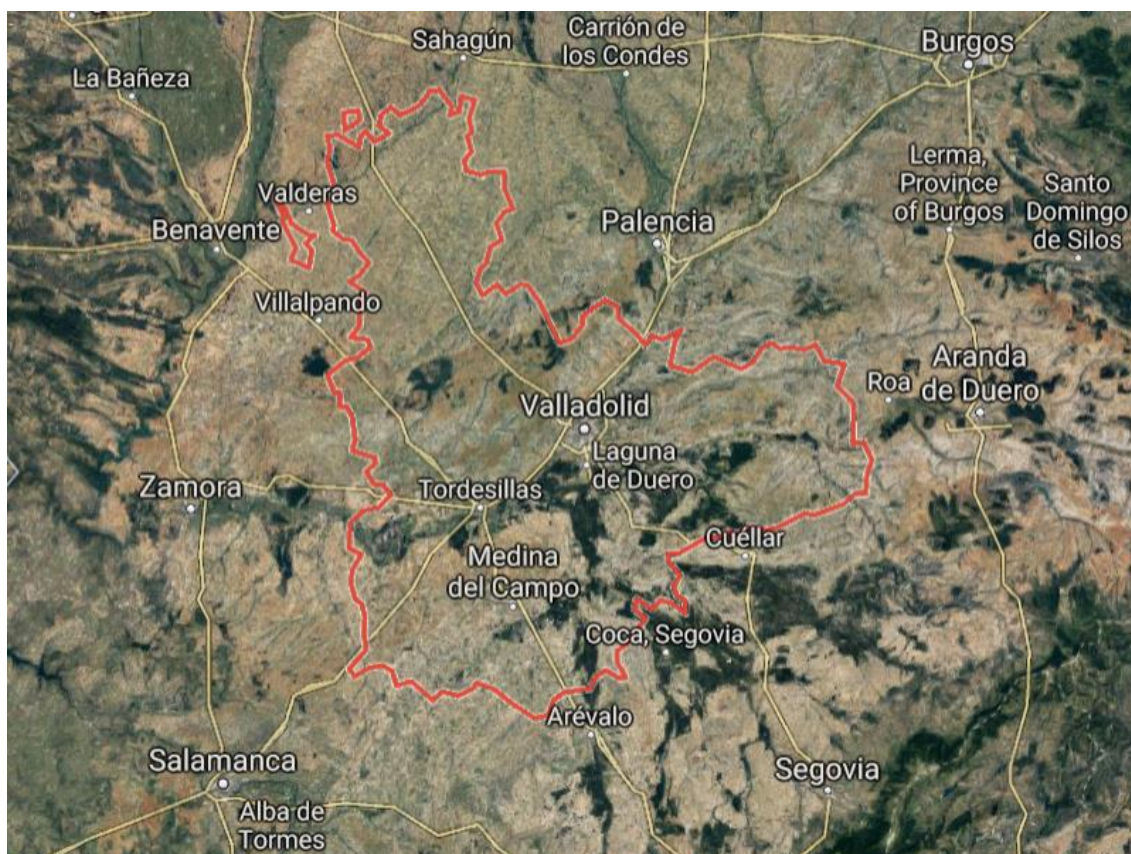


Ilustración 3.1-1: Situación de la provincia de Valladolid. Fuente: Google Maps.

Las comunicaciones por el Sur entre el resto de la ciudad y el barrio, se realiza en estos momentos a través de la calle Cardenal Torquemada, que constituye la arteria principal de distribución del tráfico Norte-Sur, y por el Paseo del

Renacimiento y calle Tirso de Molina hasta conectar con la Calle Torquemada. La salida del barrio hacia el centro, se produce a través de tres calles paralelas que desembocan en la Rondilla de Santa Teresa, estas tres calles son: Portillo de Balboa, Moradas y Mirabel



Ilustración 3.1-2: Barrio de la Rondilla en Valladolid. Fuente: Junta de Castilla y León.

La principal penetración del tráfico por el Este hacia la Rondilla se realiza por la calle Soto, que constituye la arteria principal de distribución del tráfico Este-Oeste, es decir, desde la Avenida Palencia hasta la calle Mirabel. La principal vía de salida del barrio hacia el Este se efectuará por el eje formado por las calles Cardenal Cisneros y Cerrada. La salida y entrada del barrio hacia el Oeste se efectuará por el puente de Doña Eylo y por la calle Rondilla de Santa Teresa.

Algunos datos del barrio se dan a continuación:

- Superficie total de 82 hectáreas aproximadamente (2,5% del suelo urbano de Valladolid) sobre la que se ubican 11.645 viviendas.



- Población de 24.524 habitantes (según datos actualizados por el Ayuntamiento a 1 de Julio de 2010).
- Cuenta con un total de 9.084 turismos, que dan lugar a unos niveles de motorización de 384 vehículos por mil habitantes.
- Parque de vehículos: 10.890.

La mayoría de los datos que se han usado en el modelo del barrio de la Rondilla han sido aportados por el Gabinete de Movilidad Urbana, Área de Seguridad y Vialidad del Ayuntamiento de Valladolid. Los planos de la zona de estudio, datos de espiras y los planes de control semafórico nos aportan que la simulación sea más fiable y parecida a la realidad.

La veracidad de las conclusiones de nuestro estudio estará condicionada por la elección del modelo unido al análisis de datos que más se adapte a las características del tráfico.

El estudio que vamos a realizar será de la situación de la Rondilla, tanto de la actual como de una posible situación en el futuro.

- Intervalos de tiempo a estudiar:

En este trabajo se busca simular la propuesta del Ayuntamiento de Valladolid de incorporar ciclocarril a las calles Soto y Mirabel para la primavera 2019-2020, y así intentar mejorar dicho planteamiento para que se produzca, en los años próximos, un aumento del porcentaje de ciclistas por nuestra ciudad.

Para conocer cuál es el intervalo del día en el que la circulación de vehículos en la ciudad de Valladolid es el mayor, utilizamos el Plan Integral de Movilidad Urbana Sostenible y Segura de la Ciudad de Valladolid (PIMUSSVA). En él se puede ver que el tramo del día en el que mayor número de desplazamientos tiene lugar es el periodo que transcurre de 8:00 a 9:00 y de 14:00 a 15:00 produciéndose casi un 20% del total de los viajes diarios en la ciudad entre los dos. Pero el mayor volumen de desplazamientos se registra en el periodo de

14:00 a 15:00, en el cual se realizan 60.502 desplazamientos que representan el 9,2% del total.

Hora	Viajes	%
6 - 7	8.479	1,3%
7 - 8	28.537	4,4%
8 - 9	49.383	7,5%
9 - 10	37.873	5,8%
10 - 11	33.571	5,1%
11 - 12	46.283	7,1%
12 - 13	46.204	7,1%
13 - 14	49.874	7,6%
14 - 15	60.502	9,2%
15 - 16	45.274	6,9%
16 - 17	27.744	4,2%
17 - 18	47.988	7,3%
18 - 19	41.270	6,3%
19 - 20	44.235	6,8%
20 - 21	41.302	6,3%
21 - 22	22.469	3,4%
22 - 5	24.328	3,7%
Total	655.316	100,0%

Ilustración 3.1-3: Distribución de los viajes según la hora de inicio. Fuente: PIMUSSVA, Plan Integral de Movilidad Urbana Sostenible y Segura de la Ciudad de Valladolid, E., 2015, p. 54.

Ajustando nuestra simulación a la hora punta, fijaremos el intervalo de tiempo entre las 13:30 hasta las 15:30 para tener en cuenta el tramo de mayor influencia (14:00 a 15:00) y la subida y bajada de tráfico anterior y posterior a esa hora punta.

3.2. Descripción y construcción del modelo base

3.2.1. Introducción al Software AIMSUN

El programa con el que se ha llevado a cabo la realización de este Trabajo de Fin de Grado es AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks) es un software de modelado de transporte integrado



de origen español, desarrollado por la empresa TSS (Transport Simulation Systems) y la Universidad Politécnica de Cataluña desde 1989.

Permite modelar una red de transporte a nivel microscópico, simulando vehículo a vehículo, interacciones reales como adelantamientos, bloqueos de cruces, giros conflictivos, formación de colas y demás problemas que surgen en las vías. También permite definir el razonamiento del conductor para la selección de rutas antes y durante el viaje mediante diferentes algoritmos de selección basados en costes y probabilidades.

Con este software también es posible definir el transporte público mediante sus principales características: líneas, horarios, rutas, diferentes tipos de vehículos para cada servicio de transporte y tiempos de parada en las paradas.

También permite gestionar y controlar el tráfico ofreciendo la posibilidad de evaluar y mejorar cualquier combinación de estrategias. Permite simular eventos imprevisibles como accidentes, eventos planeados como trabajos en la calzada o modelar operaciones mediante las cuales modifica el comportamiento de los vehículos mejorando el flujo de tráfico. También permite modelar diferentes tipos de planes de control semafórico (fijo o dinámico).

A nivel macroscópico es posible localizar detectores de manera óptima cubriendo toda la demanda de tráfico, ajustar matrices origen-destino obsoletas o tratar determinadas zonas de la red de manera independiente. Este software de simulación se utiliza para la realización de estudios de movilidad y planificación de transporte. Es una herramienta para el diseño, reforma y mejora de la infraestructura vial, reducción de la congestión de tráfico, realización del diseño de entornos urbanos y no urbanos para vehículos y peatones y también en la reducción de emisiones contaminantes.

3.2.2. Desarrollo de un modelo AIMSUN

Los pasos que se deben seguir para desarrollar un modelo con este Software son los siguientes:

1. Determinar la zona de estudio y crear una red viaria a partir de planos o imágenes. Sobre éstos se representan secciones (segmentos de

carretera), intersecciones (cruces y rotondas), pasos de peatones, señales viarias y todos los elementos geométricos de que conste la red. Una vez definida la geometría se determina la demanda de tráfico, el plan de control semafórico y el plan de transporte público. Por último, se pueden representar peatones.

2. Determinar la medida de los parámetros necesarios. En este estudio se exponen características, como parámetros y herramientas de los modelados microscópicos y macroscópicos.
3. Validación del modelo. Consiste en la comparación de los datos reales disponibles con los resultados de la simulación, de acuerdo a unos límites de error, para evaluar en qué medida los resultados corresponden a la realidad.
4. Evaluar y analizar los resultados obtenidos.

3.2.3. Recreación de la situación sin sendas ciclistas del barrio de La Rondilla con AIMSUN

Para establecer la situación real y normal del barrio de La Rondilla, que sirva como base para estudios posteriores, se ha partido de un plano de la ciudad de Valladolid en formato CAD, dónde delimitamos la zona correspondiente al estudio.



Ilustración 3.2-1: Delimitación de la zona de estudio. Fuente: Ayuntamiento de Valladolid.

Los elementos que componen el modelo son los siguientes:

- Secciones: Vías, número de carriles, tipo de vía, estimación de capacidad de vías y velocidad de vehículos.
- Nodos: Cruces e intersecciones.
- Señales de tráfico: Semáforos, ceda el paso y paso de peatones.
- Modelado de vehículos.

- Secciones:

Las secciones representan segmentos de carretera, con ellas se realiza el modelo de toda la red viaria. En las secciones se pueden modificar el número de carriles que sean necesarios y el ancho de estos. Además, permiten limitar la velocidad de circulación de los vehículos por cada una de ellas y su capacidad, es decir, el volumen máximo de vehículos por hora que pueden circular.

En el proyecto que se ha realizado se han creado secciones con dos usos distintos, o mejor dicho, destinadas a dos tipos de vehículos distintos.

La mayoría de las secciones son para simular el tráfico de los coches y autobuses cuyas características son las mismas que las de cada carretera del barrio de la Rondilla.

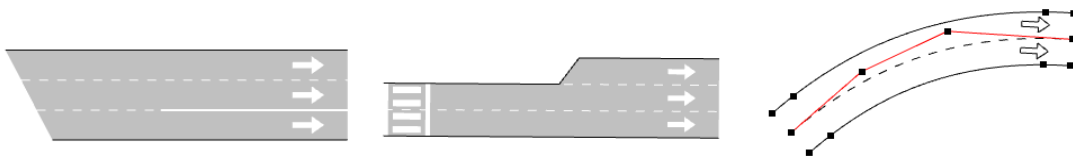


Ilustración 3.2-2: Secciones. Fuente: AIMSUN.

- Nodos:

Son puntos de una red en los que los enlaces se unen y un viaje puede cambiar de dirección. Las secciones se unen mediante intersecciones para representar los cruces denominados "nodos" y las rotondas de la red que simplemente son una sucesión de secciones unidas entre ellas mediante nodos.

Dentro de los cuadros de diálogo de cada nodo se incluyen las señales de ceda el paso y stop y los grupos semafóricos con los que se crea el plan de control semafórico.

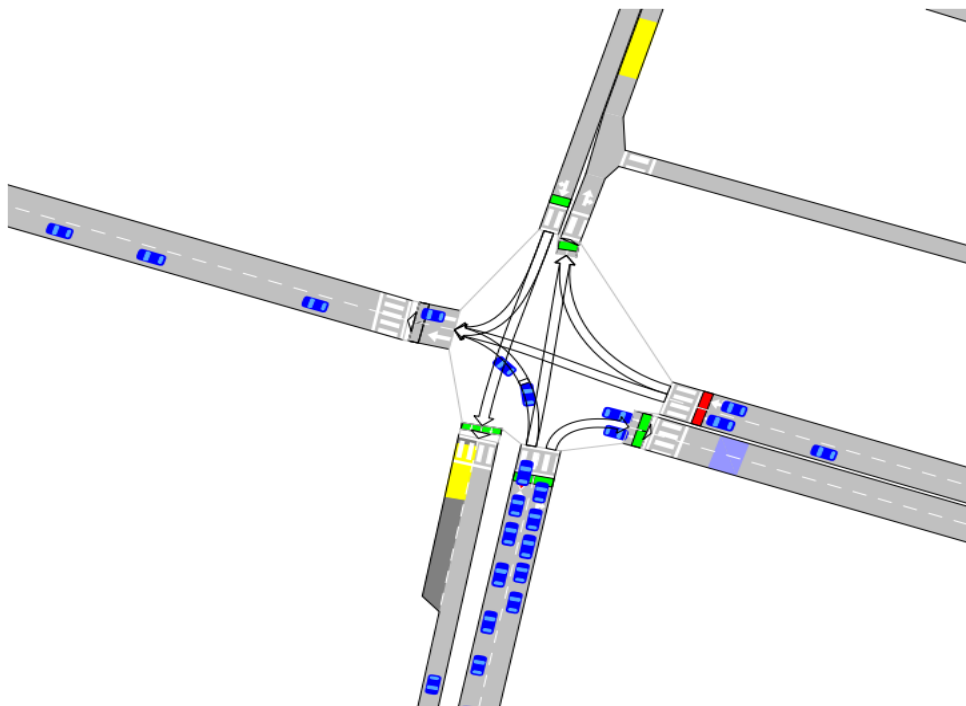


Ilustración 3.2-3: Intersección. Fuente: AIMSUN.

- Señales de Tráfico:

Los semáforos son los elementos reguladores del tráfico por excelencia en las zonas urbanas. En cada uno de los accesos a la intersección se coloca al menos un semáforo. Teniendo en cuenta las posibles combinaciones de luces rojas y verdes que pueden estar simultáneamente encendidas en la intersección, se definen dos conceptos:



- Fase: Tiempo durante el que puede realizarse un determinado movimiento dentro de la intersección, es decir, el tiempo durante el cual una serie de semáforos permanecen en verde.
- Ciclo: Tiempo necesario para que vuelvan a repetirse las mismas condiciones de regulación dentro de la intersección, dicho de otro modo, el resultado de la suma de las diferentes fases.

Las intersecciones reguladas por semáforos son una de las situaciones más complejas en el sistema circulatorio. El análisis de intersecciones reguladas por semáforos debe considerar una gran variedad de condiciones prevalecientes, incluida la cantidad y la distribución del tráfico rodado, la composición del mismo, las características geométricas, y los detalles de la semaforización de la intersección. Cada intersección tiene asociado un plano con la situación de los semáforos y los tiempos en verde, ámbar y rojo de cada uno.

- Plan de control semafórico:

Para crear un plan de control semafórico en primer lugar se crean grupos semafóricos editando los nodos correspondientes de la intersección donde se quiere crear el plan.

Un grupo semafórico es un conjunto de giros que se ponen al mismo tiempo en rojo, ámbar y verde. Cada señal representa un semáforo, aunque puede ser utilizado para dos o más semáforos iguales de secciones distintas. El plan de control semafórico se realizó con los datos proporcionados por el Ayuntamiento de Valladolid.

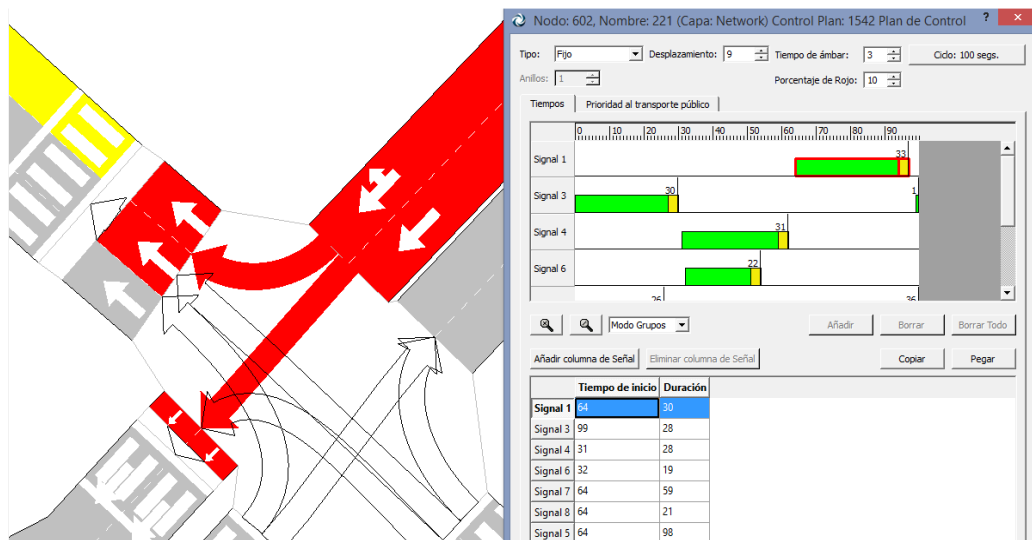


Ilustración 3.2-4: Ciclos semafóricos. Fuente: AIMSUN.

Una vez establecidos los elementos necesarios que componen la situación original, el siguiente paso es establecer el modelado de los vehículos y de la demanda de tráfico:

- Modelado de vehículos:

Por defecto existen vehículos cuyos parámetros están determinados según una distribución normal, de forma que cada vehículo que se representa es diferente del resto. Estos parámetros son fundamentales en el proceso de calibración del modelo.

Para el modelado de nuestra red se han utilizado, en las dos primeras simulaciones, dos tipos de vehículos y en las dos últimas se ha añadido un tercer vehículo, protagonista del proyecto.

- Coche: A partir de los datos obtenidos de los coches sacaremos unas conclusiones de nuestros modelos, ya que uno de los principales objetivos es mejorar el tráfico o igualar la

situación actual en la zona de estudio. Se incluyen en la simulación de modelos 1, 2 y 3.



*Ilustración 3.2-5: Representación de un coche.
Fuente: AIMSUN.*

- Autobús: Los datos de los buses no se comparan, pero se incluyen en el modelo para hacerlo lo más parecido posible a la realidad. Se incluyen en la simulación de modelos 1, 2 y 3.



*Ilustración 3.2-6: Representación de un autobús.
Fuente: AIMSUN.*

- Bicicletas: Son las protagonistas del proyecto. Se incluyen en la simulación de los modelos 2 y 3.



*Ilustración 3.2-7: Representación de una bicicleta.
Fuente: AIMSUN.*

- Peatones: No vamos a simular su comportamiento; pero los vamos a usar como sustitución a las bicicletas en los Carriles bici ya que el Software no nos permite simular dos demandas de tráfico (Ciclo Carril y Carril Bici) con el mismo símbolo. Se incluyen en la simulación de modelos 1, 2 y 3.



Ilustración 3.2-8: Representación de un peatón.
Fuente: AIMSUN.

3.2.3.1. Modelado de la demanda de tráfico

En el modelo que hemos realizado, para obtener los datos de la demanda se han combinado los datos de espiras proporcionados por el ayuntamiento con planes de aforos "in situ".

La demanda de tráfico se representa a través de matrices de origen-destino (matrices O/D).

- Matrices O/D: Dados una serie de puntos de origen y de destino de la red viaria, esta matriz relaciona cada origen con cada destino, representando el número de vehículos que parte desde cada origen a cada destino. A estos puntos de origen y destino se les denomina 'centroides'. Estas matrices se definen por cada tipo de vehículo y por cada periodo de tiempo que se quiera representar hasta que se cubra toda la demanda de tráfico del periodo completo de estudio. Cuantos más pequeños sean estos periodos de tiempo se alcanza mayor precisión ya que la demanda de tráfico es un parámetro dinámico.

AIMSUN permite realizar operaciones en las matrices como multiplicaciones, restas y sumas, facilitando así los cálculos de las futuras simulaciones.

Para realizar la matriz O/D se ha utilizado la información de las encuestas de origen-destino de las que se disponía de proyectos anteriores, que tratan de identificar la forma en que, durante un día típico, una muestra significativa de cierto grupo de personas realiza sus viajes cotidianos. Uno de los datos de la encuesta es el origen y destino de los viajes. La encuesta se realizó en la vía

pública, encuestando a parte de los vehículos que utilizaban la calle en esos momentos.



Ilustración 3.2-9: Lugares en los que se realizó encuesta. Fuente: Ayuntamiento de Valladolid.

La encuesta se realizó los días 26, 27, 28 y 29 de noviembre de 2015. Los lugares escogidos para su realización fueron vías de acceso o de salida de la Rondilla, escogidos tras la realización de aforos previos.

La duración de la encuesta a cada persona fue de aproximadamente un máximo de 30 segundos y en la mayoría de las calles se realizó mientras los semáforos estaban el rojo.

Una vez realizadas las encuestas, el objetivo fue su estudio para la elaboración de las matrices O/D, las cuales representarán un intervalo de tiempo de 30 minutos cada una y sus valores dependerán del periodo horario y el vehículo al que representan.

En nuestros tres modelos se diferencian un total de doce matrices. Cuatro de ellas hacen referencia al coche, cuatro a las bicicletas que circulan por los



Carriles Bici y otras cuatro para las que lo hace por los Ciclo Carriles. Para cada tipo de vehículo se distinguen cuatro periodos horarios: 13:30-14:00, 14:00-14:30, 14:30-15:00, 15:00-15:30.

- Análisis de la situación actual

Para poder fijar las directrices de toda la actuación debe conocerse exactamente el estado actual del sistema. Este conocimiento debe alcanzar tres aspectos fundamentales: la descripción de la red actualmente existente, la cuantificación de la demanda actual de tráfico de las distintas secciones de la red y la valoración del funcionamiento de la red presente.

La información de la demanda de tráfico se ha definido con los datos de las espiras de los puntos de medida proporcionados por el Ayuntamiento (datos de aforos por periodos horarios) y los datos que aparecen en el Plan Integral de Movilidad Urbana, Sostenible y Segura de la Ciudad de Valladolid (PIMUSSVA).

La precisión de estos datos y su posterior análisis es uno de los factores que más determinan la exactitud con la que se calcula.

Los datos de las espiras muestran el valor de la Intensidad Media Diaria (IMD), es decir, el número medio de vehículos que pasan por una sección al día medido a lo largo de un año.

UBICACIÓN	P.M.	2015	
		Laboral	Festivo
RONDILLA SANTA TERESA -> GONDOMAR (CARDENAL TORQUEMADA)	PM020301	5184	3180
RONDILLA SANTA TERESA -> PASEO RENACIMIENTO (SANTA CLARA)	PM020401	11291	7405
GONDOMAR -> CHANCILLERÍA (CHANCILLERÍA)	PM020501	3473	2052

REAL DE BURGOS -> HUELGAS (CHANCILLERÍA-ENTRADA)	PM020602	9241	6387
CARDENAL TORQUEMADA -> RONDILLA SANTA TERESA (SAN PABLO)	PM021301	9393	6166
AVDA. PALENCIA -> SANTA CLARA (AMOR DE DIOS)	PM022001	7020	4925
AMOR DE DIOS -> MADRE DE DIOS (AVDA. PALENCIA)	PM022002	3347	2160
AVDA. PALENCIA -> AVDA. SANTANDER (PENITENCIA)	PM022101	4680	3074
AVDA. PALENCIA -> SANTA CLARA (PENITENCIA)	PM022102	7412	5193
AVDA. PALENCIA -> AVDA. SANTANDER (REAL DE BURGOS)	PM022201	4123	2845
RÁBIDA -> PORTILLO DE BALBOA (CARDENAL TORQUEMADA)	PM023201	3043	2038
RÁBIDA -> EURO (CARDENAL TORQUEMADA)	PM023202	1972	1317

Ilustración 3.2-10: Datos de aforo permanente expresados en IMD, vehículos/día. Fuente: PIMUSSVA, Plan Integral de Movilidad Urbana Sostenible y Segura de la Ciudad de Valladolid, E., 2015, p. 61.

Una vez definidos los fundamentos teóricos, es indispensable recabar información acerca de las características de la circulación de vehículos con la que lograr una validación aceptable del modelo. Para ello comparamos los datos de flujo de vehículos obtenidos en AIMSUN y los datos de las espiras introducidos en el AIMSUN. Se multiplicaron los datos de las IMD de las espiras por el porcentaje que representa el total de viajes del transporte privado durante la hora de la simulación, en nuestro caso la hora punta (14:00 -15:00), periodo en el que se registra mayor volumen de desplazamientos a lo largo del día. Este dato aparece en el Plan Integral de Movilidad Urbana, Sostenible y Segura de la Ciudad de Valladolid (PIMUSSVA), el cual representa un 8,6% del total de viajes y corresponde con 7.349 desplazamientos.

Hora	A pie		Transporte Público		Vehículo privado		Otros		Total	
	Nº viajes	%	Nº viajes	%	Nº viajes	%	Nº viajes	%	Nº viajes	%
6 - 7	864	0,2%	146	0,2%	6.011	3,1%	1.457	5,5%	8.479	1,3%
7 - 8	7.053	2,0%	3.892	4,5%	16.595	8,4%	998	3,8%	28.537	4,4%
8 - 9	21.022	6,1%	6.236	7,3%	19.888	10,1%	2.238	8,5%	49.383	7,5%
9 - 10	21.788	6,3%	4.001	4,7%	10.449	5,3%	1.634	6,2%	37.873	5,8%
10 - 11	23.259	6,7%	4.962	5,8%	4.536	2,3%	813	3,1%	33.571	5,1%
11 - 12	34.653	10,0%	5.874	6,9%	5.146	2,6%	610	2,3%	46.283	7,1%
12 - 13	35.748	10,3%	5.038	5,9%	4.910	2,5%	507	1,9%	46.204	7,1%
13 - 14	29.307	8,5%	7.040	8,2%	11.261	5,7%	2.266	8,6%	49.874	7,6%
14 - 15	26.907	7,8%	7.349	8,6%	22.855	11,6%	3.392	12,9%	60.502	9,2%
15 - 16	18.071	5,2%	4.907	5,7%	20.003	10,2%	2.292	8,7%	45.274	6,9%
16 - 17	12.906	3,7%	4.173	4,9%	9.884	5,0%	781	3,0%	27.744	4,2%
17 - 18	27.689	8,0%	8.460	9,9%	10.446	5,3%	1.393	5,3%	47.988	7,3%
18 - 19	23.451	6,8%	5.310	6,2%	11.013	5,6%	1.495	5,7%	41.270	6,3%
19 - 20	24.784	7,2%	5.584	6,5%	12.991	6,6%	876	3,3%	44.235	6,8%
20 - 21	20.456	5,9%	6.976	8,2%	12.761	6,5%	1.110	4,2%	41.302	6,3%
21 - 22	10.350	3,0%	3.353	3,9%	7.639	3,9%	1.127	4,3%	22.469	3,4%
22 - 5	8.247	2,4%	2.236	2,6%	10.485	5,3%	3.359	12,8%	24.328	3,7%
Total	346.555	100,0%	85.538	100,0%	196.874	100,0%	26.349	100,0%	655.316	100,0%

Ilustración 3.2-11: Distribución de los viajes según hora de comienzo y modo básico. Fuente: PIMUSSVA, Plan Integral de Movilidad Urbana Sostenible y Segura de la Ciudad de Valladolid, E., 2015, p. 56.

Los cálculos realizados hacen referencia al número de vehículos por hora y serán los que usaremos en la simulación de nuestro modelo mediante ajustes en la Matriz O/D para conseguir la mayor exactitud posible.

- Análisis de la situación futura

Una etapa fundamental en un proceso de planteamiento de transportes que afecta a un área determinada es la estimación del número de viajes de personas o de vehículos que han de producirse en un cierto futuro, y de su distribución.

Para poder escoger acciones que permitan alcanzar los objetivos propuestos en el planteamiento, es necesario disponer de una metodología que permita efectuar previsiones y conocer cuál será el funcionamiento del sistema de carreteras en un futuro si se llevan a cabo o no determinadas actuaciones.



El método escogido para realizar el modelo de la situación futura ha sido el método del factor uniforme.

Método del factor uniforme: Supone que el tráfico futuro entre dos zonas (X_i) será igual al actual (X_0), multiplicado por un factor de crecimiento uniforme para todo el área (F).

$$X_i = F_{AB} \times X_0$$

Con este método sólo se puede esperar una precisión relativa, especialmente a largo plazo. La razón de ellos es que la demanda de tráfico depende de un gran número de factores, muchos de ellos independientes de la red de carreteras, tales como el nivel de desarrollo económico, la localización de las distintas actividades industriales o la política llevada a cabo con otros medios de transporte. Para hacer una previsión correcta del tráfico habría que disponer de proyecciones precisas de todos estos factores, lo que en muchos casos es imposible.

3.2.4. Tipo de modelo

El tipo de modelado que se ha utilizado de entre los tres diferentes que permite realizar AIMSUN ha sido el modelado microscópico.

La realización de nuestra simulación se ha hecho desde el punto de vista dinámico, ya que hemos observado las simulaciones vehículo a vehículo, la formación de colas, el cambio de los semáforos y el resto de las características de la red durante la simulación para poder identificar y resolver los problemas existentes. El tipo de modelado elegido es el único que permite este tipo de estudio.

Para los objetivos que se quieren alcanzar en el proyecto este es el modelo más adecuado, ya que el tamaño de la red y los datos de los que disponemos nos lo permiten.

3.2.5. Validación del modelo

La validación del modelo se ha llevado a cabo mediante una regresión lineal, ya que esta técnica estadística nos permite modelar e investigar la relación que hay entre dos o más variables.

En nuestro caso para identificar la validez del modelo utilizamos dos variables, X e Y.

- X: variable independiente de la regresión que representa los datos reales de las espiras.
- Y: variable dependiente de la regresión que representa los datos que se recogen en los detectores que se han situado en el modelo, igual que las espiras en la realidad.

La regresión que hemos obtenido será similar a la que se muestra en la figura:

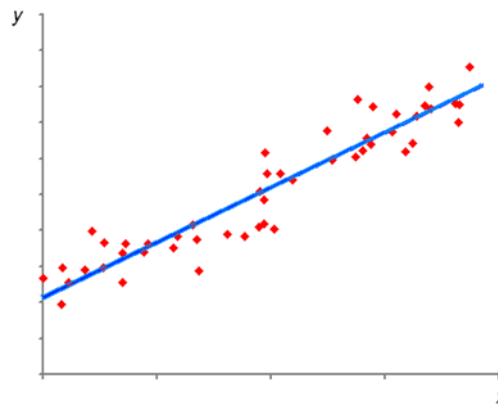


Ilustración 3.2-12: Representación de valores (x, y). Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, la nube de puntos se ajusta a una recta cuya ecuación será del tipo:

$$y = ax + b$$

Ecuación 3.2-1: Ecuación de la recta.

- El valor de b es el que toma la variable independiente cuando la variable dependiente x es igual a 0, y es el punto donde la recta corta al eje de ordenadas.
- El valor de a es el de la pendiente de la recta, es decir, el grado de inclinación.

En el proceso de validación el objetivo que se quiere cumplir es que la red sea lo más parecida posible a la realidad y que represente de forma precisa el tráfico real de la zona de estudio.

La validación sólo se pudo obtener en el modelo real ya que es del único del que disponemos de los datos de espiras, para el resto de los modelos no podemos obtener la validación ya que los datos se obtienen a partir de estimaciones y suposiciones. Los puntos negros representan los datos simulados y los azules los reales.

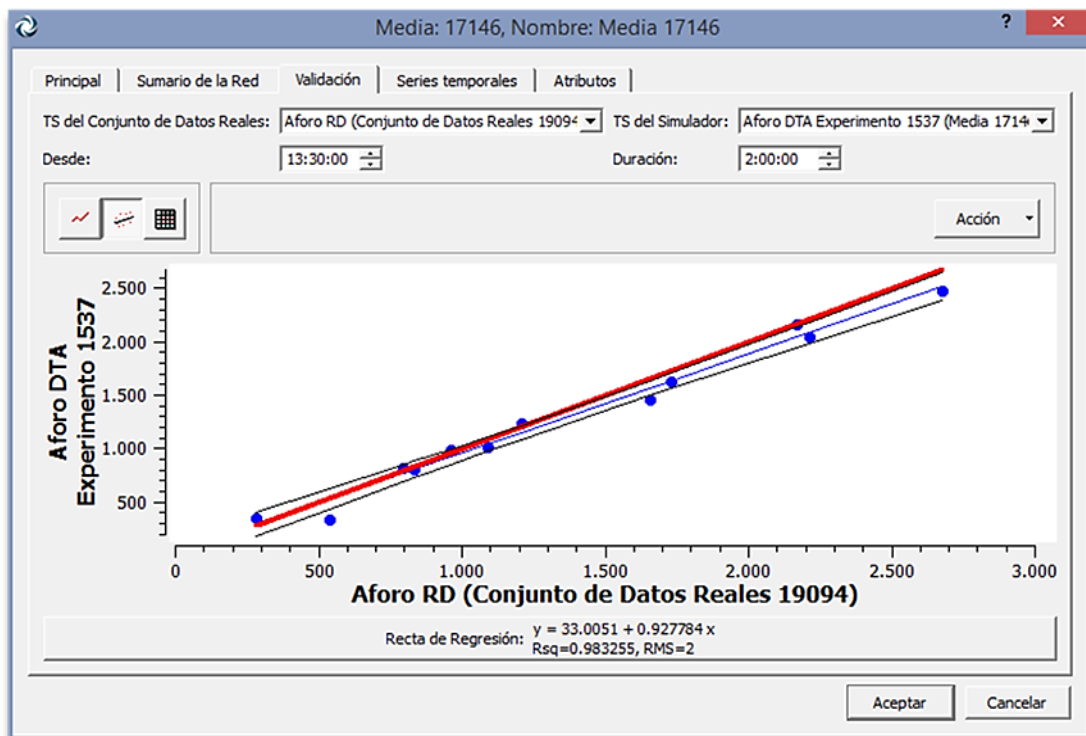


Ilustración 3.2-13: Validación de la simulación del modelo real. Fuente: Software AIMSUN.

El valor de R_{sq} es prácticamente 1, lo que quiere decir que los valores reales y los simulados no tienen grandes diferencias.

3.3. Análisis de la situación sin sendas ciclistas del barrio de La Rondilla

El análisis de los resultados que se muestran se refiere a la media de varias repeticiones para que los resultados obtenidos sean representativos.

Para evaluar nuestro modelo utilizaremos los siguientes tipos de resultados:

- Mapa de flujo de vehículos.
- Análisis de los parámetros globales a través de tablas y gráficas.
- Características de la red.

3.3.1. Mapas de flujo

- Flujo de vehículos (veh/h):

El programa nos muestra gráficamente el flujo medio de vehículos que hay en cada sección gracias a un código de colores verdes y rojos, donde los tramos de mayor flujo aparecen en una gama de rojos y los de menor flujo aparecen en verde. En la siguiente figura se muestra el mapa de flujo de vehículos de la Rondilla en hora punta:

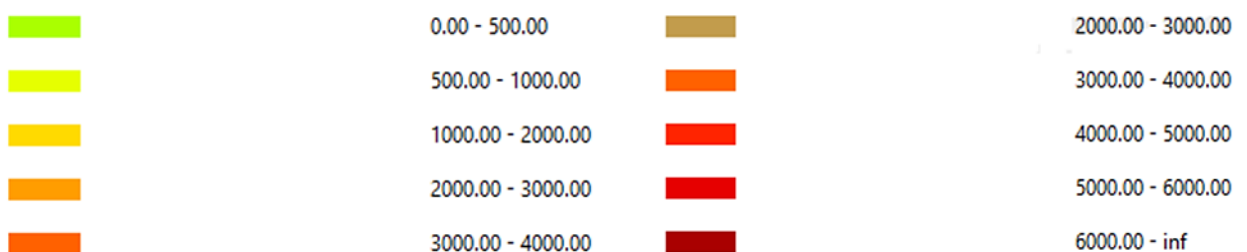


Ilustración 3.3-1: Leyenda mapa de flujo (veh/h). Fuente: Software AIMSUN.



Ilustración 3.3-2: Mapa de flujo de la simulación real (veh/h). Fuente: Software AIMSUN.

Como se observa en la figura 3.3-2 una de las calles con más flujo de vehículos es la Calle Rondilla de Santa Teresa ya que es una de las principales comunicaciones del barrio de la Rondilla con el centro de la ciudad, además también da acceso a la Avenida Salamanca que permite acceder a cualquier otro barrio y que se caracteriza por una gran afluencia. Además, en la Calle Rondilla de Santa Teresa se encuentra el Hospital Clínico Universitario por lo que suele haber vehículos en doble fila, dificultando el tráfico.

En el caso de la Avenida Palencia se observa que el carril en dirección al centro de la ciudad tendrá mayor flujo de vehículos que el carril en sentido contrario, pero no se superan los 3000 vehículos por hora.

3.3.2. Análisis de los parámetros globales

Los parámetros que se han analizado de manera global son los siguientes:

- Flujo de vehículos:

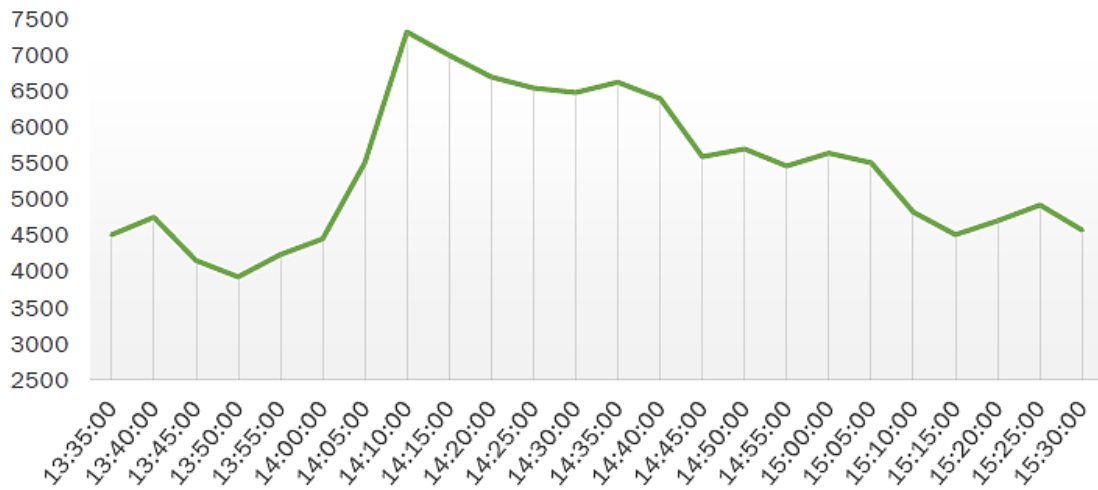


Ilustración 3.3-3: Flujo de vehículos (veh/h).

A partir de la gráfica que obtenemos de los datos proporcionados por la simulación del modelo se aprecia que se origina un pico de incremento de flujo que corresponde con la hora punta entre las 14:00 y las 14:30 aproximadamente y disminuyendo después de esta franja horaria.

En cuanto pasan las 14:00 el crecimiento es muy significativo, como era de esperar con los datos que se han obtenido.

- Densidad de tráfico:

La siguiente figura hace referencia a la densidad de vehículos en la zona de estudio, el número de vehículos en el espacio existente:

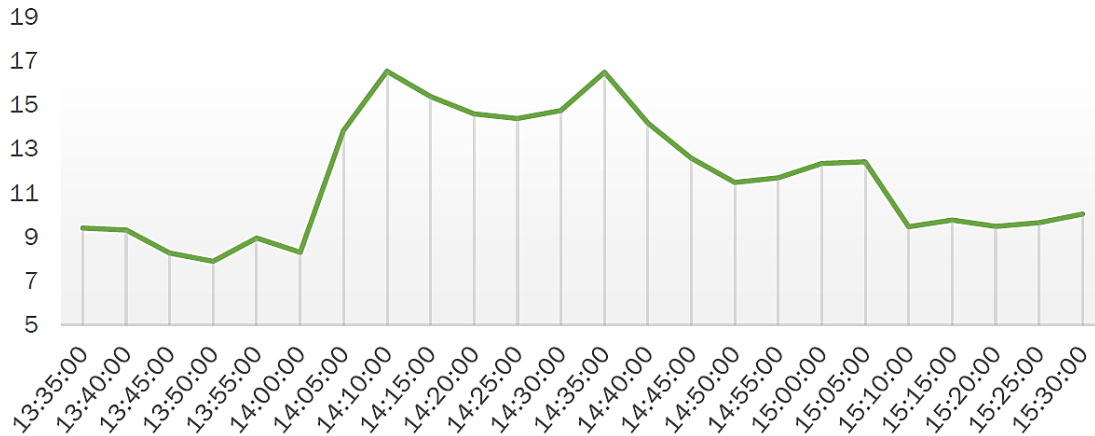


Ilustración 3.3-4: Densidad de tráfico (veh/km).

Si nos fijamos, vemos que es acorde a la anterior figura que hacía referencia al flujo: a mayor flujo de vehículos se aprecia una mayor densidad. Este aumento también tiene lugar en el tramo de hora punta.

- Longitud media de cola:

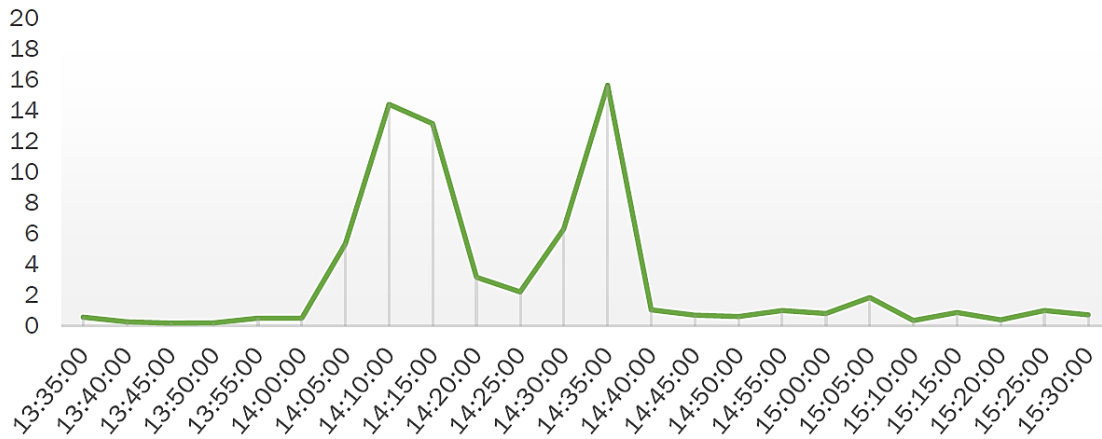


Ilustración 3.3-5: Longitud media de cola (veh).

A medida que va aumentando la densidad, el número de coches esperando también va incrementando. En el intervalo de hora punta, más coches quieren entrar en el barrio, por lo que la cola de entrada aumenta.

- Velocidad:

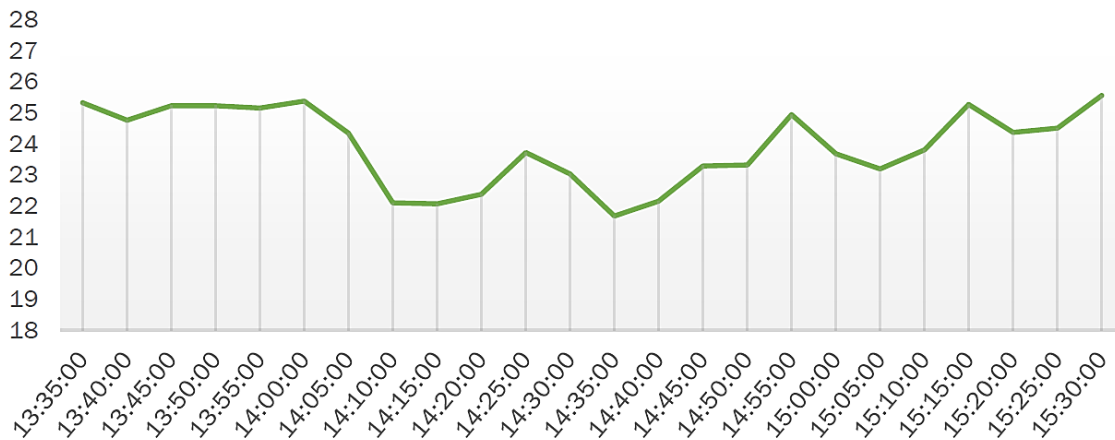


Ilustración 3.3-6: Velocidad (km/h).

Un mayor número de vehículos en la red hace que el movimiento que existe en su interior se vea ralentizado. En nuestro caso ese descenso se empieza a apreciar a partir de las 14:00 y llega a su valor mínimo a las 14:35. Se aprecia que en los momentos donde existe picos de flujo y densidad, la velocidad es menor.

- Tiempo de demora:

El tiempo de demora se define como el retraso de un vehículo determinado provocado por la capacidad de la vía, respecto a una situación ideal en la que la única restricción sería la velocidad de la vía.

La expresión que determina el tiempo de demora de un vehículo en realizar un trayecto se define como:

$$TD = TT - TFF$$

- TD = Tiempo de demora.
- TT (Travel Time) = Es el tiempo medio que tardan todos los vehículos en realizar el trayecto en condiciones normales.
- TFF (Free Flow Time) = Es el tiempo que tardaría el vehículo en realizar el trayecto teniendo como única restricción la velocidad de la vía.

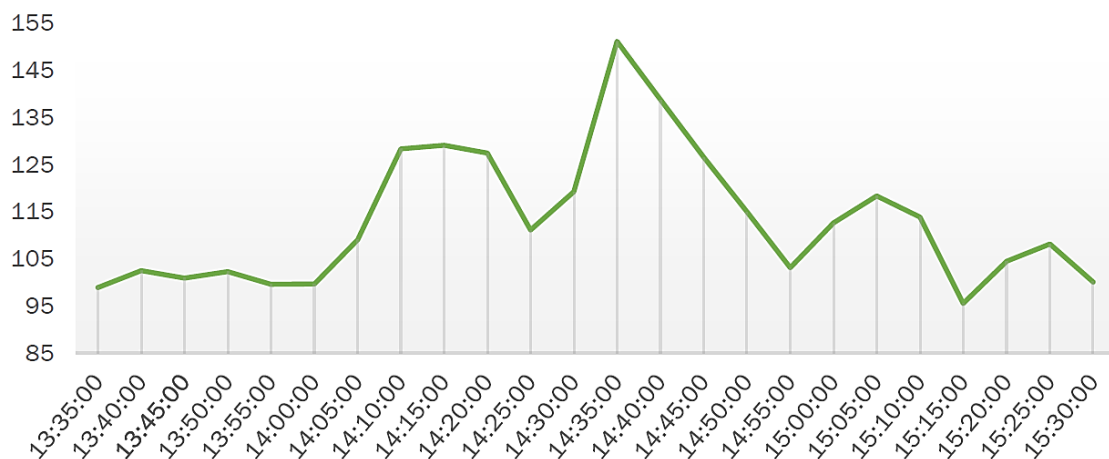


Ilustración 3.3-7: Tiempo de demora (s/km).

Los tiempos de demora comienzan a aumentar durante la hora punta ya que el tiempo que esperan los vehículos es mayor debido al exceso de capacidad en la sección y disminuyen una vez que esta ha pasado al mismo nivel aproximadamente que en el comienzo.

- Tiempo de viaje:

El tiempo de viaje define el tiempo medio que tarda un vehículo en realizar su recorrido.

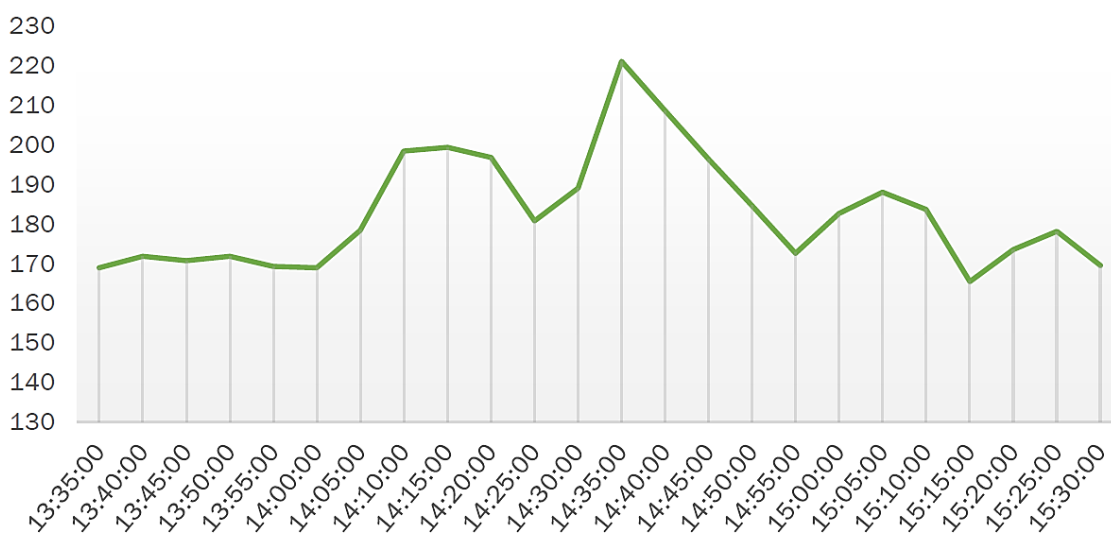


Ilustración 3.3-8: Tiempo de viaje (s/km).

Como ocurre con el tiempo de demora, al aumentar este, el tiempo de viaje comienza a aumentar también cuando llega la hora punta, los vehículos tardan más en llegar a su destino.

Los valores medios de estos parámetros son:

Flujo de vehículos	5418 veh/h
Densidad de tráfico	11,695 veh/km
Longitud máxima de cola	2,96 veh
Velocidad	23,732 km/h
Tiempo de demora	115,161 s/km
Tiempo de viaje	184,86 s/km

Tabla 3.3-1: Análisis de parámetros globales. Valores medios.

3.3.3. Otras características de la red

- Tiempo de parada y número de paradas:

Tiempo de parada: Es el valor medio, expresado en s/km, de los tiempos que cada vehículo de los que componen la demanda de tráfico se mantiene parado durante el recorrido de su camino.

Número de paradas: Es el valor medio de los números de paradas que cada vehículo de los que compone la demanda de tráfico para durante el recorrido de su trayecto.

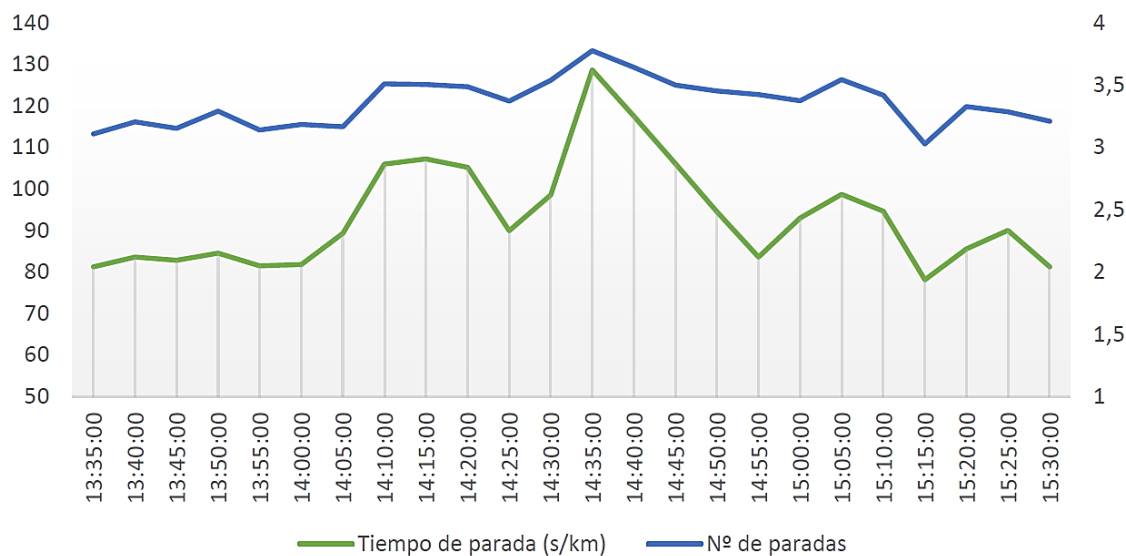


Ilustración 3.3-9: Tiempo de parada (s/km) y número de paradas.

A simple vista se observa como el mayor tiempo de parada coincide en con el mayor número de paradas de los vehículos durante el recorrido por el modelo.

- Distancia total viajada:

Distancia total viajada: Es la suma, expresada en km, de las distancias recorridas por cada vehículo de los que componen la demanda de tráfico desde su origen a su destino.

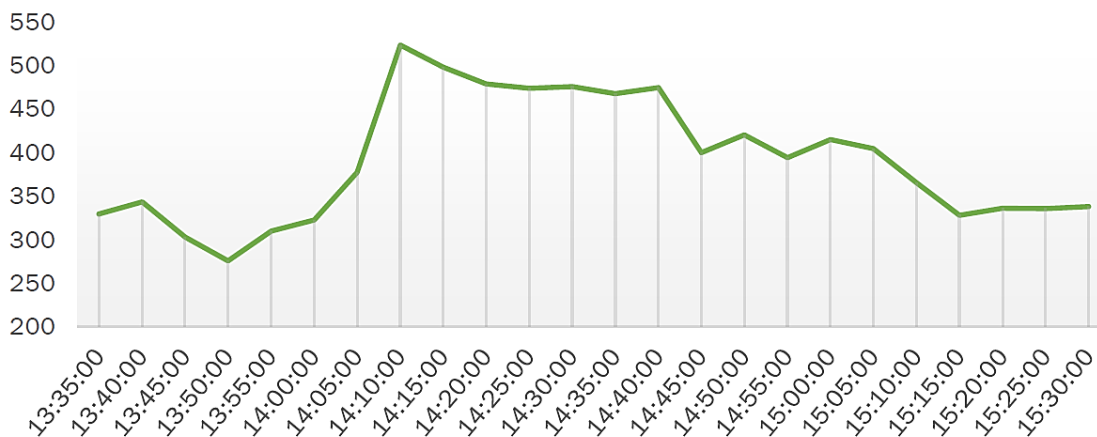


Ilustración 3.3-10: Distancia total viajada (km).

Esta figura muestra como se ha incrementado la distancia que recorren los vehículos que circulan por la red en el momento que circulan por ella el mayor número de ellos. A mayor cantidad de vehículos, la suma de distancia viajada será mayor.

- Tiempo total de viaje:

Es la suma, expresada en segundos, de los tiempos que tarda cada vehículo que compone la demanda de tráfico en recorrer su trayecto.

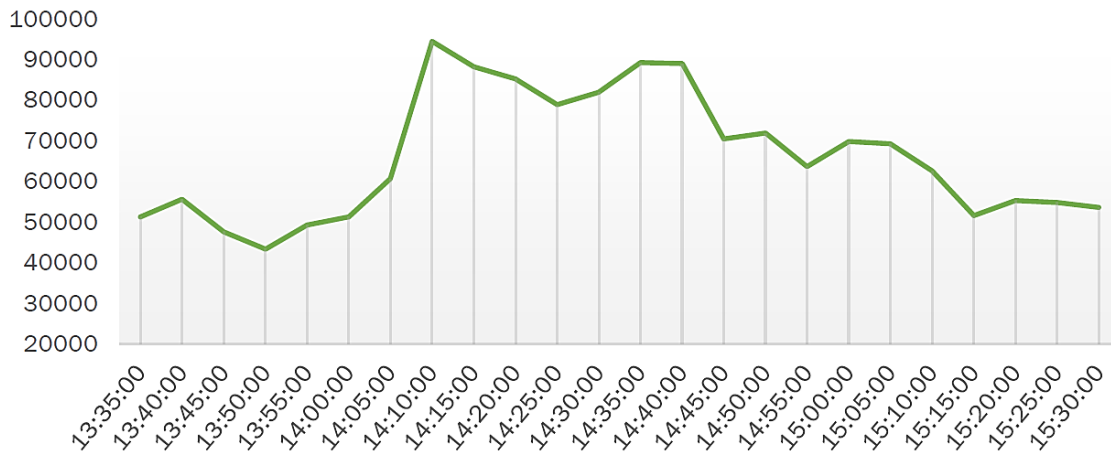


Ilustración 3.3-11: Tiempo total de viaje (s).

Cómo ocurre en todas las gráficas anteriores, el pico aparece en el periodo de hora punta, cuando el número de vehículos en la red es mayor.

Los valores medios de los parámetros anteriores son:

Tiempo de parada	95,249 s/km
Número de paradas	3,39
Distancia total viajada	9383,34 km
Tiempo total de viaje	441,06 h

Tabla 3.3-2: Análisis de otras características. Valores.

3.4. Propuestas de nuevos modelos de tráfico

Las nuevas propuestas de tráfico se han centrado en el estudio de la interacción de las bicicletas con los vehículos a motor en el área urbana de la Rondilla. Mediante el software AIMSUM hemos simulado diferentes prototipos para su posterior análisis y comparación entre ellos.

3.4.1. Análisis geométrico

Se va a estudiar la configuración de los siguientes tres modelos:

- Modelo 1: Situación actual de la Rondilla.
- Modelo 2: Situación propuesta por el Ayuntamiento de Valladolid para la primavera de 2020.
- Modelo 3: Situación complementaria al Modelo 2.

3.4.1.1. Modelo 1

Esta representación estudia el comportamiento del tráfico actual en el barrio de la Rondilla de Valladolid.

Hoy en día existen dos zonas bien diferenciadas de carriles bici en este área, para ubicarnos mejor podemos fijarnos en el mapa que aparece a continuación.

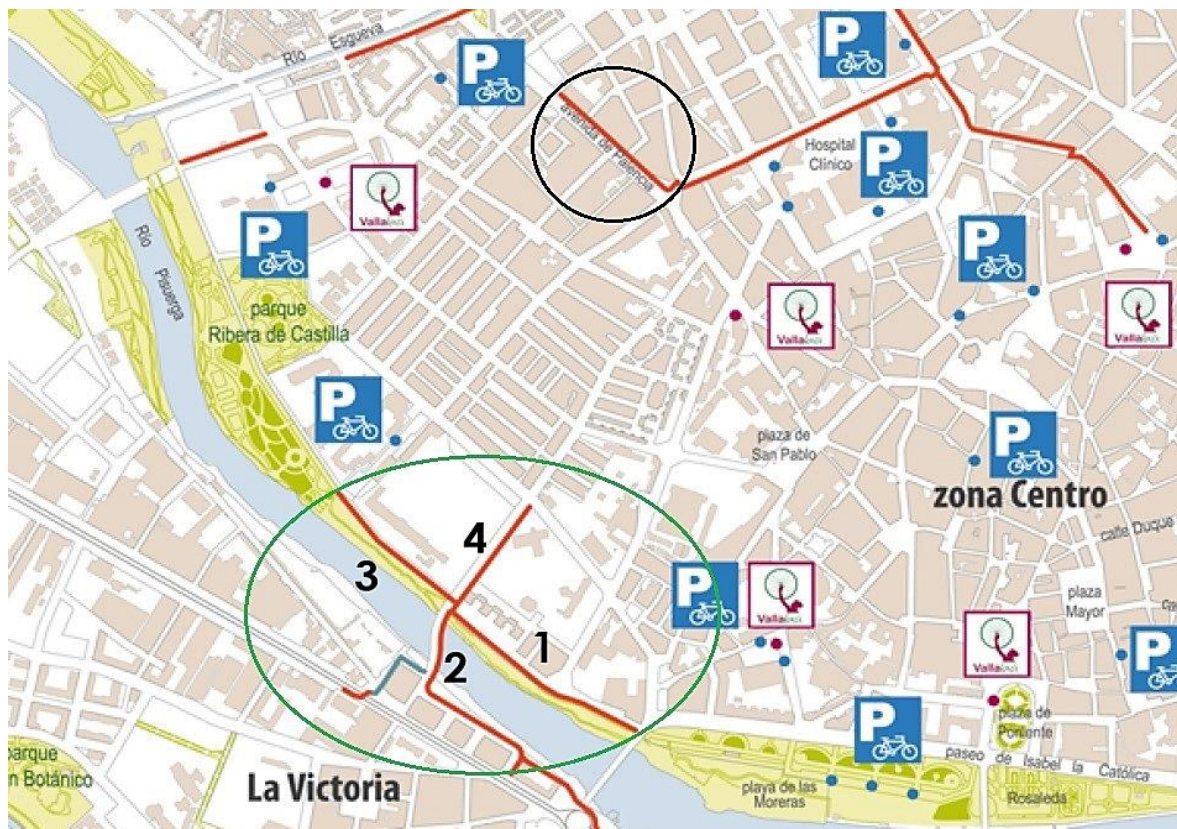


Ilustración 3.4-1: Mapa de Carriles Bici de Valladolid. Fuente: Ayuntamiento de Valladolid.

La primera zona (círculo verde), se extiende por (1) el tramo del Paseo de Renacimiento que va desde el Puente Mayor hasta el Puente de la Condesa Eylo. Dicho puente también contiene (2) carril bici, el cual continúa (4) por la Calle Tirso de Molina hasta que cruza con la Calle Mirabel. Por último, (3) otro trozo habilitado para bicicletas lo encontramos seguido del Paseo de Renacimiento, por el Paseo Ribera de Castilla hasta la altura del Centro Cívico de la Rondilla.

La segunda (círculo negro), sólo se despliega por la Avenida de Palencia, desde Calle Cerrada hasta Calle Soto.

Para asemejar a la realidad lo máximo posible la disposición actual de La Rondilla mediante el Software AIMSUN, ha sido necesario crear carriles adicionales en las zonas de interés, limitando su velocidad a 30 km/h y teniendo en cuenta los pasos de peatones y los grupos semafóricos de las carreteras e intersecciones con las que lindan. A continuación, podemos ver ilustrados los

carriles creados con el Software, señalizados en rojo.



Ilustración 3.4-2: Intersección de los Carriles Bici del círculo verde. Fuente: AIMSUN.

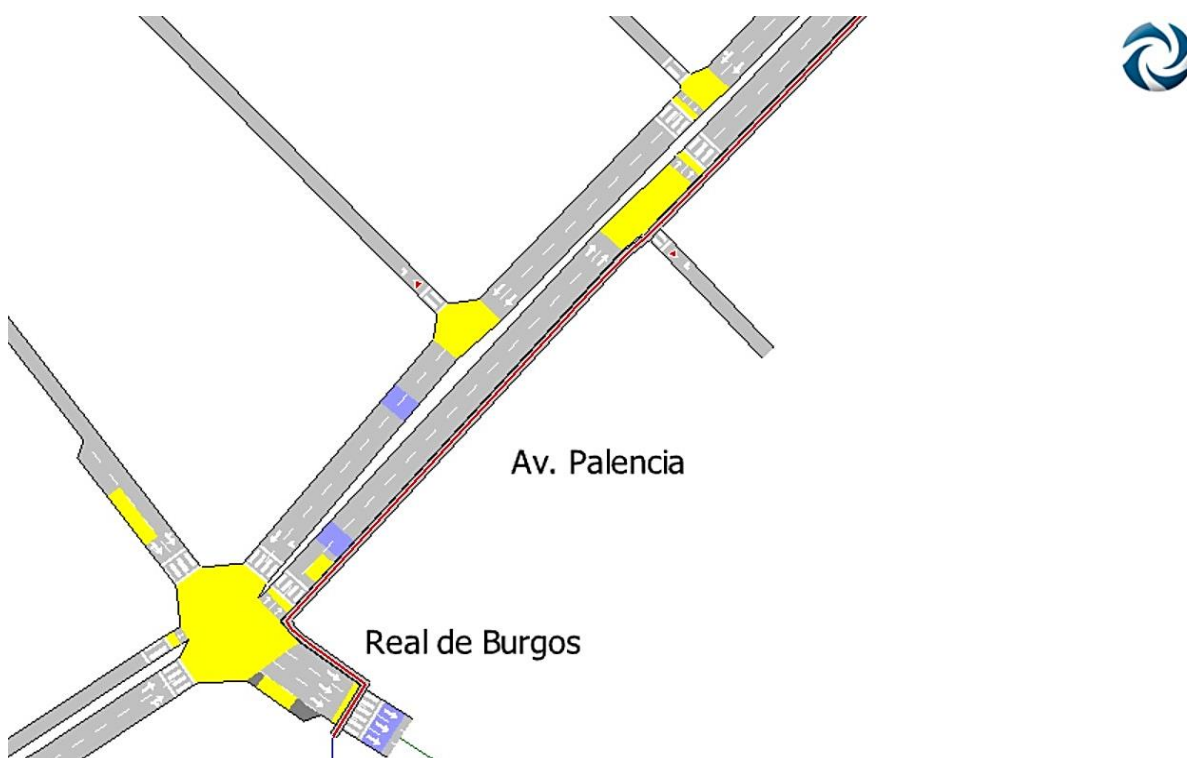


Ilustración 3.4-3: Inicio del Carril Bici de la Avenida de Palencia. Fuente: AIMSUN.

3.4.1.2. Modelo 2

Para reproducir este segundo modelo se ha tomado como referencia la propuesta que el Ayuntamiento de Valladolid publicó el pasado 2 de abril de 2019, en la que exponía que la ciudad contaría con 10 nuevos kilómetros de ciclocarriles a 30 km/h en los próximos meses.

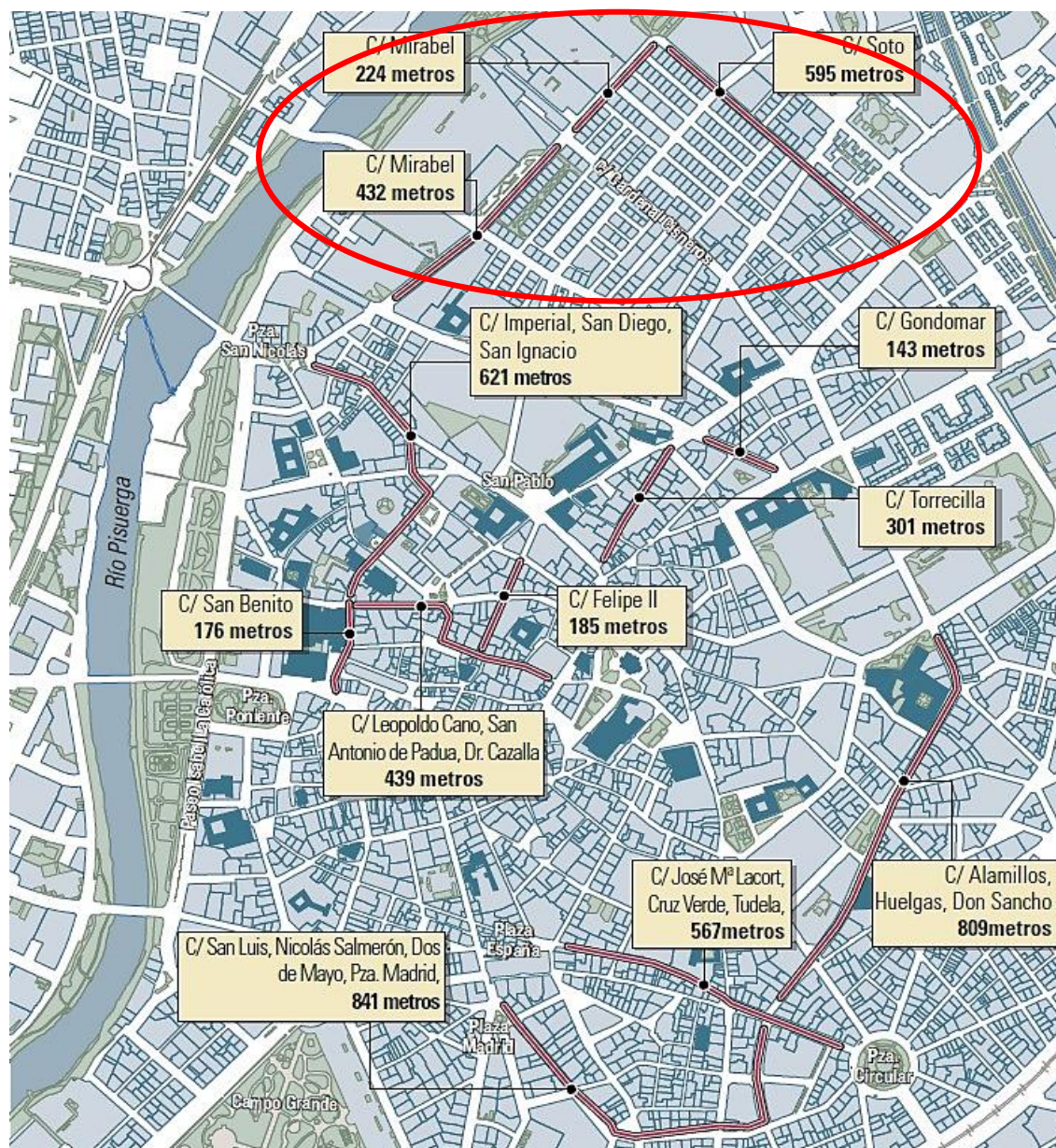


Ilustración 3.4-4: Ciclocarriles proyectados. Fuente: Periódico El Mundo.

Las dos calles que nos interesan para nuestro proyecto y las que van a dar continuidad a las rutas ciclistas ya existentes son: Soto y Mirabel.

Con la incorporación de ciclocarriles en ambas calles damos una prolongación al carril bici situado en la Avenida de Palencia.

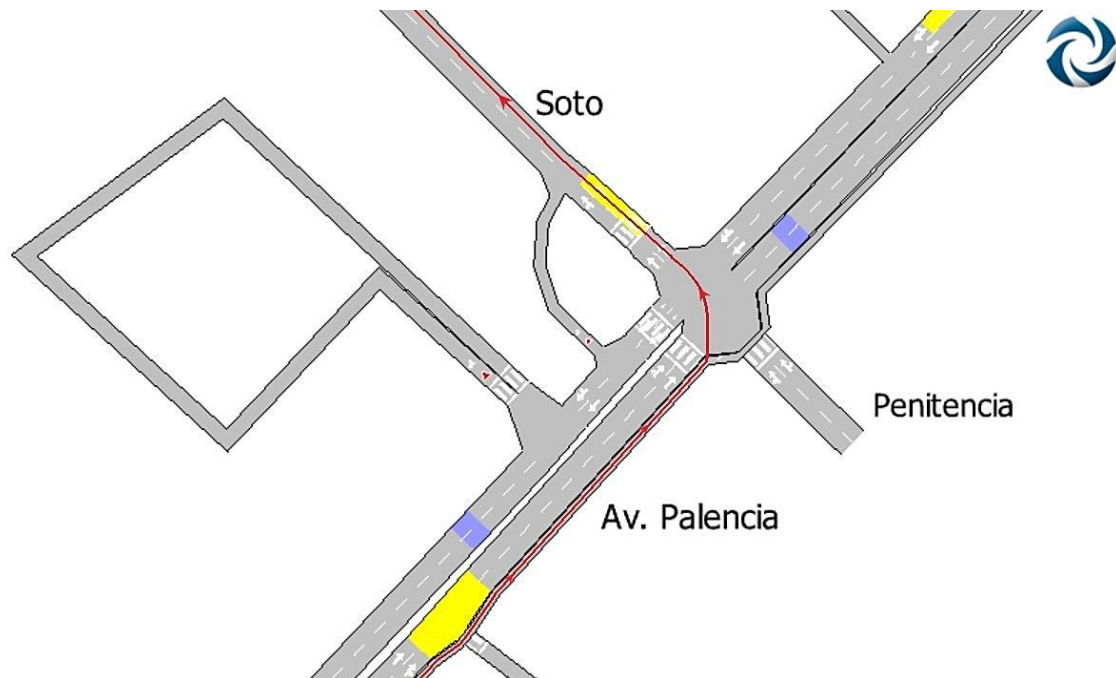


Ilustración 3.4-5: Continuidad del Carril Bici de la Avenida de Palencia. Fuente: AIMSUN.

La creación de ciclocarriles con AIMSUN ha conllevado la modificación del fichero AIMSUN original de la Rondilla, ya que el programa no permite variar la velocidad de sólo un carril siendo una calzada de dos carriles. Por ello, ha sido necesario eliminar las calzadas existentes que iban a contener ciclocarriles y sustituirlas por dos calzadas juntas de un carril cada una, trabajando con los parámetros de cada calzada por separado. Así, se ha conseguido asemejar lo más fielmente posible a la realidad cómo sería el nuevo comportamiento del tráfico con los nuevos carriles de coexistencia.

Al seleccionar como parámetros a mostrar la velocidad por secciones, podemos comprobar, por el cambio de color, que el carril derecho de la Calle Soto tiene limitación a 30 km/h mientras que el izquierdo se mantiene a 50 km/h. Al igual que ocurre con la Calle Mirabel, limitada entera a 30 km/h por contener

sólo un carril en su calzada.

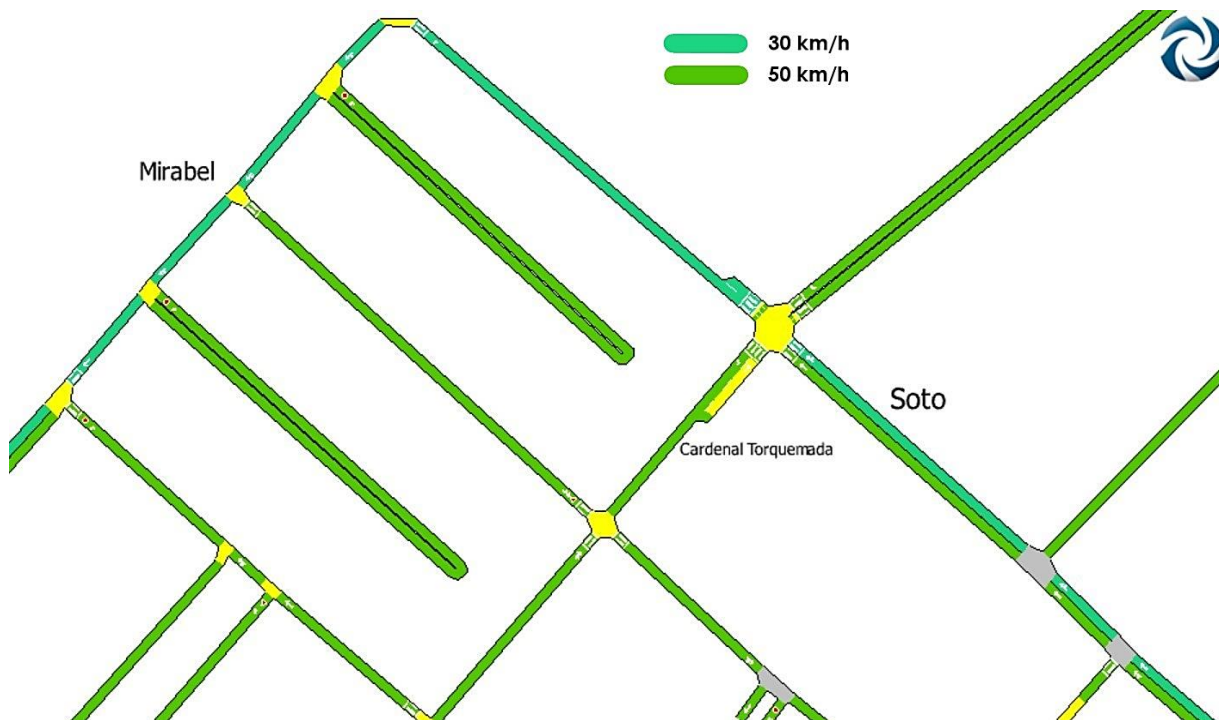


Ilustración 3.4-6: Velocidad por secciones en las calles Soto y Mirabel. Fuente: AIMSUN.

3.4.1.3. Modelo 3

En esta tercera muestra se ha intentado dar mejoría a la geometría de carriles de coexistencia planteados por el Ayuntamiento. Una vez más se busca dar continuidad a los carriles bici y a mayores buscar un itinerario en sentido contrario al creado con los modelos 1 y 2. En esta ocasión se han aprovechado los carriles bici del Paseo de Renacimiento, Puente de la Condesa Eylo y Calle Tirso de Molina como inicio del recorrido para con seguir unirlos de alguna forma con la Avenida de Palencia mediante ciclocarriles.

Aprovechando el tramo de carril bici presente en la Calle Tirso de Molina se ha decidido ubicar un ciclocarril en el siguiente tramo a éste último, en la misma calle, que se extiende desde Calle Mirabel hasta Calle Cardenal Torquemada. Dicho ciclocarril va a continuar por Calle Cardenal Torquemada hasta la Calle Cardenal Cisneros prolongándose por ésta hasta conectar con Calle Cerrada para posteriormente desembocar en la Avenida de Palencia, a la altura de la

Calle Real de Burgos. El nuevo itinerario se puede observar en la siguiente ilustración, donde se señala en verde los carriles bici y en rojo los ciclocarriles.

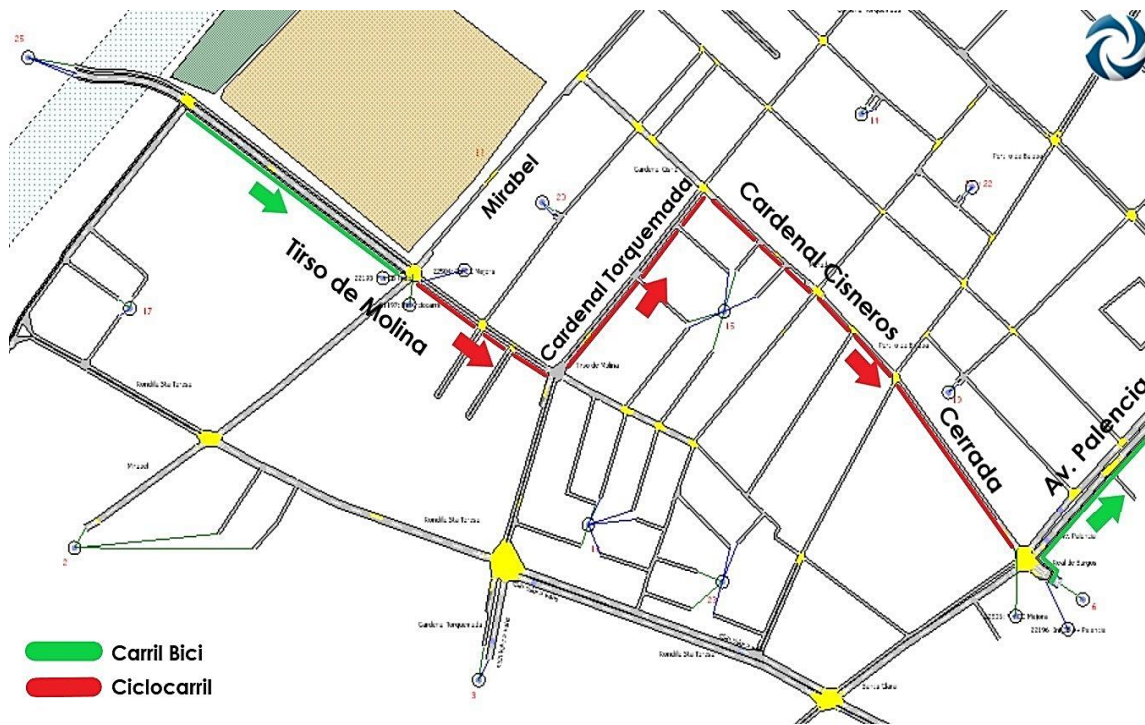


Ilustración 3.4-7: Geometría del Modelo 3. Fuente: AIMSUN.

Para la creación de los ciclocarriles mediante AIMSUN se ha seguido el mismo procedimiento que con el Modelo 2.

3.4.1.4. Conclusión

Con la simulación final del Modelo 3 se ha conseguido tener al área urbana de La Rondilla conectada de Este a Oeste mediante itinerarios completamente adaptados a la movilidad en bicicleta.

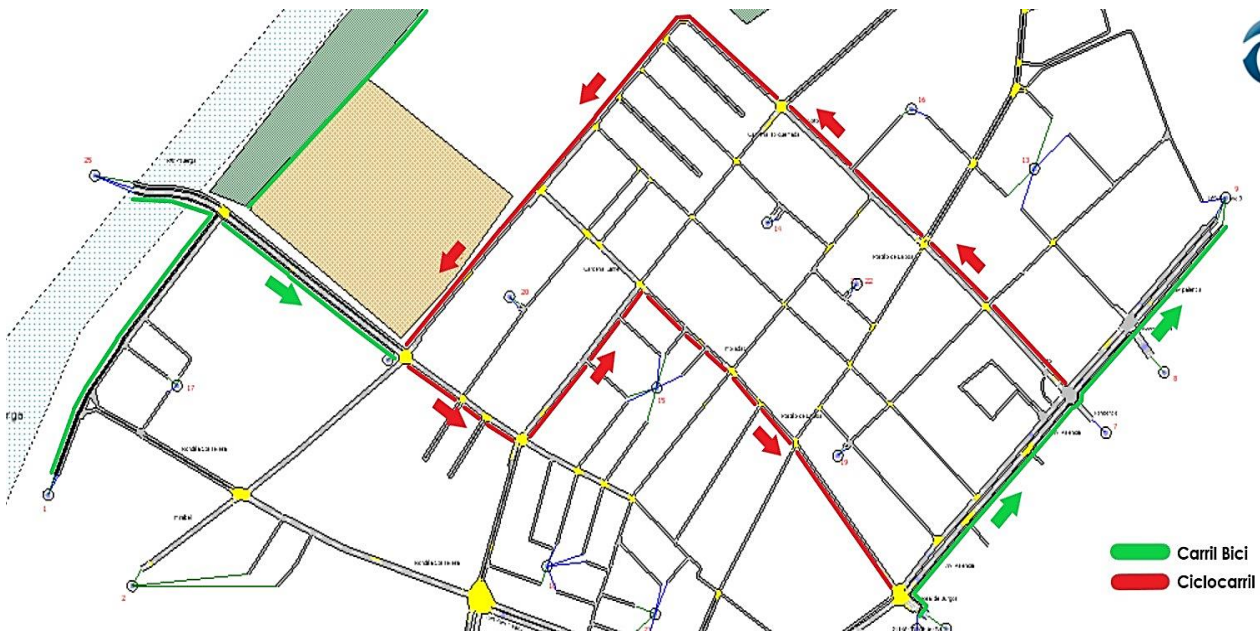


Ilustración 3.4-8: Barrio de la Rondilla conectado por vías aptas para el uso de bicicleta. Fuente: AIMSUN.

3.4.2. Análisis de demanda

A continuación, se va a realizar un estudio de las previsiones de demanda de tráfico en el barrio de La Rondilla en el año 2022 después de la apertura de los nuevos ciclocarriles destinados al tráfico coexistente de coches y bicicletas. Como se verá la apertura inicial de estos ciclocarriles tendrá una influencia prácticamente nula en el tráfico, pero en el último modelo considerando una estabilización de la situación provocará un cambio más significativo en el tráfico.

Se han realizado cuatro escenarios de demanda, que se compararán entre ellos. Los escenarios propuestos son los siguientes:

- Escenario 1: Demanda actual utilizando el Modelo 1.
- Escenario 2: Demanda actual utilizando el Modelo 2.
- Escenario 3: Demanda actual utilizando el Modelo 3.
- Escenario 4: Decremento del 5% anual en la demanda de coches y un aumento del 20% anual en la de bicicletas utilizando el Modelo 3 para 2022.

3.4.2.1. Comparación del Escenario 1 con el Escenario 2

El Modelo 1 de esta simulación está caracterizado por mantener la velocidad de todas las vías a 50 km/h. y por incluir los dos tramos de carriles bici existentes actualmente en el barrio.

El Modelo 2 se basa en la propuesta del Ayuntamiento de Valladolid, en el cual se encuentran, aparte de vías a 50 km/h, tramos de coexistencia delimitados a 30 km/h.

Ahora se van a analizar los parámetros globales mediante la comparación de ambos modelos, diferenciando los valores de coches y bicicletas:

- Flujo

Se puede observar en la gráfica que ambos flujos, tanto coches como bicicletas, se mantienen bastante constantes, aunque con ligeras variaciones. Siempre tendiendo a disminuir en el caso de los coches y a aumentar en el caso de las bicicletas, como muestran los valores medios, ya que al existir dos calles con ciclocarriles, y por lo tanto con reducción de velocidad a 30 km/h, el flujo de coches va a ser más lento y por lo tanto menor.

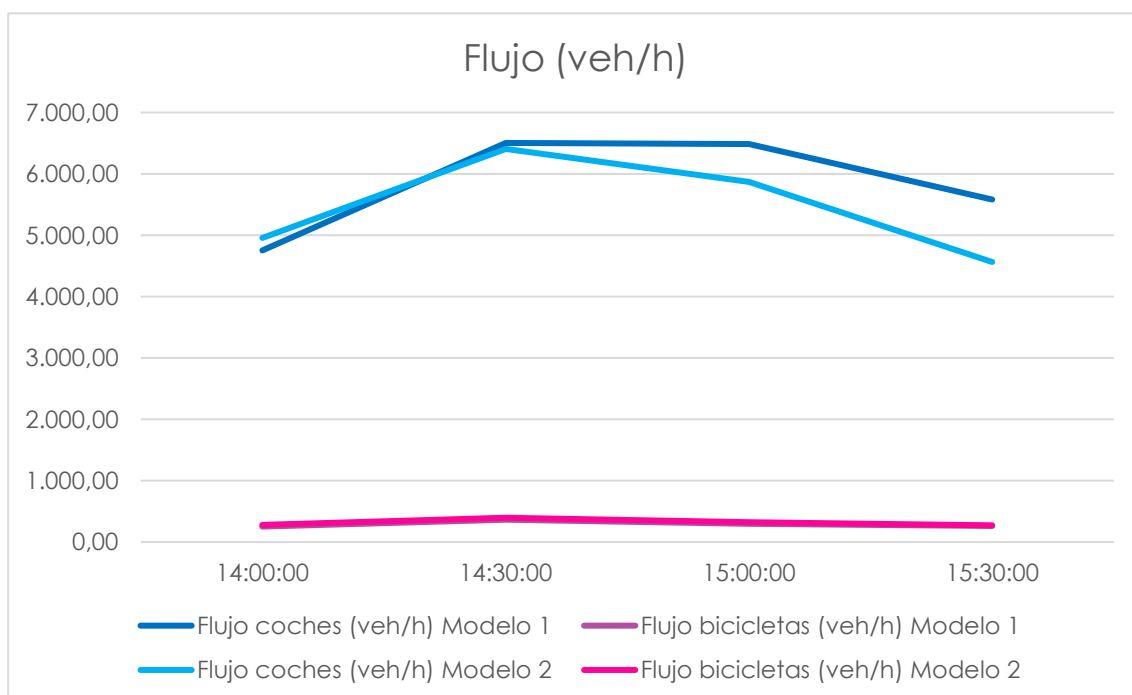


Ilustración 3.4-9: Comparación de flujos entre los Modelos 1 y 2.

Flujo medio de vehículos	Veh/h
Modelo 1 coches	5831
Modelo 1 bicicletas	293
Modelo 2 coches	5449
Modelo 2 bicicletas	317'5

Tabla 3.4-1: Valores medios de flujo de los Modelo 1 y 2.

- Tiempo de viaje

Los resultados obtenidos del tiempo de viaje son muy parecidos para los coches, pero cambiantes para las bicicletas. Ésto se debe a que ahora las bicicletas tienen la opción de prolongar su trayecto por los ciclocarriles mientras que en el Modelo 1 se tenían que limitar al carril bici por lo que su recorrido quedaba bastante limitado. Al tener más camino que recorrer el tiempo de viaje aumenta.

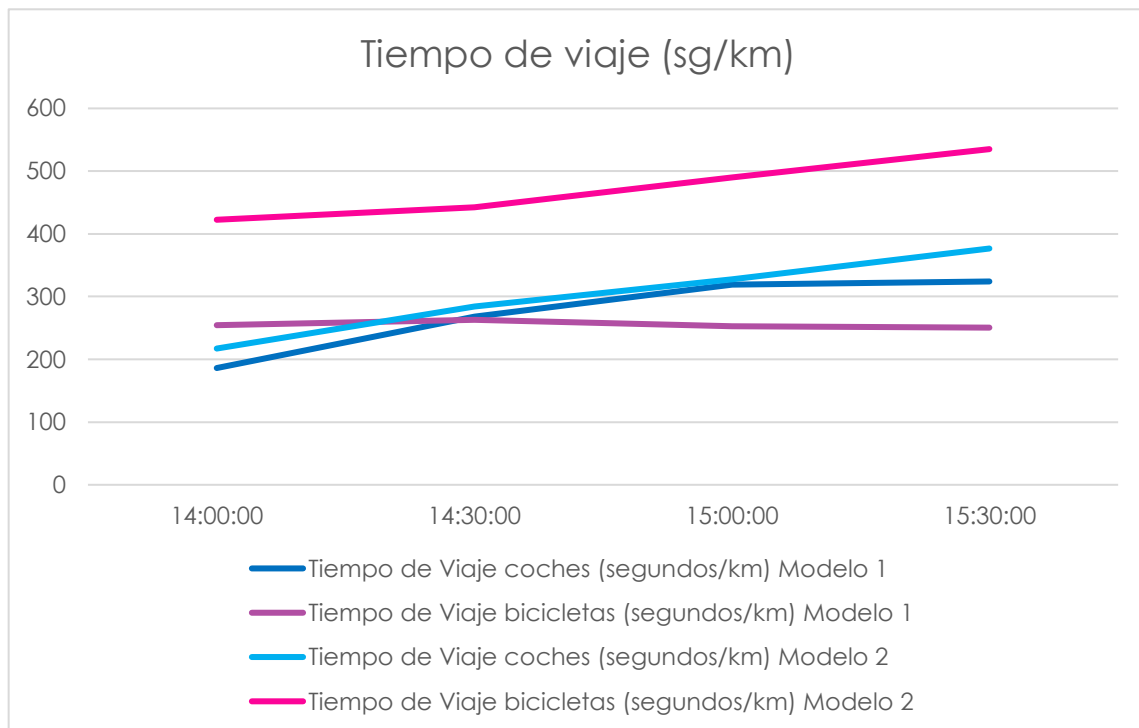


Ilustración 3.4-10: Comparación del tiempo de viaje entre Modelos 1 y 2.

Tiempo de viaje medio	Sg/km
Modelo 1 coches	274'19
Modelo 1 bicicletas	255'07
Modelo 2 coches	301'51
Modelo 2 bicicletas	472'47

Tabla 3.4-2: Valores medios del tiempo de viaje de los Modelos 1 y 2.

- Tiempo de demora

Cómo se ha explicado anteriormente, el tiempo de demora se define como el tiempo de viaje menos el tiempo que tardaría un vehículo en realizar su trayecto, teniendo en cuenta, como única restricción, la velocidad de la vía. De nuevo, los cambios más significativos se aprecian en las simulaciones de bicicletas, la explicación es que, al aumentar el tiempo de viaje, como se ha demostrado en el apartado anterior, y tener la misma restricción de velocidad tanto en carriles bici como en ciclocarriles, el tiempo de demora también se verá aumentado en el Modelo 2. Sin embargo, podemos también objetar que, saliéndonos de nuestra simulación en el Modelo 1, una vez que el carril bici acaba las bicicletas tendrían que continuar su trayecto de alguna manera ya sea por aceras, calzada o una alternativa fuera de un entramado ciclista, y teniendo en cuenta esa situación podemos intuir que el tiempo de demora si sería menor en el Modelo 2 que en el 1.

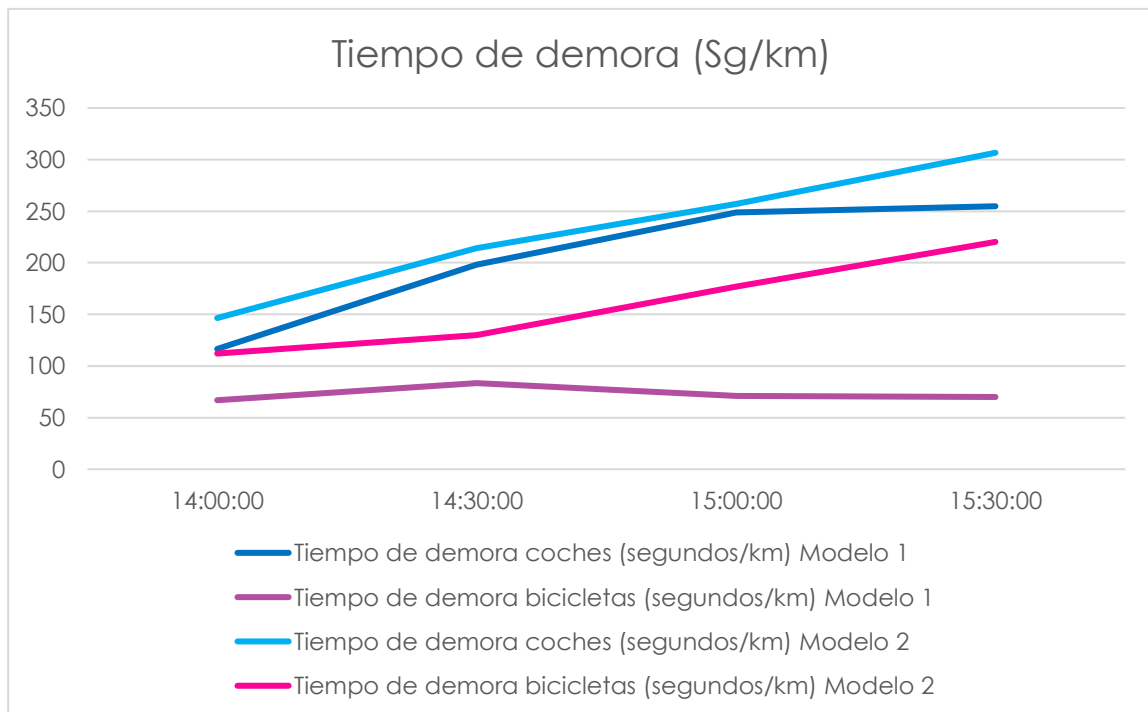


Ilustración 3.4-11: Comparación del tiempo de demora entre los Modelos 1 y 2.

Tiempo de demora medio	Sg/km
Modelo 1 coches	204'56
Modelo 1 bicicletas	72'74
Modelo 2 coches	231'03
Modelo 2 bicicletas	159'83

Tabla 3.4-3: Valores medios del tiempo de demora de los Modelos 1 y 2.

- Velocidad

Se observa una ligera variación entre las velocidades medias de las bicicletas, siendo mayor ésta en el Modelo 2 y una variación casi nula para los coches.

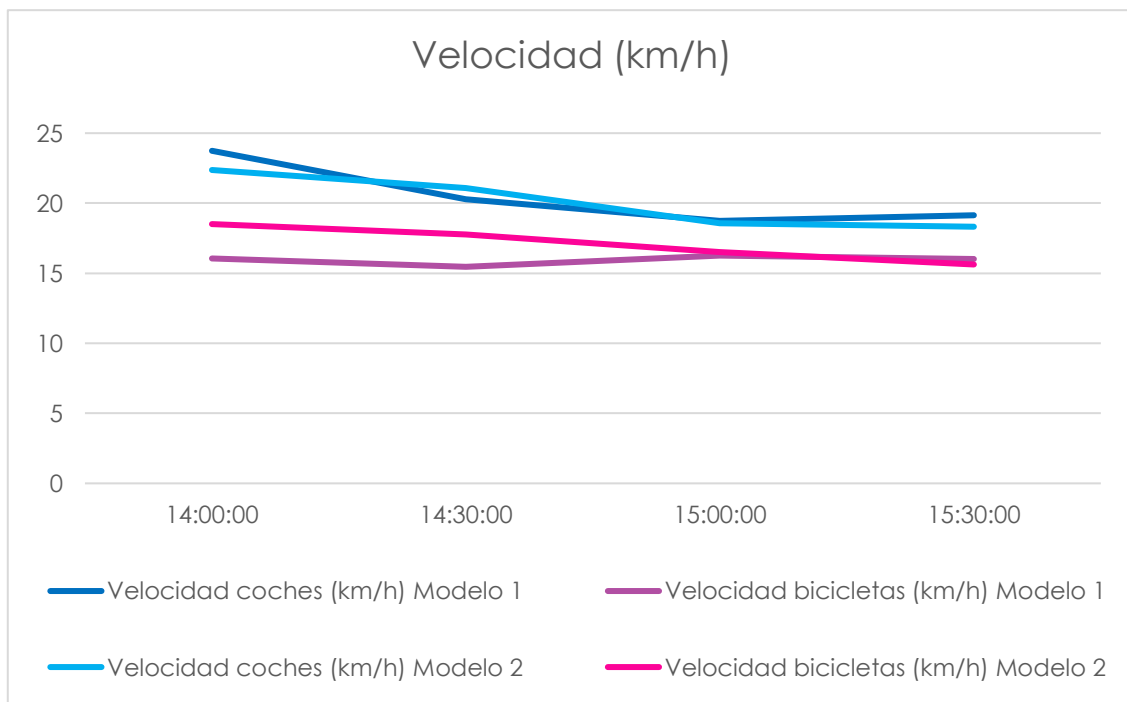


Ilustración 3.4-12: Comparación de la velocidad entre los Modelos 1 y 2.

Velocidad media	Km/h
Modelo 1 coches	20'48
Modelo 1 bicicletas	15'95
Modelo 2 coches	20'09
Modelo 2 bicicletas	17'11

Tabla 3.4-4: Valores medios de la velocidad de los Modelo 1 y 2.

3.4.2.2. Comparación del Escenario 2 con el Escenario 3

El Modelo 3 se fundamenta en la creación y adición de un nuevo recorrido en sentido opuesto al ideado por el Ayuntamiento.

- Flujo

Si se observa la tabla de valores medios vemos que el flujo de coches disminuye de un modelo a otro, mientras que el de bicicletas aumenta ligeramente del modelo 2 al 3. Podemos entender que esto se debe a que al añadir más calles en las que están presentes los ciclocarriles, se observará que pasan menos coches por hora que antes al tener que reducir su velocidad y en cambio se fomenta que pasen más bicicletas al tener más alternativas de itinerarios ciclistas.

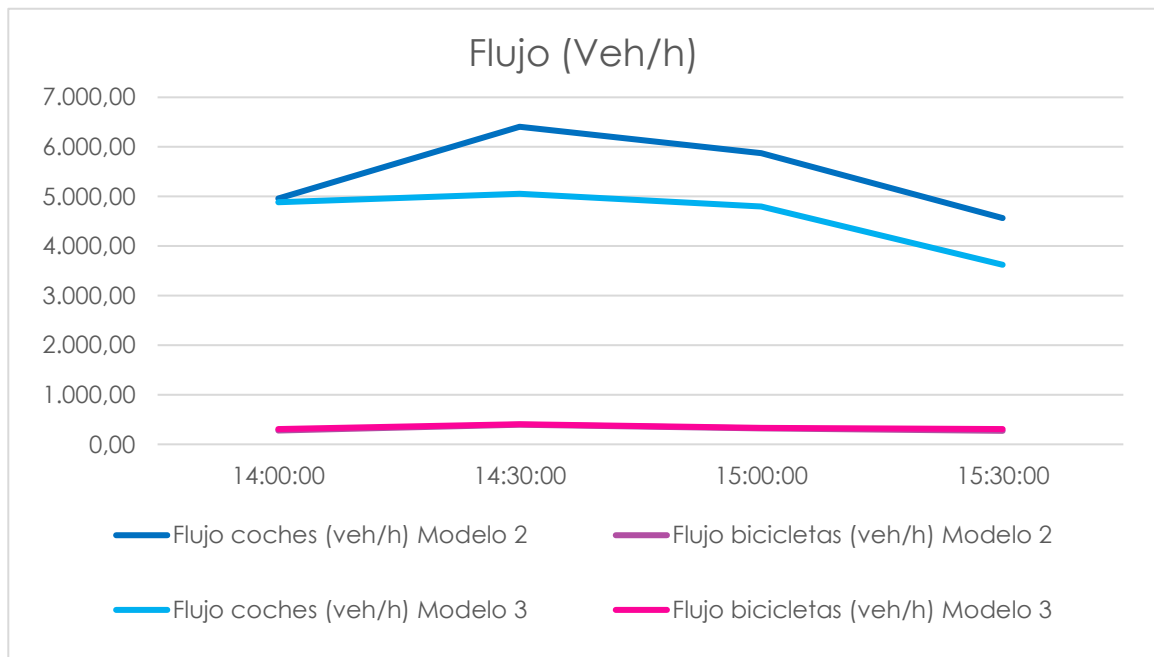


Ilustración 3.4-13: Comparación de flujos entre los Modelos 1 y 2.

Flujo medio de vehículos	Veh/h
Modelo 2 coches	5449
Modelo 2 bicicletas	317'5
Modelo 3 coches	4590'5
Modelo 3 bicicletas	338'5

Tabla 3.4-5: Valores medios del flujo de los Modelos 1 y 2.

- Tiempo de viaje

Volvemos al estudio del tiempo de viaje, ahora con los Modelos 2 y 3. Por lógica, en el Modelo 3, el tiempo de viaje para los coches se va a ver aumentado por tener que convivir con bicicletas en las calzadas de coexistencia y por la

reducción de su velocidad máxima en dichas vías. Por otra parte, con las bicicletas va a suceder lo mismo al tener más vías aptas para el tránsito ciclista. Aunque, en ambos casos, la diferencia es muy pequeña.

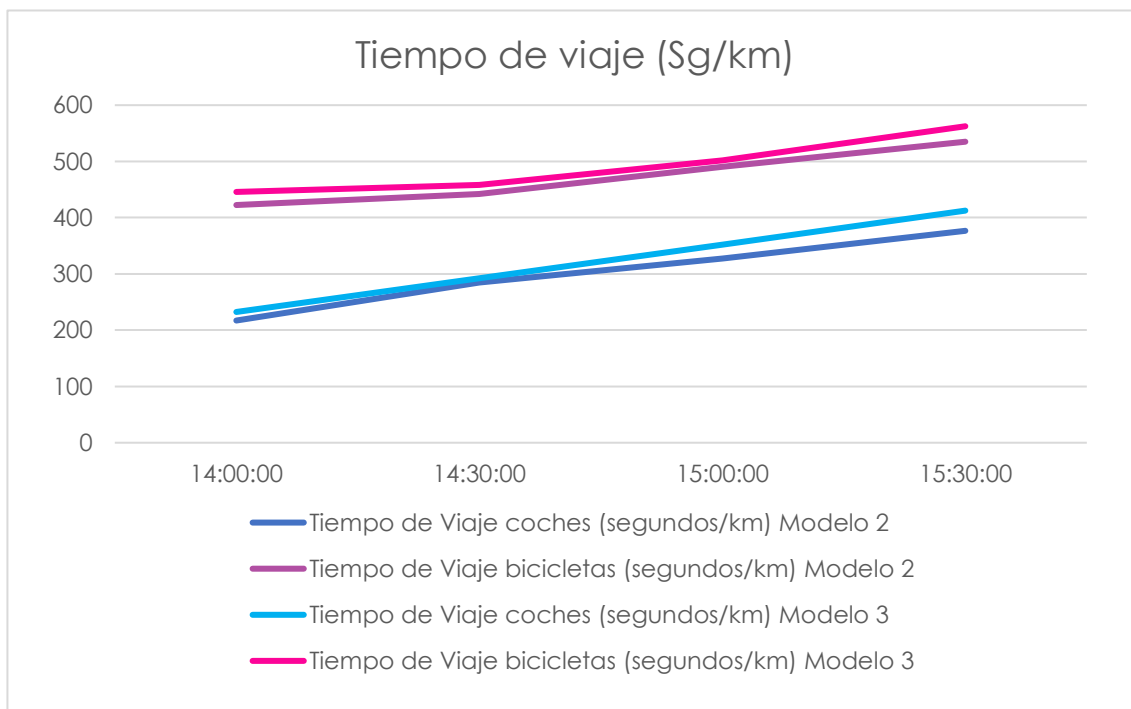


Ilustración 3.4-14: Comparación del tiempo de viaje entre los Modelos 2 y 3.

Tiempo de viaje medio	Sg/km
Modelo 2 coches	301'51
Modelo 2 bicicletas	472'47
Modelo 3 coches	322'26
Modelo 3 bicicletas	492'17

Tabla 3.4-6: Valores medios del tiempo de viaje de los Modelos 2 y 3.

- Tiempo de demora

El tiempo de demora va a estar, la mayoritaria parte de las veces, directamente relacionado al tiempo de viaje, como también se verá en el apartado 3.4.2.3.

Por consecuencia, el tiempo de demora del Modelo 2 será menor para coches y bicicletas que en el Modelo 3.

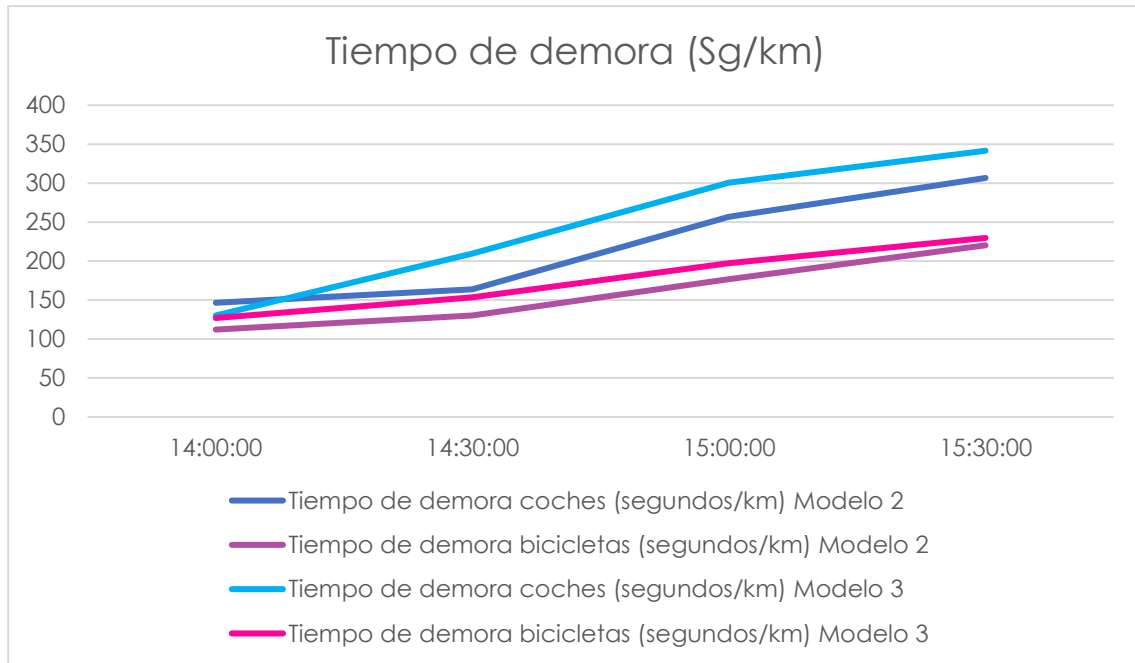


Ilustración 3.4-15: Comparación del tiempo de demora entre los Modelos 2 y 3.

Tiempo de demora medio	Sg/km
Modelo 2 coches	231'03
Modelo 2 bicicletas	159'83
Modelo 3 coches	245'35
Modelo 3 bicicletas	176'81

Tabla 3.4-7: Valores medios del tiempo de demora de los Modelos 2 y 3.

- Velocidad

No se aprecian cambios significativos entre las velocidades medias de las bicicletas. Sí se puede apreciar una pequeña variación en el caso de los coches, ya que disminuye en el modelo 3 por la existencia de más calles con ciclocarril.

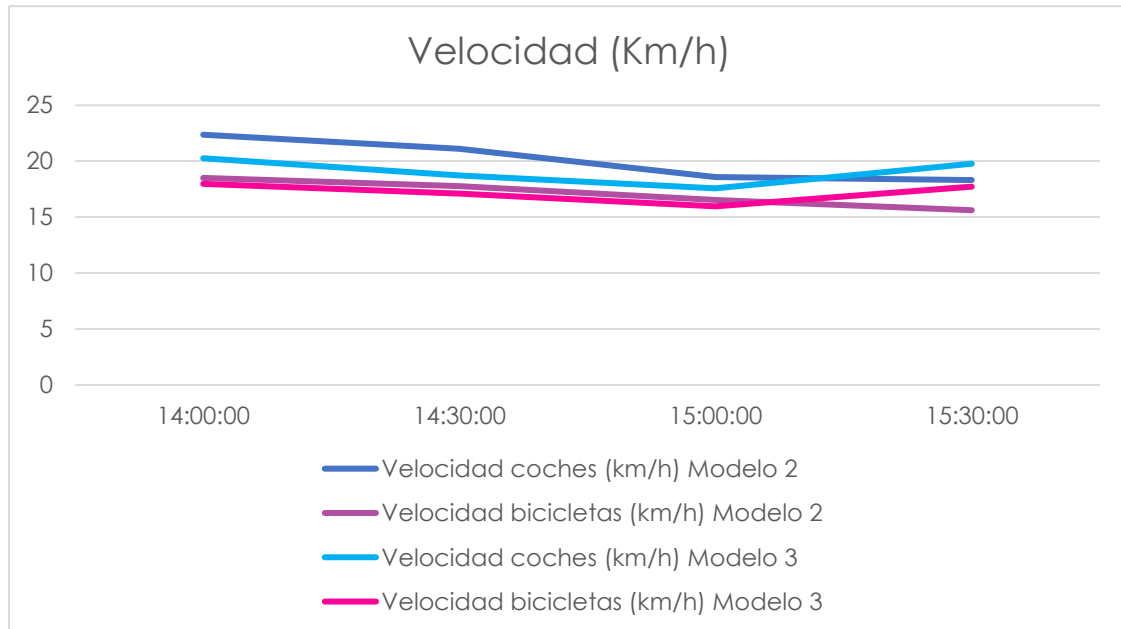


Ilustración 3.4-16: Comparación de la velocidad entre los Modelos 2 y 3.

Velocidad media	Km/h
Modelo 2 coches	20'09
Modelo 2 bicicletas	17'11
Modelo 3 coches	19'1
Modelo 3 bicicletas	17'2

Tabla 3.4-8: Valores medios de la velocidad de los Modelos 2 y 3.

3.4.2.3. Comparación del Escenario 3 con el Escenario 4

En el escenario 4 se estudia la estabilización del tráfico en 2022, ya que será el año objetivo de nuestro estudio.

Para realizar este modelo se ha utilizado un método no analítico, en concreto el método uniforme de los factores de crecimiento y decrecimiento que se ha explicado anteriormente, el factor utilizado para el cálculo de la nueva matriz O/D para el decrecimiento del número de coches ha sido de 0'95 y el factor de crecimiento de las bicicletas ha sido de 1'73.

Aplicando la fórmula gracias a la facilidad que permite AIMSUN de realizar operaciones se calculan automáticamente las nuevas matrices.

- Flujo

Ahora tenemos la misma geometría en la simulación de ambos escenarios, lo único que cambian son las matrices O/D. Como podemos observar en la gráfica, ambos flujos siguen una línea de tendencia bastante parecida, pero con modificaciones visibles en los valores numéricos. Siendo mayor el flujo en coches en el año actual y mayor el flujo de bicicletas en el año objetivo.

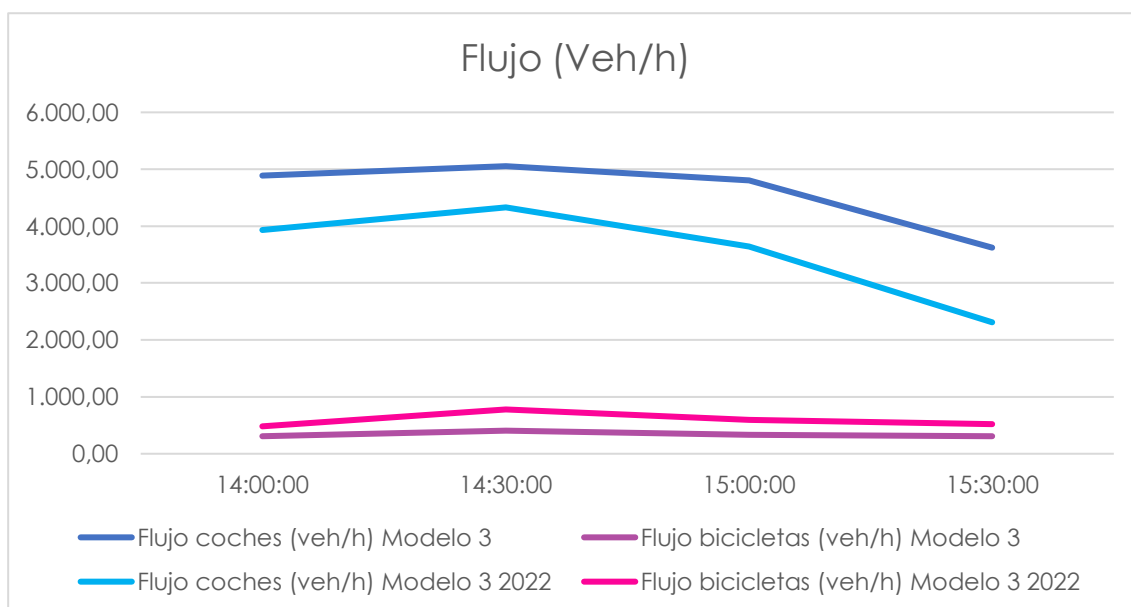


Ilustración 3.4-17: Comparación del flujo entre el Modelo 3 del año actual y el Modelo 3 del año objetivo.

Flujo medio de vehículos	Veh/h
Modelo 3 coches	4590'50
Modelo 3 bicicletas	338'50
Modelo 3 coches 2022	3553'5
Modelo 3 bicicletas 2022	592'68

Tabla 3.4-9: Valores medios del flujo del Modelo 3 del año actual y el Modelo 3 del año objetivo.

- Tiempo de viaje

Observando el siguiente gráfico se deduce que, al predecir para el año 2022 un aumento en la demanda de bicicletas, el tiempo de viaje de las mismas se va a ver incrementado. También, se puede observar claramente que, la simulación nos devuelve un resultado de un aumento en el tiempo de viaje para los coches para el año objetivo, esto ocurre ya que si comparamos la reducción de la demanda de coches con el aumento en la demanda de bicicletas es mucho mayor ésta última en proporción, por lo que, aunque haya un menor número de coches en la calzada al tener circulando muchas más bicicletas que antes, el tiempo de viaje se incrementa.

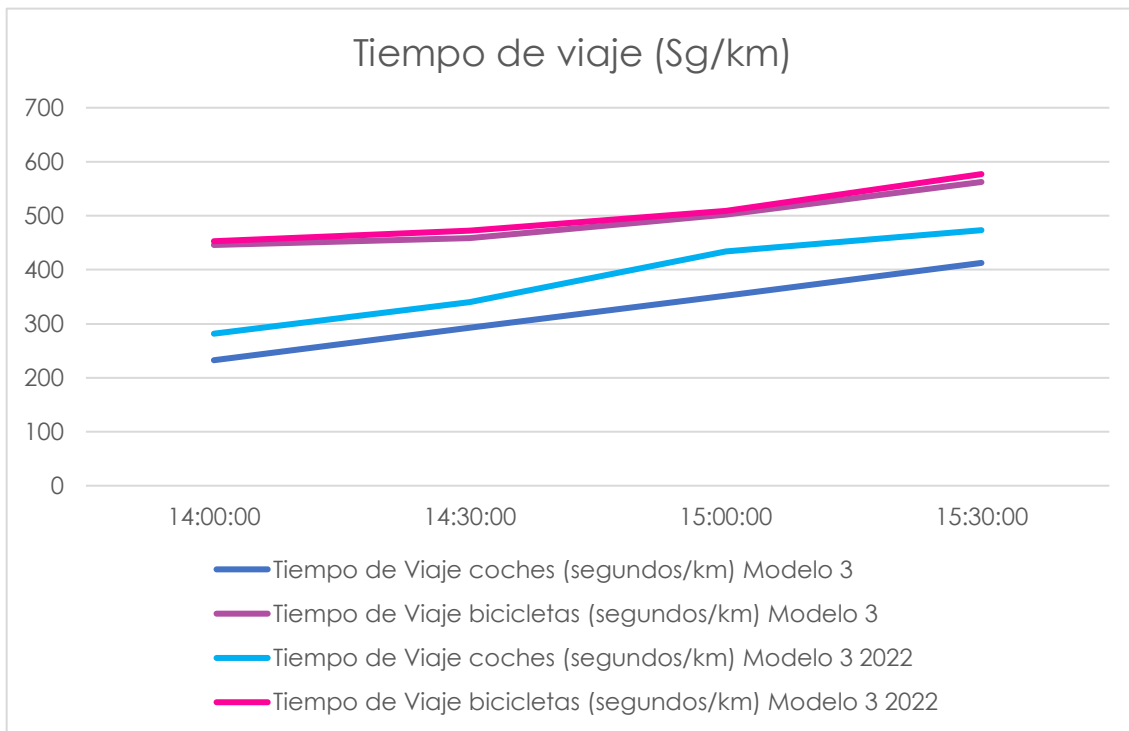


Ilustración 3.4-18: Comparación de los tiempos de viaje entre el Modelo 3 del año actual y el Modelo 3 del año objetivo.

Tiempo de viaje medio	Sg/km
Modelo 3 coches	322'26
Modelo 3 bicicletas	492'17
Modelo 3 coches 2022	382'17
Modelo 3 bicicletas 2022	502'94

Tabla 3.4-10: Valores medios del tiempo de viaje del Modelo 3 del año actual y el Modelo 3 del año objetivo.

- Tiempo de demora

Como se aprecia en la gráfica y en la tabla de valores medios, el tiempo de demora tanto para coches como para bicicletas aumenta en el año objetivo.

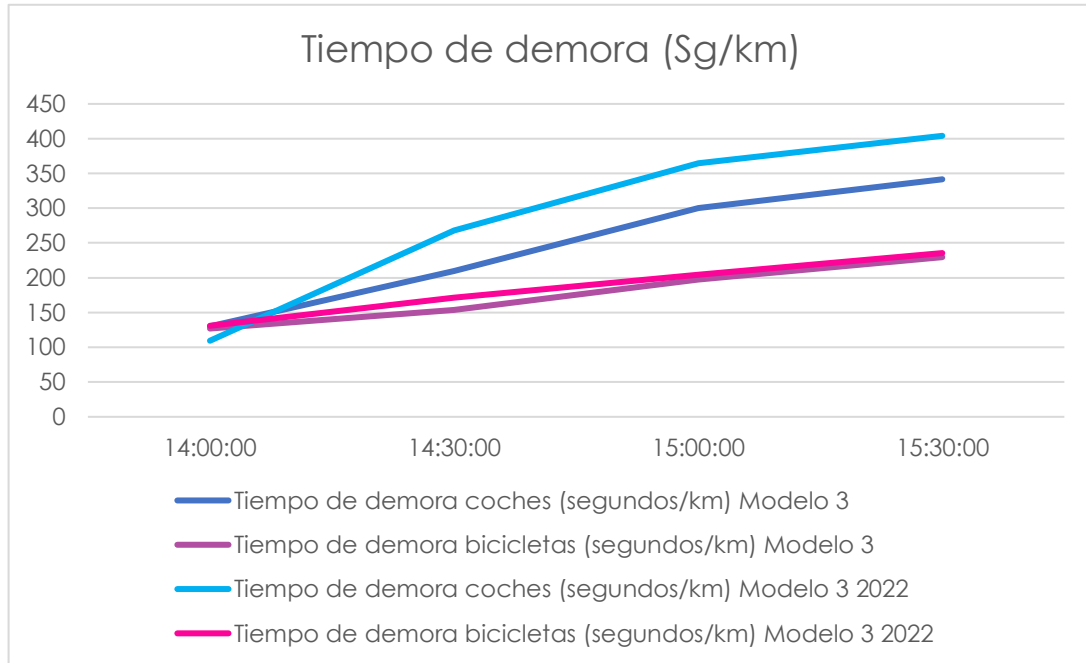


Ilustración 3.4-19: Comparación del tiempo de demora entre el Modelo 3 del año actual y el Modelo 3 del año objetivo.

Tiempo de demora medio	Sg/km
Modelo 3 coches	245'35
Modelo 3 bicicletas	176'81
Modelo 3 coches 2022	286'60
Modelo 3 bicicletas 2022	185'44

Tabla 3.4-11: Valores medios del tiempo de demora del Modelo 3 del año actual y del Modelo 3 del año objetivo.

- Velocidad

Se prevé que la velocidad media de los coches en el barrio disminuya ligeramente al igual que la de las bicicletas.

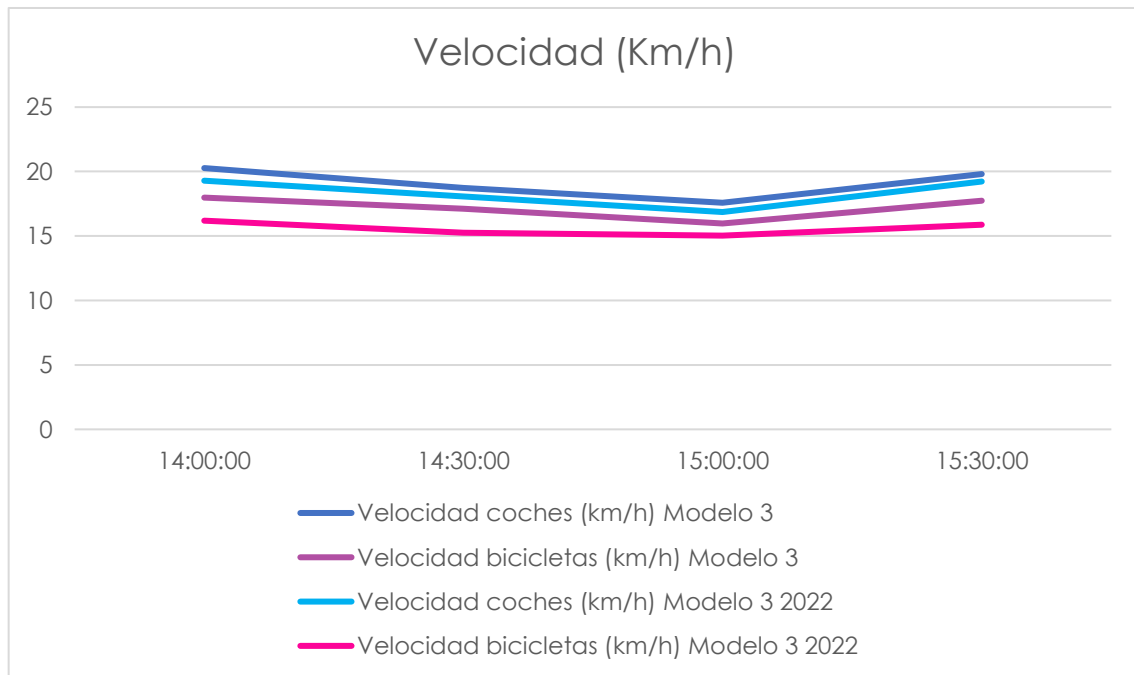


Ilustración 3.4-20: Comparación de la velocidad entre el Modelo 3 del año actual y el Modelo 3 del año objetivo.

Velocidad media	Km/h
Modelo 3 coches	20'6
Modelo 3 bicicletas	17'2
Modelo 3 coches 2022	18'36
Modelo 3 bicicletas 2022	15'59

Tabla 3.4-12: Valores medios de la velocidad del Modelo 3 del año actual y el Modelo 3 del año objetivo.

3.4.3. Análisis de resultados

A continuación, se exponen en forma de tabla todos los resultados obtenidos:

Coches	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Flujo (Veh/h)	5831	5449	4590'50	3.553'50
Tiempo de viaje (Sg/km)	274'19	301'51	322'26	382'17
Tiempo de demora (Sg/km)	204'56	231'03	245'35	286'60
Velocidad (Km/h)	20'48	20'09	19'1	18'36

Tabla 3.4-13: Resultados obtenidos para los coches.

Bicicletas	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Flujo (Veh/h)	293	317'50	338'50	592'68
Tiempo de viaje (Sg/km)	255'07	472'47	492'17	502'94
Tiempo de demora (Sg/km)	72'74	159'83	176'81	185'44
Velocidad (Km/h)	15'95	17'11	17'2	15'59

Tabla 3.4-14: Resultados obtenidos para las bicicletas.



El análisis de resultados se va a realizar comparando la situación actual de barrio con los resultados que se han obtenido simulando como se comportaría el tráfico en la Rondilla en el año objetivo, es decir, se va a analizar la primera y cuarta columna de las tablas.

A la vista está que el factor estudiado más cambiante para los coches es el flujo, el cual se ve reducido notablemente. Del tiempo de viaje se puede destacar que aumenta con respecto a la duración actual, pero no tanto como para considerarlo un factor que afecte negativamente a nuestro escenario. El tiempo de demora se incrementa ligeramente por el hecho de aumentar o disminuir con el tiempo de viaje. Respecto a la velocidad, afirmaremos que disminuye en el año objetivo, pero no bruscamente, ya que, los modelos están simulados de forma que, si los coches dentro de la ruta elegida necesariamente tienen que pasar por una calle donde esté presente un ciclocarril, éstos realizarán ese tramo de la ruta por el carril izquierdo si eso les permite llegar de forma igualmente óptima a su destino.

En lo concerniente a las bicicletas, también se puede afirmar que el factor más variante es el flujo, que en contraste con el de los coches, éste aumenta con notoriedad. El tiempo de viaje crece, pero, como ocurre con los coches, tampoco podemos considerarlo como un factor negativo, ya que en gran parte se debe a que en nuestro año objetivo el itinerario ciclista contará con más kilómetros que los existentes a día de hoy en el barrio. El tiempo de demora, como ya hemos visto, aumenta igual que lo hace el tiempo de viaje. De la velocidad se observa que también se reduce para las bicicletas, pero lo hace discretamente si valoramos el gran aumento del número de ciclistas en la vía.

En resumen, a pesar del incremento en los tiempos de viaje y de las velocidades, éstos no son tan significantes en comparación con la variación de los flujos. Ésto nos demuestra que las bicicletas no van a retardar tanto a los coches como se podría pensar en un principio, y, además, pese a la presencia de más bicicletas en las vías, éstas tampoco se van a obstaculizar entre ellas.



Para concluir, se afirma, que, de llevar a cabo la ejecución de este proyecto, se obtendrían tres grandes beneficios para la ciudad y los ciudadanos de Valladolid:

- Tener conectado el barrio de La Rondilla de Este a Oeste mediante sendas aptas para la movilidad ciclista.
- Disposición de nuevas vías aptas para la movilidad de patinetes eléctricos, los cuales necesitan vías con reducción de velocidad a 30 km/h para poder circular.
- Aumento de la actividad física de los habitantes que opten por el uso de la bicicleta como medio de transporte. En tan sólo diez minutos de actividad a un ritmo menor a 16 km/h, una persona que pesa 60 kg habrá quemado 40 calorías y una persona de 100 kg habrá consumido casi 70.
- Reducción notable de la contaminación, haciendo de la Rondilla un lugar sostenible medioambientalmente hablando. Por cada kilómetro que se recorra en bicicleta en lugar de en coche, se evitaría la emisión de aproximadamente 300 gramos de dióxido de carbono.

De este último punto, se expondrá a continuación un ejemplo numérico para poder analizar mejor dicho beneficio: Supongamos que, basándonos en los valores de las matrices O/D, circulan 250000 coches al año desde el Puente de la Condesa Eylo hasta la Avenida de Palencia (tramo habilitado con carril bici y ciclocarril). Si este itinerario mide un total de 1'2 km, al año son 300000 km recorridos en coche y 90 toneladas de dióxido de carbono emitidas a la atmósfera. Si ahora se estudia la misma situación, pero con un decremento en el número de coches del 5% anual, pasamos a tener 12500 coches menos en las calles del itinerario elegido y se estarían emitiendo 4'5 toneladas menos de dióxido de carbono anuales por simplemente circular en bicicleta por un tramo de 1'2 km del barrio de La Rondilla de Valladolid. Se puede imaginar la reducción de emisiones contaminantes que se obtendría si se extrapola el cálculo anterior a más calles, más barrios y más ciudades.



Capítulo 4: Conclusiones



En el estudio y elaboración de este proyecto se ha modelado el transporte de coches, autobuses y bicicletas en el barrio de la Rondilla mediante la creación de modelos analíticos altamente funcionales a través de software AIMSUN.

Se ha conseguido el desarrollo de unos escenarios de integración del tráfico de bicicletas dentro de las directrices del Plan General de Urbanismo de la ciudad de Valladolid.

Las principales conclusiones obtenidas en la realización de este Trabajo de Fin de Grado se han alcanzado trabajando sobre los objetivos planteados y por lo cual se enumeran a continuación:

- Se ha obtenido un modelo optimizado que dota a un área residencial urbana de un itinerario ciclista que lo mantiene conectado, tanto entre sus calles como con otros barrios contiguos. También, se ha demostrado que un aumento en la movilidad en bicicleta, con su consiguiente reducción de vehículos a motor, no interfiere negativamente en la circulación del tráfico rodado, ya que su tiempo de viaje y velocidad aumentan de forma poco destacable con la estabilización del modelo. Además, la implantación de dicha propuesta aporta beneficios irrefutables como la reducción de la contaminación.
- Se ha mostrado que el programa AIMSUN es una herramienta útil a la hora de elaborar simulaciones de transporte urbano para cualquier red viaria o para una parte de ella, también, se valida su aplicación como instrumento de trabajo en posteriores proyectos previstos y en posibles planes didácticos de la asignatura de Ingeniería del Transporte.
- Se ha desarrollado una tecnología extrapolable a otros barrios y a otras ciudades con configuraciones viarias parecidas a las que presenta Valladolid.



4.1. Líneas futuras de trabajo

El grupo de Tráfico sigue trabajando y realizando propuestas de proyectos sobre la Ingeniería del Transporte para intentar mejorar el concepto urbanístico de Valladolid. Entre las posibles líneas futuras de trabajo se señalan:

- Continuar con la línea actual de trabajo de incorporar carriles bici y ciclocarriles a otros barrios de Valladolid basándonos en la misma metodología, y así poder hacer que la ciudad tenga más zonas con reducción de emisiones contaminantes.
- Análisis de la colocación de diferentes parkings para bicicletas en la Rondilla y en próximos barrios sometidos a estudio.
- Simular futuras mejoras respecto a lo que el transporte público se refiere.





Capítulo 5: Estudio económico



En este capítulo se ha estudiado un presupuesto global de los costes totales y su desglose por conceptos en los que se ha incurrido en la planificación y proceso de este proyecto.

Para el cálculo de costes de personal, debemos tener en cuenta que el equipo de trabajo ha estado formado por:

- Un Director de Proyecto.
- Un Ingeniero en Organización Industrial.
- Un Técnico Informático.
- Personal no cualificado (4 personas).

Los costes salariales se han estimado teniendo en cuenta:

- Sueldo neto.
- Pagos a la Seguridad Social.
- Vacaciones.
- Días festivos reconocidos.
- Días perdidos.
- Número de horas empleadas en la realización del proyecto.
- Costes efectivos de cada una de las horas dependiendo de las clases de trabajador que estemos considerando.

5.1. Cálculos

5.1.1. Costes directos

Se consideran como costes directos aquellos que son directamente imputables a la elaboración del proyecto y por tanto los costes principales en los que se incurren son: Los costes salariales del personal componente del grupo de trabajo y el coste de amortización de los equipos utilizados.

5.1.1.1. Costes de personal

El coste horario del personal se calcula dividiendo el coste anual del mismo por el número de horas efectivas estimadas.

En cada uno de los costes de personal se ha incluido, además del sueldo neto correspondiente a cada clase de trabajador, un pago de la Seguridad Social a cargo del presupuesto del proyecto que se ha estimado como un 35% del sueldo neto anual.

Primero se va a hacer un cálculo del número de horas efectivas al año teniendo en cuenta que hay que descontar de los 365 días/año los fines de semana, los días de vacaciones laborables (20 días laborables por mes de vacaciones), los días festivos y los días perdidos por motivos personales.

El número de horas de trabajo efectivas en un año aparece en la siguiente tabla:

Días/año	365
Sábados y Domingos	104
Días vacacionales festivos	20
Días reconocidos	15
Días perdidos por motivos personales	5
Total días efectivos al año	221
Horas diarias	8
Horas efectivas al año	1768

Tabla 5.1-1: Horas efectivas de trabajo

- Coste del Director de Proyecto

Concepto	Coste
Sueldo neto e incentivos por año	34.000 €
Seguridad Social	11.900 €



Cantidad total por año	45.600 €
Coste horario	26 €

Tabla 5.1-2: Sueldo y coste horario del Director de Proyecto.

- Coste del Ingeniero en Organización Industrial

Concepto	Coste
Sueldo neto e incentivos por año	27045'5 €
Seguridad Social	9465'9 €
Cantidad total por año	36511'5 €
Coste horario	20'6 €

Tabla 5.1-3: Sueldo y coste horario del Ingeniero.

- Coste del Técnico Informático

Concepto	Coste
Sueldo neto e incentivos por año	21035'4 €
Seguridad Social	7362,4 €
Cantidad total por año	28397'8 €
Coste horario	16'1 €

Tabla 5.1-4: Sueldo y coste horario del Técnico Informático.



- Coste del Personal no cualificado

Concepto	Coste
Sueldo neto e incentivos por año	8714'6 €
Seguridad Social	3050 €
Cantidad total por año	11764'8 €
Coste horario	6'6 €

Tabla 5.1-5: Sueldo y coste horario del Personal no cualificado.

Una vez determinados los costes horarios del personal, hay que realizar una estimación del número de horas empleadas por cada uno de ellos en la realización del proyecto en cada una de sus fases. El número de horas trabajadas por cada clase de trabajador están representadas en las siguientes tablas:

	Concepto	Horas empleadas	Horas totales
Director de Proyecto	Documentación	10	75
	Análisis de datos	30	
	Propuestas de mejora	25	
	Elaboración de la documentación	10	

Tabla 5.1-6: Número de horas invertidas por el Director de Proyecto.



	Concepto	Horas empleadas	Horas totales
Ingeniero Industrial	Estudio previo y documentación	60	465
	Recogida y análisis de datos	20	
	Aprendizaje del software	90	
	Desarrollo del modelo	65	
	Calibración, validación y simulación	150	
	Propuestas de mejora	60	
	Análisis de resultados y redacción de informes	80	

Tabla 5.1-7: Número de horas invertidas por el Ingeniero en Organización Industrial.

	Concepto	Horas empleadas	Horas totales
	Estudio previo y documentación	20	
	Recogida y análisis de datos	10	



Técnico Informático	Realización de la base de datos	45	325
	Análisis de datos	20	
	Calibración, validación y simulación	220	
	Análisis de resultados y redacción de informes	10	

Tabla 5.1-8: Número de horas invertidas por el Técnico Informático.

	Concepto	Horas empleadas	Horas totales
Personal no cualificado	Estudio previo y documentación	20	230
	Recogida y análisis de datos	200	
	Realización de la base de datos	0	
	Análisis de datos	0	
	Calibración, validación y simulación	0	
	Análisis de resultados y	10	

	redacción de informes	
--	--------------------------	--

Tabla 5.1-9: Número de horas invertidas por el Personal no cualificado.

El coste total de cada empleado se obtiene multiplicando el coste horario correspondiente a su categoría laboral por el número total de horas en las que se ha visto involucrado en la elaboración de este proyecto.

Todo queda reflejado en la siguiente tabla donde se resume el coste por empleado:

Concepto	Director de Proyecto	Ingeniero Industrial	Técnico Informático	Personal no cualificado
Horas empleadas	75	465	325	230
Coste horario	26 €	20'6 €	16'1 €	6'6 €
Total	1950 €	9579 €	5232'5 €	1518 €
Total Coste de Personal	18079'5 €			

Tabla 5.1-10: Coste total de personal.

5.1.1.2. Costes de amortización de material

EL coste de amortización del material utilizado en el proyecto se calcula considerando una vida útil de 3 años para los equipos informáticos y de 1 año para el Software que alimenta nuestro equipo.

Consideramos un método de amortización lineal e el tiempo para realizar la amortización de nuestro material.

	Concepto	Precio total	Vida útil
Equipos Informáticos	Ordenador DELL MAD-GLK3NH2	1000 €	3
	Impresora HP Officejet 4655	85 €	3
Software	S.O. Windows 10 Enterprise	105 €	3
	Software AIMSUN6.1. Advanced	3000 €	3
	Paquete Microsoft Office Professional Plus 2013	76 €	1

Tabla 5.1-11: Costes y vida útil del material utilizado.

El coste de amortización se calcula multiplicando el coste horario del material por el número de horas que se ha utilizado el equipo. El coste horario del material se calcula dividiendo el coste total entre la vida útil estimada (supuesto un valor residual nulo), este valor también se conoce como índice de amortización y el número de horas efectivas de trabajo por año. Se considerará que los días efectivos de funcionamiento de los equipos utilizados coinciden con las horas que se han empleado en realizar el proyecto, es decir, 465 horas.

En la Tabla 4.1-12 aparecen representado los costes totales de amortización:

	Concepto	Índice de amortización (€/horas)	Horas de trabajo	Coste de amortización
Equipos Informáticos	Ordenador DELL MAD-GLK3NH2	0'19 €	465	88 €
	Impresora HP Officejet 4655	0'02 €	465	7 €
Software	S.O. Windows 10 Enterprise	0'02 €	465	9 €
	Software AIMSUN6.1. Advanced	0'57 €	465	263 €
	Paquete Microsoft Office Professional Plus 2013	0'04 €	465	20 €
Total Coste de Amortización		387 €		

Tabla 5.1-12: Coste de amortización.

5.1.1.3. Costes totales directos

Los costes directos totales se han calculado como la suma del coste de personal, el coste de amortización de los equipos, el coste del material utilizado para el desarrollo de este proyecto y otros costes directos.

Los costes directos del material quedan contabilizados en la Tabla 4.1-13 y el resumen de los costes totales directos en el Tablas 4.1-14:

Concepto	Coste
Papel de impresión 300 hojas (A4, 80 g/m ²)	25 €
Cartucho de tinta número 301 para impresora HP Deskjet	40 €
CD's (CD-R, 700 MB, 80 min, 52x)	13 €
Otros	100 €
Total Coste de Material	178 €

Tabla 5.1-13: Coste de material.

Concepto	Coste
Total Coste de Personal	18079'5 €
Total Coste de Amortización	387 €

Total Coste de Material	178 €
Otros Costes Directos	150 €
Total Costes Directos	18794'5 €

Tabla 5.1-14: Total de costes directos.

5.1.2. Costes indirectos

En este apartado se consideran todos aquellos costes que no son directamente imputables a la elaboración del proyecto. Estos costes se representan a continuación:

Concepto	Coste
Costes de Servicios Administrativos	300 €
Otros gastos	180 €
Total Costes Indirectos	480 €

Tabla 5.1-15: Total de costes indirectos.

5.2. Coste total del proyecto

El coste total del proyecto se calcula como la suma de los costes directos y los costes indirectos. Este coste aparece reflejado en la siguiente tabla:

Concepto	Coste
Total Costes Directos	18794'5 €
Total Costes Indirectos	480 €
Coste Total del Proyecto	19274'5 €

Tabla 5.2-1: Coste Total de Proyecto.

En la siguiente figura se representa gráficamente los costes totales del proyecto por conceptos:

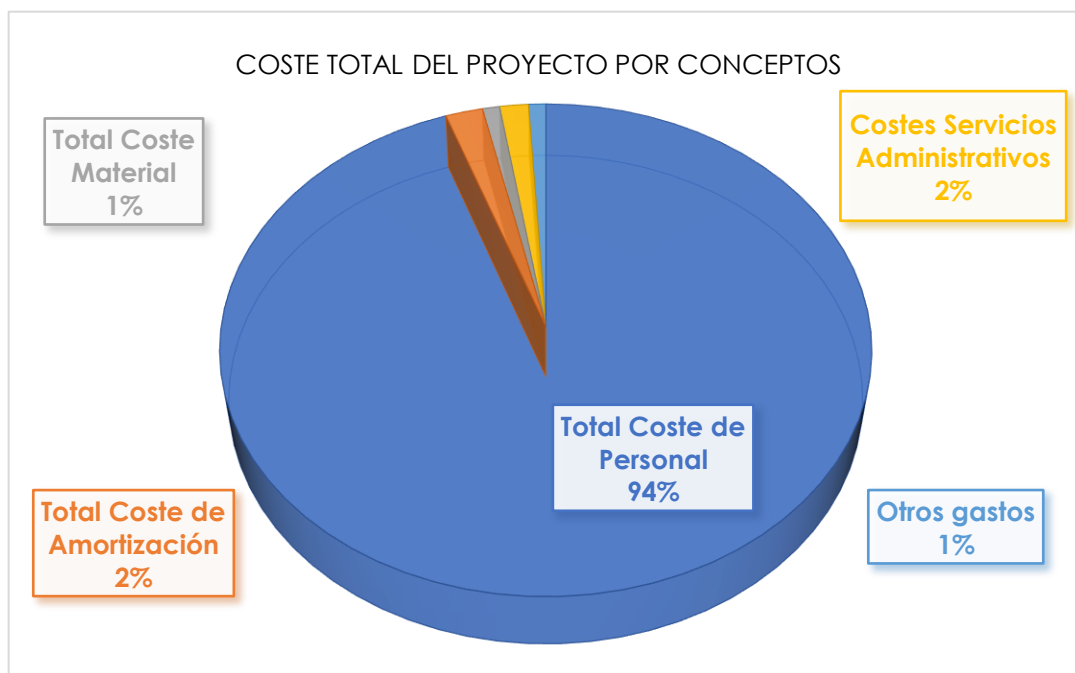


Ilustración 5.2-1: Coste Total del Proyecto por conceptos.





Capítulo 6: Bibliografía



- Libros

- *Aimsun 6.1 New Features*. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.
- *Aimsun Macroscopic Modelling Manual v6_1*. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.
- *Aimsun MicroMeso Users Manual v6_1*. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.
- *Aimsun Users Manual v6_1*. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.
- *Aimsun's Adaptive control interfaces Manual v6_1*. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.
- *Aimsun's Planning software interfaces Manual v6_1*. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.
- *Aimsun's Signal optimisation interfaces Manual v6_1*. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.
- *Estudio de la red de vías ciclistas de Sevilla: Buenas prácticas aplicadas y lecciones aprendidas (2002)*. Consejería del Medio Ambiente. Junta de Andalucía.
- *Modelización de redes de transportes*. Ingeniería del Transporte. Universidad de Valladolid (2017).
- Morlok, E.K (1979). *Introduction to transportation engineering and planning*. McGraw Hill.
- *Plan director de la bicicleta de Zaragoza (2010)*. Ayuntamiento de Zaragoza.
- *Plan Integral de Movilidad Urbana ciudad de Valladolid (2003)*. Informe sobre movilidad. Ayuntamiento de Valladolid.



- Valdes A. (1988). *Ingeniería de Tráfico*". Bellisco: Madrid.
- **Proyectos**
 - *Análisis e implantación del modelo de supermanzanas en el barrio de la Rondilla*. Blanco San Miguel, Cristina. Trabajo de Fin de Grado (2019).
 - *Análisis y simulación del tráfico rodado del barrio de La Rondilla*. Fernández Miguel, Juan. Trabajo de Fin de Grado (2015).
 - *Modelo de integración de los vehículos de movilidad personal (VPN) en un área residencial urbana*. Isla Lorenzo, Laura. Trabajo de Fin de Grado (2019).
 - *Modelos de integración para el desarrollo sostenido de la movilidad en zona urbana*. González González, Jorge. Proyecto de Fin de Carrera (2000).
- **Páginas web**
 - Asociación Vecinal Rondilla. <https://rondilla.org/asociacion-rondilla.html>
 - Bikester. <https://www.bikester.es/info/uso-bicicleta-espana-2017/>
 - Circula Seguro. <http://www.circulaseguro.com/sabes-lo-que-es-un-ciclocarril/>
 - Diario de Valladolid. http://www.diariodevalladolid.es/noticias/valladolid/valladolid-contara-diez-nuevos-kilometros-ciclocarril-30-hora_147865.html
 - Google Maps. <https://www.google.com/maps>
 - La red 21. <http://www.lr21.com.uy/ecologia/1219996-beneficios-medio-ambiente-pedalear-andar-en-bicicleta>
 - Motorpasión. <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/ciclocarriles-y-ciclocalles/>
 - Plan Integral de Movilidad Urbana Ciudad de Valladolid. <https://www.valladolid.es/es/temas/hacemos/plan-integral-movilidad-urbana-ciudad-valladolid-pimuva/>



- *Plan Integral de Movilidad Urbana, Sostenible y Segura de la Ciudad de Valladolid. <http://www.pimussva.es/>*

