



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

TESIS DOCTORAL

ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DE LAS
INFRAESTRUCTURAS DE LOS
CARRILES PARA BICICLETAS.

AUTOR:

ROBERTO JOSÉ LIÑÁN RUIZ

DIRECTORES:

FRANCISCO DE PAULA MONTES TUBÍO

SALVADOR MERINO CÓRDOBA

JOSÉ LUIS MOURA BERODIA

PROGRAMA DE DOCTORADO UNIVERSIDAD DE
CÓRDOBA

DEPT. INGENIERÍA GRÁFICA E INGENIERÍA DE
INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA

CÓRDOBA, 2016

TITULO: *Estudio y optimización de las infraestructuras de los carriles para bicicletas*

AUTOR: *Roberto José Liñán Ruiz*

© Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2016
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

www.uco.es/publicaciones
publicaciones@uco.es



TÍTULO DE LA TESIS:

ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DE LAS INFRAESTRUCTURAS DE LOS CARRILES PARA BICICLETAS

DOCTORANDO/A:

ROBERTO JOSÉ LINAN RUIZ

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

FRANCISCO DE PAULA MONTES TUBÍO. Profesor Titular de la Universidad de Córdoba. Área: Expresión Gráfica en la Ingeniería.

SALVADOR MERINO CÓRDOBA. Profesor Titular de Matemáticas Aplicadas de la Universidad de Málaga.

JOSÉ LUIS MOURA BERODIA. Profesor Titular de la Universidad de Cantabria. Director Escuela de Caminos, Canales y Puertos.

INFORMAN:

La Tesis Doctoral titulada ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DE LAS INFRAESTRUCTURAS DE LOS CARRILES PARA BICICLETAS, por el doctorando : ROBERTO JOSÉ LIÑÁN RUIZ, ha sido realizada bajo nuestra dirección y cumple las condiciones exigidas por la legislación vigente para optar al Título de Doctor por la Universidad de Córdoba.

El desarrollo de la tesis ha supuesto un extenso y laborioso trabajo de investigación, llevados a cabo en la Universidad de Málaga y con estancia de investigación en la Universidad de Cantabria. Se han estudiado los antecedentes y el estado actual de los diversos trabajos generados en la bibliografía científica, determinándose la indudable utilidad de la herramienta estudiada en el campo de la planificación y diseño de la movilidad urbana sostenible, a partir de las infraestructuras destinadas a la bicicleta.

La Tesis Doctoral ha desarrollado una metodología para el análisis e implantación de dichas infraestructuras en un caso práctico real, como es la ciudad de Málaga. Obteniéndose resultados realmente satisfactorios.

La versatilidad de la programación matemática realizada por el doctorando hace que su aplicación metodológica pueda adaptarse a multitud de casos, obteniéndose resultados prácticos. Facilitando una herramienta que facilita la planificación y el diseño de las infraestructuras para bicicletas.

A lo largo de su trayectoria de investigación en esta materia se destaca los grandes avances expuestos en los diferentes congresos que ha participado como ponente y las publicaciones realizadas. Siendo todo esto un indicador de calidad.

Título: *OPTIMIZATION OF CYCLE PATHS WITH MATHEMATICAL PROGRAMMING*
- Autores (p.o. de firma): *ROBERTO JOSÉ LIÑÁN, IÑAKI GASPAR, MARIA BORDOGARAY, JOSE LUIS MOURA, ÁNGEL IBEAS*
- Revista (año,vol.,pág.): *TRANSPORTATION RESEARCH PROCEDIA. AÑO 2014, VOLUMEN 3, PAGES 848-855*
- Base de Datos Internacional o Nacional (caso de CC.JJ., CC.SS. Y Humanidades) en las que está indexada:
- Área temática en la Base de Datos de referencia: *TRANSPORTATION SCIENCE & TECHNOLOGY* <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146514002257>

Título: *SYSTEM OPTIMIZATION COURIER AND PARCEL IN CITIES*
- Autores (p.o. de firma): *JOSÉ ANTONIO VERA LÓPEZ, ROBERTO JOSÉ LIÑÁN, ANA BELÉN PABÓN DUEÑAS, SALVADOR MERINO CÓRDOBA*
- Revista (año,vol.,pág.): *PROCEDIA-SOCIAL AND BEHAVIORAL SCIENCES. AÑO 2014, VOLUMEN 160, PAGES 577-586*
- Base de Datos Internacional o Nacional (caso de CC.JJ., CC.SS. Y Humanidades) en las que está indexada:
- Área temática en la Base de Datos de referencia: *TRANSPORTATION SCIENCE & TECHNOLOGY* <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042814062727>

Actualmente en revisión:

Título: *MATHEMATICAL OPTIMIZATION FOR PLANNING AND DESIGN OF CYCLE PATH*
- Autores (p.o. de firma): *ROBERTO JOSÉ LIÑÁN RUIZ, JORGE PÉREZ ARACIL, VÍCTOR CABRERA CAÑIZARES*
- Revista (año,vol.,pág.): *TRANSPORT POLICY*
- Base de Datos Internacional o Nacional (caso de CC.JJ., CC.SS. Y Humanidades) en las que está indexada: Factor de impacto:1.492 SNIP:1.632
- Área temática en la Base de Datos de referencia: *TRANSPORTATION SCIENCE & TECHNOLOGY* Pendiente de publicación

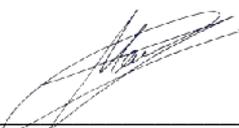
Título: *METHODICAL APPLICATION OF LOCATION OF SERVICE PUBLIC BIKE. MUyBICI OF MURCIA*
- Autores (p.o. de firma): *ROBERTO JOSÉ LIÑÁN, FERNANDO BERENGUER, JOSE ANTONIO VERA, ANA BELÉN PABÓN, SALVADOR MERINO*
- Revista (año,vol.,pág.): *TRANSPORTATION RESEARCH PROCEDIA.*
- Área temática en la Base de Datos de referencia: *TRANSPORTATION SCIENCE & TECHNOLOGY* Pendiente de publicación

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 31 de mayo de 2016

Firma del/de los director/es

Fdo.: 

Fdo.: 

Fdo.: 
JOSEL MOURA

*Dedicado a
mi familia*

Agradecimientos

Es difícil encontrar palabras que expresen la gratitud a todas las personas que te acompañan en la toma de decisiones. Por ello, debe agradecer de manera especial a mis directores de tesis, D. Francisco De Paula Montes Tubío, Salvador Merino Córdoba y José Luis Moura Berodia. Gracias D. Francisco por acogerme en su línea de investigación. Un especial agradecimiento por haber puesto su conocimiento, experiencia y dedicación a D. Salvador Merino, que desde hace años me aconseja en cada uno de los pasos dados en la investigación. Gracias, también, a D. José Luis Moura y D. Ángel Ibeas que me acogieron en el Grupo de Investigación de Transportes (GIST) de la Universidad de Santander como un miembro más.

No me gustaría olvidarme de las personas que, a pesar de estar detrás del telón, siempre han estado ahí. Mil gracias a mis amigos que han sufrido multitud de ausencias debidas a la investigación. A mi familia, gracias a todos y cada uno de ellos por acogerme en los pocos momentos que regreso a casa. Especial mención para mi familia política, es mucho lo que tengo que agradecerlos. A mis padres por todo lo que han luchado para facilitarme todas y cada una de las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida personal y profesional.

Por último a María, con la que he compartido todos los momentos, buenos y no tan buenos, de esta tesis. Gracias por estar siempre a mi lado.

Resumen

La necesidad cotidiana de los ciudadanos de desplazarse para realizar diferentes actividades, sea cual fuere su naturaleza, se ha visto afectada en gran medida por los cambios producidos. Las ventajas generadas por la inclusión de la bicicleta como modo de transporte y la proliferación de su uso entre la ciudadanía son innumerables y se extienden tanto en el ámbito de la movilidad urbana como del desarrollo sostenible.

En la actualidad, hay multitud de programas para la implantación, fomento o aumento de la participación ciudadana relacionado con la bicicleta en las ciudades. Pero en definitiva, todos y cada uno de estas iniciativas tienen la misma finalidad, crear una malla de vías ciclables eficaz y útil. Capaces de permitir el uso de la bicicleta en vías preferentes con unas garantías de seguridad altas, incorporando la bicicleta en el modelo de intermodalidad del transporte urbano.

Con la progresiva implantación del carril bici, muchas personas han empezado a utilizarlas para moverse por la ciudad. Pero todo lo nuevo necesita un periodo de adaptación. Y, la realidad es que la red de viales destinados para estos vehículos está repleta de obstáculos para el ciclista. La actual situación ha llevado a cuestionar qué cantidad de kilómetros de carriles bici son necesarios para abastecer la demanda existente de este modo de transporte y, si las obras ejecutadas y proyectadas son las correctas y suficientes.

En este trabajo se presenta una herramienta, basada en un modelo de programación matemática, para el diseño óptimo de una red destinada a los ciclistas. En concreto, el sistema determina una infraestructura para la bicicleta adaptada a las características de la red de carreteras existentes, con base en criterios de teoría de grafos ponderados.

Como una aplicación del modelo propuesto, se ofrece el resultado de estos experimentos, obteniéndose un número de conclusiones útiles para la planificación y el diseño de redes de carriles bici desde una perspectiva social. Se realiza una aplicación de la metodología desarrollada para el caso real del municipio de Málaga (España). Por último se produce la validación del modelo de optimización presentado y la repercusión que tiene éste sobre el resultado final y la importancia o el peso del total de variables capaces de condicionar el resultado final de la red ciclista.

Se obtiene, por tanto, una herramienta destinada a la mejora de la planificación, diseño y gestión de las diferentes infraestructuras para la bicicleta, con capacidad de interactuar con el modelo de red vial actual y con el resto de los modos de transportes existentes en el entramado urbano de las ciudades.

Abstract

The daily need for citizens to move for different activities, whatever its nature, has been greatly affected by the changes. The benefits generated by the bicycle's inclusion as mode of transport and the proliferation of its use among citizens are innumerable and extend both in the field of urban mobility and sustainable development.

Currently, there are many programs for implementation, promotion or increase public participation related to cycling in cities. But ultimately, each and every one of these initiatives have the same goal, to create a mesh effective and useful cycling trails. Able to allow the use of bicycles in preferred routes with a high safety guarantee incorporating bicycle on the model of intermodal urban transport.

With the gradual implementation of bike lanes, many people have begun to use them to get around the city. But everything again needs a period of adaptation. And the reality is that the road network intended for these vehicles is full of obstacles to the rider. The current situation has led to question how much kilometers of bike lanes are needed to supply the demand of this mode of transport and, if the works executed and planned are correct and sufficient.

In this work a tool based on a mathematical programming model for the optimal design of a network for cyclists is presented. Specifically, the system determines a bicycle infrastructure adapted to the characteristics of the existing road network, based on criteria weighted graph theory.

As an application of the proposed model, is offered the result of these experiments, obtaining a number of useful conclusions for planning and network design cycle paths

from a social perspective. An application of the methodology developed for the real case of the municipality of Malaga (Spain) is performed. Finally, validation optimization model presented and the impact it has on the final result and the importance or weight of all variables able to determine the final result of the cycling network occurs.

Is obtained therefore a tool for improving the planning, design and management of different infrastructures for bicycle's mobility, with ability to interact with the current model of road network and other existing modes of transport in the urban network of cities.

Índice de figuras

2.1. Comparación de los medios de transporte desde el punto de vista ecológico	16
2.2. Relación entre distancia y utilidad usuarios	29
3.1. Modelo de Red Vial de Málaga	38
3.2. Esquema de frente de Pareto	47
4.1. Evolución población Málaga	56
4.2. Clasificación zonal de Málaga	57
4.3. Clasificación zonal de Málaga.	63
4.4. Ejemplo de giro realizado con PTV Visum.	69
5.1. Sexo	82
5.2. Rango de edad.	83
5.3. Estado civil ciclistas.	84
5.4. Sexo de los ciclistas.	85
5.5. Nacionalidad.	86
5.6. Tamaño del Hogar.	86
5.7. Nivel de estudios	87
5.8. Nivel de estudios.	87
5.9. Nivel de ingresos.	88
5.10. Nivel de ingresos.	89
5.11. Nivel de ingresos y disponibilidad de coche.	90
5.12. Disponibilidad del bono transporte.	91
5.13. Disponibilidad de la bicicleta.	92
5.14. Ocupacion.	92
5.15. Ocupacion y motivo del viaje.	93

5.16. Hábito deportivo y Estado físico.	93
5.17. Motivo del viaje.	95
5.18. Modo del viaje.	96
5.19. Modo del viaje (segunda etapa).	97
5.20. Modo del viaje (tercera etapa).	98
5.21. Frecuencia de uso de la bicicleta.	99
5.22. Motivo uso bici.	100
5.23. Factor favorable: rapidez.	102
5.24. Factor favorable: horario.	103
5.25. Factor favorable: economico.	104
5.26. Factor favorable: saludable.	105
5.27. Factor favorable: ecologico.	105
5.28. Factor favorable: divertido / atractivo.	106
5.29. Resumen factores favorables uso bici.	107
5.30. Factor disuasorio: distancia.	109
5.31. Factor disuasorio: orografía.	109
5.32. Factor disuasorio: tiempo.	110
5.33. Factor disuasorio: climatología.	111
5.34. Factor disuasorio: no tener bici.	111
5.35. Factor disuasorio: seguridad.	112
5.36. Factor disuasorio: contaminación.	113
5.37. Factor disuasorio: ruido.	113
5.38. Factor disuasorio: robo.	114
5.39. Factor disuasorio: aparcamiento.	115
5.40. Factor disuasorio: instalaciones.	116
5.41. Factor disuasorio: social.	116
5.42. Factor disuasorio: continuidad carriles bici.	117
5.43. Factor disuasorio: señalización.	118
5.44. Valoración media Factores Disuasorios.	119
5.45. Valoracion media de los Factores Disuasorios.	121
5.46. Escenario 1: Presencia de la red de carriles bici.	122
5.47. Escenario 2: Limitación del tráfico y la velocidad.	123
5.48. Escenario 3: Acera compartida.	125

5.49. Escenario 4: Acera con separación física.	126
5.50. Escenario 5: Calzada compartida.	128
5.51. Escenario 6: Calzada separada.	129
5.52. Valoración media Escenarios propuestos.	130
6.1. Clasificación zonal de Malaga. Elaboración propia.	161
8.1. Situación Término Municipal de Málaga	186
8.2. Evolución población Málaga	187
8.3. Densidad población Málaga	188
8.4. Índice motorización Málaga	189
8.5. Principales vías canalizadoras de Málaga	191
8.6. Plazas aparcamiento bicicleta en Málaga	192
8.7. Infraestructura del carril bici en Málaga	193
8.8. Clasificación zonal de Málaga. Elaboracion propia.	194
8.9. Modelo de Red Vial de Málaga	197
8.10. Ejemplo Red Caso Práctico 1	224
8.11. Ejemplo Corredores 1 y 4.	225
8.12. CB Corredores 1 y 4.	226
8.13. Ejemplo Red Caso Práctico 2	230
8.14. Ejemplo Red Caso Práctico 3	235
8.15. Ejemplo Corredores 1 y 4.	236
8.16. CB Corredores 1 y 4.	236
8.17. Ejemplo Red Caso Práctico 4	241

Índice de cuadros

2.1. Reparto modal en diferentes ciudades.	17
4.1. Reparto modal (Málaga).	58
4.2. Comparativa sobre resultados de movilidad.	60
4.3. Tipología de vías modelizadas.	66
4.4. Clasificación de IMD de los arcos.	68
6.1. Anchura mínima para implantación de CB.	143
6.2. Seguridad asociada al IMD de la red vial. Elaboración propia.	150
6.3. Seguridad asociada a la Velocidad de la red vial. Elaboración propia.	151
6.4. Seguridad asociada a la Capacidad de la red vial. Elaboración propia.	151
6.5. Seguridad asociada al Tipo de Vía de la red vial. Elaboración propia.	152
6.6. Seguridad asociada al número de carriles. Elaboración propia.	152
6.7. Seguridad asociada a la Tipología de Carril Bici. Elaboración propia.	155
6.8. Seguridad asociada al Perfil del usuario genérico. Elaboración propia.	158
8.1. Anchura para implantacion de CB.	199
8.2. Tipología de vías modelizadas.	199
8.3. Seguridad asociada al IMD de la red vial.	201
8.4. Seguridad asociada a la Velocidad de la red vial.	201
8.5. Seguridad asociada a la Capacidad de la red vial.	202
8.6. Seguridad asociada al Tipo de Vía de la red vial.	202
8.7. Seguridad asociada al número de carriles.	203
8.8. Seguridad asociada a la Tipología de Carril Bici.	204
8.9. Seguridad asociada al Perfil del usuario genérico.	206
8.10. Seguridad zonal para la variable sexo.	208

8.11. Seguridad zonal para la variable edad.	209
8.12. Seguridad zonal para la variable número de hogares.	209
8.13. Seguridad zonal para la variable tamaño medio hogar.	210
8.14. Seguridad zonal para la variable número vehículo medio por hogar.	211
8.15. Seguridad zonal para la variable número hogares con vehículos.	211
8.16. Seguridad zonal para la variable estudiantes.	212
8.17. Seguridad zonal para la variable trabajadores.	212
8.18. Seguridad zonal para la variable equipamientos.	213
8.19. Seguridad zonal para la variable Número viajes.	213
8.20. Red Caso Práctico 1.	219
8.21. Anchura para implantacion de CB.	221
8.22. Corredores Caso Práctico 1.	223
8.23. Anchura para implantacion de CB.	227
8.24. Corredores Caso Práctico 2.	229
8.25. Anchura para implantacion de CB.	231
8.26. Seguridad asociada a la Tipología de Carril Bici.	232
8.27. Corredores Caso Práctico 3.	234
8.28. Anchura para implantacion de CB.	237
8.29. Seguridad asociada a la Tipología de Carril Bici.	238
8.30. Corredores Caso Práctico 4.	240
8.31. Resumen distancias de Corredores (Ejemplos).	243

1

Introducción

A lo largo de las últimas décadas la evolución, transformación y desarrollo de las ciudades, así como de sus características urbanísticas y físicas, se ha producido a un ritmo difícil de asumir. Dichas transformaciones tienen un patrón común de mayor relevancia para los habitantes de estas ciudades: la movilidad.

Se ha empezado a considerar necesaria la toma de medidas encaminadas a la gestión de la demanda de movilidad, mediante la diversificación y la promoción de modos de transporte menos agresivos y menos consumidores de suelo y recursos: los desplazamientos a pie, el transporte colectivo y la bicicleta.

La necesidad cotidiana de los ciudadanos de desplazarse para realizar diferentes actividades, sea cual fuere su naturaleza, se ha visto afectada en gran medida por los cambios producidos. Las ventajas generadas por la inclusión de la bicicleta como modo de transporte y la proliferación de su uso entre la ciudadanía son innumerables y se extienden tanto en el ámbito de la movilidad urbana como del desarrollo sostenible.

En la actualidad, existen multitud de programas para la implantación, fomento o incremento de la movilidad urbana relacionados con la bicicleta en las ciudades. Pero en definitiva, todas y cada una de estas iniciativas tienen la misma finalidad: crear una malla de vías ciclables eficaz, útil y que permita el uso de la misma en vías preferentes, con unas garantías de seguridad altas, incorporando la bicicleta en el modelo de intermodalidad del transporte urbano.

En esta tesis se ha realizado una evolución de los planes y proyectos anteriormente nombrados para conseguir una herramienta que facilite a los técnicos, ingenieros e investigadores en movilidad, la optimización de la planificación y gestión de las infraestructuras de los carriles para bicicletas.

1.1. Motivaciones

Desde hace unos años, en las calles de ciudades como Málaga, surge un nuevo elemento que forma parte de su día a día: *la bicicleta*. El modelo para la implantación de una red de carriles bicis se construye desde la concepción de un sistema de movilidad

homogéneo y equilibrado en el territorio urbano.

Con la progresiva implantación del carril bici, muchas personas han empezado a utilizarlas para moverse por la ciudad. Pero todo lo nuevo necesita un periodo de adaptación, y la realidad es que la red de viales destinados a estos vehículos está repleta de obstáculos para el ciclista. La actual situación, como usuarios de la bicicleta, nos llevó a plantearnos si una ciudad como Málaga necesitaba más infraestructuras en lo relacionado al carril bici y si, las ejecutadas y proyectadas, eran las correctas y suficientes para abastecer el número de viajes que se producen cada día en este modo de transporte, entendiéndolo no solo para la situación actual de una ciudad, sino también para el futuro.

Todo proyecto se debe ceñir a una normativa, pero en el caso de los carriles bici queda reducido a unas directrices o recomendaciones de cómo llevar a cabo este tipo de infraestructuras. Es aquí, debido a la falta de unas bases sólidas para la realización de este tipo de proyectos, donde surgen las ideas de este trabajo. Su finalidad es establecer como se pueden realizar las redes para ciclistas de una manera objetiva, rentables, seguras y atractivas para todos los usuarios, realizando un modelo que pueda ser aplicado en cualquier municipio.

1.2. Objetivos

Tal y como se ha descrito con anterioridad, la planificación de las infraestructuras diseñadas para bicicletas se realizan habitualmente en base a las pocas directrices que existen en la actualidad. En su mayoría están generadas a partir del sentido común y la propia experiencia de los planificadores, y no a estudios con base científica. Por este motivo, se describe como objetivo principal de esta tesis la obtención de herramientas cuyo finalidad sea la planificación y gestión de las infraestructuras destinadas a la bicicleta, de una forma objetiva y científica, basadas en la optimización matemática y en la modelización de sistemas.

Para llevar a cabo tal fin, es necesario desarrollar un conjunto de objetivos específicos que, a través de una series de etapas, llevarán a la consecución del proyecto final. Estos objetivos específicos serían los siguientes:

- Objetivo 1: realizar una revisión del estado del arte en el campo de la planificación y diseño de infraestructuras, destinadas a la circulación de las bicicletas, y de las teorías que sirven como base al modelo aquí presentado.
- Objetivo 2: especificar cada uno de los submodelos que componen la investigación y afectan en la solución óptima final del diseño del carril bici.
- Objetivo 3: estudiar la combinación de los distintos submodelos y la conexión con el modelo de transporte, proporcionando la solución objetiva que se persigue.
- Objetivo 4: definir el modelo de optimización que, a partir del diseño completo de la red vial, sea capaz de optimizar las tipologías de infraestructuras correspondientes para cada uno de los arcos que formarán parte de los diferentes corredores que forman la red ciclista urbana. Para ello deberá minimizar la distancia total de cada uno de los recorridos, teniendo como restricciones las características físicas de la red y la variabilidad de la configuración del modelo con respecto a la seguridad.
- Objetivo 5: desarrollar el modelo de simulación capaz de interactuar con el modelo de optimización y la representatividad final del resultado de los corredores, de una forma visual que facilite la toma de decisiones par ala planificación y diseño.
- Objetivo 6: aplicar la metodología de la investigación propuesta en un caso real, realizando una aplicación práctica software creado en la ciudad de Málaga.
- Objetivo 7: comprobar los resultados y extraer las conclusiones de los trabajos e investigaciones aplicados en el caso real, infiriendo en los resultados que puedan generar nuevas herramientas para la elaboración de nuevas políticas de fomento de la bicicleta.

1.3. Metodología

La metodología basada para la consecución de los anteriores objetivos se ha estructurado en distintos bloques.

El primero realizará el estudio y análisis de la revisión científica relacionada con los factores claves de la bicicleta como modo de transporte, asociado a los factores

motivadores para el fomento del uso de la bicicleta, junto con una caracterización de la influencia de las diferentes infraestructuras para la bicicleta en los usuarios y sus percepciones de seguridad.

En un segundo bloque se presenta la programación matemática basada en la optimización de una red vial existente, capaz de ofrecer diferentes alternativas a partir de las modificaciones de las restricciones establecidas por las características propias de la infraestructura del entramado urbano. Además, tendrá en cuenta la influencia directa del conjunto de variables relacionadas con la seguridad del diseño de los "carriles bici". Se seguirá con la combinación de estas variables con el modelo de simulación propuesto. Su finalidad será la de formar una herramienta con multitud de posibilidades de aplicación de nuevos sistemas de redes ciclistas urbanas.

Finalmente, la metodología desarrollada ha sido aplicada al estudio y optimización de las infraestructuras que formarán parte de la red ciclista urbana en el municipio de Málaga. Para ello se exponen diferentes casos prácticos que han servido para la exploración de las variables influyentes en el diseño de optimización y su correspondiente simulación.

1.4. Estructura de la tesis

El contenido de la tesis se ha dividido en 9 capítulos. El presente capítulo describe las motivaciones que han derivado en la realización de esta tesis, además de enumerar los diferentes objetivos y metodología desarrollada y en él se hace una breve descripción del conjunto de capítulos que componen el documento.

En el capítulo 2 se hace una introducción de las políticas de movilidad actuales y el papel que representa la bicicleta en ellas. Además, se analizan las teorías relacionadas con el comportamiento y el transporte, con especial atención en la caracterización de los usuarios de la bicicleta y los factores que influyen en su uso. El capítulo 3 aborda los diferentes modelos de optimización de recorridos y su relación con el modelo de red vial. En el capítulo 4 se presenta el proceso de tratamiento de datos basados en la zonificación del municipio, caracterización de la infraestructura de la red vial y el resultado de la toma de datos de movilidad facilitados por la encuesta realizada. Un mejor desarrollo de

los objetivos del análisis de movilidad y las preferencias de uso de la bicicleta, para el caso particular del municipio de Málaga, se exponen en el capítulo 5.

En los capítulos 6 y 7 se describen los diferentes modelos de optimización y modelos de simulación propuestos. En los primeros, se exponen las fuentes de dificultad encontradas y el modelo final para la optimización de la red ciclista. En los modelos de simulación, se presenta la planificación del software llevada a cabo y el modo de funcionamiento para el correcto uso de la herramienta creada.

En el capítulo 8 se muestra la aplicación práctica para el municipio de Málaga de los modelos propuestos, obteniéndose las diferentes redes ciclistas urbanas optimizadas. Finalmente, en el capítulo 9 se recogen las conclusiones extraídas sobre el resultado final del trabajo realizado y las propuestas de las futuras líneas de investigación.

2

Estado del arte

2.1. Introducción

En el año 1987 las Naciones Unidas elaboraron el Informe Brundland ¹, donde se plantea la posibilidad de obtener un crecimiento económico basado en políticas sostenibles y en la expansión de la base de los recursos ambientales. Es aquí donde se puede considerar los inicios en la política de sostenibilidad y, por tanto, en el concepto de desarrollo sostenible. Pero no fue hasta el año 1994, con la aprobación de La Carta de Aalborg¹⁹, cuando hubo un compromiso real para participar en las iniciativas de la Agenda 21 Local, cuyo fin es la creación y puesta en práctica de proyectos de desarrollo sostenible. En lo referente a movilidad urbana, la Carta de Aalborg especifica: “Daremos prioridad a los medios de transporte respetuosos con el medio ambiente (en particular, los desplazamientos a pie, en bicicleta o mediante los transportes públicos) y situaremos en el centro de nuestros esfuerzos de planificación una combinación de estos medios” ¹⁰⁸.

Durante el Congreso Mundial de la Bicicleta celebrado en Holanda en el año 2000, se aprueba la Declaración de Ámsterdam. Es en esta declaración donde se reconoce el derecho de usar la bicicleta, enumerando las ventajas, potencialidades y condiciones para el uso de las mismas. La declaración de Ámsterdam acaba haciendo un llamamiento a la acción y solicitando a las administraciones públicas la redacción de Planes Directores de la Bicicleta.

Con la aprobación por parte de la Comisión Europea del Libro Verde “Hacia una nueva cultura de la movilidad urbana”²³, se plantea un cambio del anterior concepto de movilidad urbana. Esta nueva definición se centra en conseguir una explotación eficiente de todos los modos de transporte y de garantizar la prosperidad y mejor aprovechamiento de los distintos sistemas colectivos (tren, tranvía, metro y autobús) e individuales (vehículos privados, bicicletas y a pie). En definitiva, la finalidad que persigue es la prosperidad económica y la gestión eficiente de la demanda de transporte, para garantizar conjuntamente la movilidad, la calidad de vida de los usuarios y la protección del medio ambiente.

¹El Informe Brundtland, elaborado por las Naciones Unidas, se puede considerar los inicios en la política de sostenibilidad.

Como consecuencia de todas las políticas que han ido apareciendo en los últimos años, existen multitud de proyectos y planes de actuación encaminados a conseguir unas infraestructuras y sistemas de transportes sostenibles, capaces de satisfacer las necesidades y demandas de la ciudadanía. Las necesidades de movilidad de cada población varían, por lo que concitan unas estrategias de actuación especiales para cada situación y ámbito urbano, generando prioridades de movilidad diferentes. Por tanto, para que la combinación de medidas sean adecuadas a cada uno de los casos particulares, se debe adaptar a sus características urbanas y socioeconómicas propias.

2.1.1. Pensamiento urbanístico actual

La configuración de los sistemas urbanos en el siglo XXI ha seguido en muchas ocasiones unos patrones aleatorios de asentamiento, impulsado por el mercado de la vivienda, y generando equipamientos de forma aislada. Este tipo de desorganización urbanística ha provocado en muchas zonas de las ciudades, especialmente españolas, la consolidación de un esquema de territorio carente de estructura y confort urbanístico, incentivando la dependencia del vehículo privado y evitando el desarrollo de modos de transporte sostenibles.

Es aquí donde la falta de afinidad entre las políticas municipales y los planes regionales producen el desconcierto en relación al planeamiento urbanístico, reflejado actualmente en muchos municipios de la geografía española, provocando el desorden y confusión en cuanto a la movilidad en las ciudades y áreas urbanas.

La transformación de muchas ciudades y regiones hacía modelos que favorecen la movilidad mediante el vehículo privado ha contribuido a la deslocalización territorial y, derivado de ello, a la configuración de un nuevo entramado urbano viario articulador de tales espacios¹⁸. Los efectos generados por este tipo de urbanismo contribuye a la pérdida de identidad urbana, donde el uso del vehículo privado es pieza obligada para el usuario⁴⁶.

Los costes necesarios para conservar este modelo suponen una importante inversión en el diseño, realización y mantenimiento de infraestructuras que favorezca y garantice

la movilidad en vehículo privado. Por consiguiente, es necesario hablar de nuevas pautas de movilidad sostenible que solucionen los problemas generados por el aumento del uso de automóvil. El objetivo primordial será por tanto la búsqueda de una planificación urbana que promueva una movilidad acorde con este nuevo modelo, mediante la utilización del transporte urbano y sostenible, disminuyendo el uso del vehículo privado como modo prioritario de transporte.

Con el objetivo de promover los modelos territoriales y urbanísticos más correctos es necesario centrar los esfuerzos en una planificación que vincule adecuadamente las dinámicas espaciales y la movilidad. Para hacer efectivo este planteamiento, existen diferentes herramientas políticas y estratégicas, tanto en ámbito europeo como nacional y local, que intentan promover nuevos modelos de movilidad, apostando por el impulso del transporte sostenible y la intermodalidad de los propios medios de transporte.

Según Guilhaire⁵³, es necesario que se produzca un cambio en la metodología de planificación del transporte de manera que se puedan englobar los nuevos retos de la movilidad propuestos y solventar el "enigma" que supone la intermodalidad. Dentro del tráfico mixto, los peatones y ciclistas son los elementos más críticos para dicha planificación. Para conseguir que todos los medios de transportes que actúan en el ámbito urbano operen de manera óptima, el diseño de la infraestructura debe cumplir con los requisitos de todos y cada uno de los elementos que participan. De este modo, Tiwari¹¹⁷ propone que, para cumplir con el diseño óptimo, se debe incluir a los modos de peatones y ciclistas en las estrategias convencionales de planificación.

Un sistema de transporte más sostenible se logra diseñando actuaciones globales que contemplen la totalidad del problema. Hay que considerar al sistema de transporte como una combinación de sistemas socio-tecnológicos, que se ven afectados por la aparición de un nuevo modo de transporte, como es el caso de la bicicleta⁴⁹. En este sentido se plantea la posibilidad real del uso de la bicicleta como medio de transporte, asimilando un cierto porcentaje de los viajes urbanos con distancias comprendidas entre los 1,5 y 7 kilómetros, facilitando unas condiciones de eficiencia y competitividad que fomenten su utilización. La incorporación de la bicicleta como modo de transporte, debe estar protagonizada por la implantación de nuevas pautas o normas respecto a su uso, debido

a la generación de nuevos comportamientos en los usuarios⁴⁸, plasmándose en un nuevo reparto modal de los viajes originado por el aumento del número de desplazamientos en bicicleta. Dentro del actual reparto modal, los viajes realizados por los peatones y bicicletas son considerados hasta 3,5 km¹⁰⁶. Con la nueva distribución, se obtiene que el número de desplazamientos realizados por los peatones se multiplica por 6 y el incremento de la distancia de recorrido es próximo al 40 %.

La relación existente entre el modelo de ciudad y las pautas de comportamiento asociados a los usuarios de la bicicleta, constituirán un planteamiento adecuado de modelo urbano. Cervero¹⁴, describe que en comunidades donde los equipamientos para el transporte a pie o bicicleta están bien equipados, los usuarios realizan un 49 % de sus viajes al trabajo y un 15 % de otros viajes en estos modos. Para comparar resultados, en comunidades con similares características, pero con una política que favorece el uso del automóvil, estos porcentajes disminuyen al 31 % y 4 % respectivamente.

Por consiguiente, para el fomento de la bicicleta como modo de transporte, deben cumplirse ciertos requisitos propios de los sistemas de transportes que se desglosan en 3 niveles: Primero, es necesario realizar actuaciones legales, modificando ordenanzas de tráfico y desarrollando una nueva normativa de circulación adaptada a la bicicleta. Segundo, respecto a la oferta del transporte, se requiere de una transformación del entramado urbano en cuanto a su infraestructura para facilitar la práctica ciclista. En tercer y último lugar, es precisa la adecuación, por parte de los agentes responsables de fomentar la bicicleta como modo de transporte, ante los cambios producidos en los usuarios por la influencia de la propia bicicleta como parte activa del sistema de transporte.

2.1.2. La bicicleta en la ciudad

Actualmente nos encontramos en un momento de cambio en las pautas de movilidad. El espacio público y la función social de las calles empieza a ser parte importante en la planificación. Para actuar de manera conjunta en las ciudades ya consolidadas y en los nuevos desarrollos urbanos es necesario y, de vital importancia, compaginar urbanismo y movilidad. Y es en este escenario donde los transportes públicos y, en especial la bicicleta, tienen un papel importante para afianzarse como una alternativa

factible en la movilidad actual. El potencial de la bicicleta como medio de transporte moderno hacen que sea una solución efectiva para el problema del transporte en las ciudades. Y aunque no es la única solución a los problemas derivados de la circulación y medio ambiente, sí constituye una solución idónea que encaja en las políticas actuales de revalorización del entorno urbano y mejora de la calidad de vida de las ciudades.

Cada desplazamiento que tiene como elección la bicicleta, en lugar del vehículo privado, genera un ahorro tanto para el individuo en particular como para el colectivo urbano, produciendo unas ventajas considerables con la reducción de ruido y contaminación urbana. Todas las ventajas ocasionadas por el uso de la bicicleta ofrecen un mayor atractivo del transporte público a partir de la intermodalidad y, por tanto, facilitan un tráfico automovilístico más fluido. Una de las ventajas con mayor repercusión es el ahorro de espacios, tanto en calzada como en aparcamientos, dando la posibilidad de invertir en lugares públicos de las ciudades para aumentar el atractivo de los centros urbanos.

En la actualidad, se está empezando a conceder a la bicicleta su lugar en la ciudad, en consonancia con el resto de los modos de transportes. Para explicar la importancia de la bicicleta como medio sostenible, se hace referencia a la comparación de los distintos sistemas de transporte realizado por el Informe UPI (1989), figura 2.1. Gracias a los nuevos retos de la Comisión de las Comunidades Europeas^{23 22} se están promoviendo estos espacios destinados a la bicicleta y a su desarrollo particular como modo de transporte.

En relación con la distribución modal, se pretende que la bicicleta forme parte activa en ella y sea incluida también en los viajes multimodales. La introducción de los peatones y las bicicletas como parte del sistema modal urbano son los encargados de este cambio de mentalidad⁷⁵. Este proceso de cambio, está convirtiendo a la bicicleta en un modo de transporte atractivo al conjunto de la sociedad, ocupando un lugar dentro de la oferta de transporte. Como consecuencia de este cambio de pautas y de mentalidad nace el sistema de bicicleta pública. La implantación de estos sistemas, junto con otras medidas llevadas a cabo por las diferentes instituciones públicas, han dado lugar a un cambio en el reparto modal de las ciudades, aumentando la demanda ciclista en aquellos lugares donde el número de usuarios era bajo⁸⁶.

Cuadro 1.1
Comparación de los distintos medios de transporte desde el punto de vista ecológico con el coche individual para un desplazamiento en personas/kilómetro idéntico
 Base = 100 (coche individual sin catalizador)

						
Consumo de espacio	100	100	10	0	1	6
Consumo de energía primaria	100	100	30	0	405	34
CO ₂	100	100	29	0	420	30
Monóxidos de nitrógeno	100	15	9	0	290	4
Hidrocarburos	100	15	8	0	140	2
CO	100	15	2	0	93	1
Contaminación atmosférica total	100	15	9	0	250	3
Riesgo inducido de accidente	100	100	9	2	12	3

* = coche con catalizador. Hay que recordar que la técnica del catalizador sólo es eficaz cuando el motor esté caliente. En distancias cortas en ciudad no se puede contar con un verdadero efecto benéfico anticontaminación.
 Fuente: Informe UPI, Heidelberg, 1989, citado por el Ministerio alemán de Transportes.

Figura 2.1: Comparación de los medios de transporte desde el punto de vista ecológico

El sistema de bicicleta pública.

La aparición del sistema público de bicicletas ha permitido abastecer y facilitar el acceso a un segmento de la población que, de otro modo, no tendrían acceso a la bicicleta como modo de transporte habitual o alternativo. En estos últimos años se han desarrollado diferentes proyectos que fomentan la inclusión de la bicicleta pública como parte activa de la ciudad. Algunos ejemplos de ciudades europeas que han puesto en marcha esta iniciativa son Málaga, Barcelona, Berlín, París, Londres, Sevilla, etc. Este tipo de sistemas brindan un servicio de movilidad práctico, rápido y pensado para el uso diario de los desplazamientos, ya que es un modo de transporte con una flexibilidad mayor en los trayectos urbanos que el resto de modos de transporte. Se considera a la bicicleta pública como otro modo más de transporte público.

Ciudad	Reparto modal
Sevilla	6 %
Madrid	0,5 %
Barcelona	1,5 %
Málaga	0,4 %
Vitoria-Gasteiz	7 %
Ámsterdam	22 %
Houten	44 %
Copenhague	26 %
Berlín	13 %
Helsinki	11 %
Brujas	28 %
Bristol	14 %

Tabla 2.1: Reparto modal en diferentes ciudades.

La evolución de los sistemas de bicicleta pública se clasifica en tres tipos o generaciones: el primero, se inició en Ámsterdam en 1965, consistía en un sistema gratuito de bicicletas. El segundo tipo o generación, se basaba en un sistema público de alquiler que comenzó en Copenhague, en 1995. Esta forma de préstamo era bastante similar a la que habitualmente se utiliza en supermercados y centros comerciales para el préstamo del carro de compra. La dificultad de este sistema se debía en un precio bajo de alquiler y la no existencia de un registro del usuario ni seguimiento de las bicicletas. Finalmente, el tercer tipo de generación de préstamos de bicicletas eran sistemas de información basados en la tecnología, surgido en Rennes en 1998³¹.

Por último fue propuesta una cuarta generación⁸ que permite la integración de la bicicleta pública con el resto de la oferta de transporte, implantando un sistema automático en los puntos de préstamos gestionados mediante un sistema telemático, a partir de las tarjetas inteligentes o abonos integrados de transporte. Este sistema de préstamo se generalizó por diferentes países de Europa a partir del año 2001, teniendo como ciudad de referencia a Lyon.

Ventajas y beneficios del uso de la bicicleta.

Dentro de este apartado se van a describir las características propias de la bicicleta, especialmente sus ventajas y beneficios como modo de transporte para el individuo en particular y de manera global como modo de transporte sostenible. La eficiencia de la bicicleta como medio de transporte nace de su alta competitividad en las distancias de desplazamientos cortas y medias. Son varios los estudios que insisten en la utilidad de la bicicleta en recorridos comprendidos entre los 1,5 km hasta una distancia media de 7,5 km. En esta franja de recorrido es donde destaca la bicicleta como único modo de transporte o como parte de la intermodalidad, ya que los viajes que se realizan normalmente no son de largas distancias. De esta forma puede comprobarse como la distancia media recorrida por las personas es mayor en los países donde tienen más importancia los medios de transportes no motorizados, provocando un mejor reparto modal de medios sostenibles y, como consecuencia, una creciente participación de la bicicleta como medio de transporte¹⁰⁶.

Se considera la capacidad del modo de transporte como la relación existente entre ocupación media del vehículo, la velocidad media de desplazamiento y la densidad máxima para cada modo. Esta combinación tiene como resultado el número de viajeros por sección de la vía y unidad de tiempo. La bicicleta destaca por tener mejor capacidad que los vehículos privados, pero pierde efectividad en comparación con los modos colectivos de alta ocupación. Sin embargo el modo de transporte en bicicleta se impone como medio con mejor aprovechamiento del espacio, en comparación a otros modos de transporte individual como los vehículos privados (coche y motocicleta).

Otro factor, anteriormente mencionado, es la ocupación del espacio. En ciudades desarrolladas donde la saturación urbana se hace excesiva, el espacio es un bien con un alto valor. En este sentido, la capacidad de transporte de la bicicleta, unido a su menor ocupación de espacio con respecto al coche, aumenta aún más si cabe el papel de la bicicleta como modo de transporte sostenible. La bicicleta ocupa menos espacio que los automóviles tanto en su desplazamiento como en la superficie que necesita para estacionarse. Según Illich⁶⁹, en su obra “Energía y equidad”, para que 40.000 personas puedan cruzar un puente en una hora moviéndose a 25 kms/hora, se necesita que éste

tenga 138 metros de anchura si viajan en coche, 38 metros si viajan en autobús, 20 metros si van a pié y 10 metros si van en bicicleta.

Desde el punto de vista energético, la bicicleta se presenta como un modo de transporte altamente competitivo por no ser contaminante, no produciendo gases tóxicos ni contaminación acústica y favoreciendo el bienestar social dentro de los centros urbanos. El uso de la bicicleta implica un ejercicio físico saludable, proporcionando una gran protección, no sólo ante las enfermedades cardiovasculares, sino también ante las enfermedades del aparato respiratorio y otras asociadas a la obesidad.

El coste asociado a la infraestructura para el uso de la bicicleta es mucho menor. Aunque muchos usuarios eligen la calzada como vía para sus desplazamientos, pueden desarrollarse infraestructuras específicas como las segregadas, el acondicionamiento de las acera-bici, una señalización específica, etc. Según Saelensminde¹¹¹, el rendimiento de las inversiones en el modo bicicleta en función del número de viajeros transportados, tiene una relación beneficio-coste de cinco a uno. De ahí que, con el actual incremento en la demanda del modo bici, generado en las diferentes ciudades, sea preciso plantear la realización y puesta en servicio de infraestructuras específicas para este medio de transporte⁵¹.

2.2. Estado del Arte

Una parte importante en el desarrollo de esta tesis ha sido la investigación y aplicación de las variables que afectan al comportamiento de los usuarios, y en concreto a los de las bicicletas, y al proceso de toma de decisiones de dichos usuarios. La psicología se ha mantenido ajena al tratamiento del comportamiento y su aplicación al mundo del transporte. Como parte de esta investigación se formula la conjugación entre psicología e ingeniería del transporte, tomando como parte principal del estudio los factores relacionados con los usuarios (percepciones, actitudes, etc.) respecto a la planificación y gestión del transporte.

2.2.1. Teorías del comportamiento y transporte

Dentro del campo de transporte el estudio de la toma de decisiones ha sido uno de los problemas a resolver desde su inicio. La gestión de la demanda genera resultados sobre el conjunto de todos los usuarios, estando cada uno de ellos representado por sus decisiones particulares, siendo por tanto las decisiones globales el fruto de los respectivos comportamientos individuales.

Existe bastante literatura relacionado con este tema, por lo que se plantea un breve desglose de algunas ideas claves en el desarrollo y exploración de estas variables y de otras denominadas latentes. Este último tipo de variables son aquellas que no se pueden observar de manera directa en los usuarios, pero si se pueden estudiar a partir de otras.

Se entiende por comportamiento la acción realizada por cada una de las personas influenciadas por su entorno y los estímulos que le rodean. Es decir, toda acción a realizar es la respuesta a un estímulo recibido. Estos cambios en el comportamiento vienen producidos por los factores del entorno, adquiriendo gran importancia las interacciones de los usuarios con el medio.

La teoría de la Acción Razonada² describe: “la intención para formar un comportamiento voluntario es el determinante inmediato de su acción”. A su vez, cada una de estas intenciones están descritas por dos factores, el primero reflejado en la naturaleza personal del usuario (actitud frente a comportamiento), proveniente de la experiencia propia del individuo en relación a sus acciones y decisiones¹⁰. El segundo viene reflejado por la influencia social (normas subjetivas), y proviene de la percepción del efecto social producido por lo que terceras personas o grupos sociales pensarán sobre el comportamiento en cuestión.

Estos factores son los encargados de caracterizar la intención de los usuarios. En cuanto a la perspectiva del transporte, los esfuerzos se centran en los factores que pueden influir en los cambios de intenciones. Un ejemplo de ello, se ve reflejado en una acción política para promover el cambio a modos de transportes sostenibles, donde se pueden crear situaciones anómalas que fomenten una resistencia de los usuarios a dicho

cambio.

Como se ha mencionado con anterioridad en este mismo apartado, dentro de la teoría de Acción Planificada, hay algunos comportamientos que se escapan del modelo ya que caracterizan a cada usuario dependiendo de sus factores y aptitudes particulares. Estos factores, que ayudan a explicar el control conductual percibido del individuo, se clasifican según Ajzen², en internos y externos. Entre los primeros se encuentran las diferencias individuales, información y habilidades, fuerza de voluntad y emociones y compulsiones. Como factores externos destaca el momento y oportunidad y la dependencia de terceros.

Con motivo de esos factores que influyen sobre las intenciones, es el propio Ajzen quien enuncia la teoría de la Acción Planificada³. En ella se describen los efectos de los factores que afectan al control conductual percibido, estableciendo que el comportamiento de los usuarios está influenciado por sus intenciones y, éstas a su vez, por las actitudes creadas por la experiencia del individuo, las normas subjetivas del efecto social de aceptación y el control conductual percibido.

Es en este concepto donde la teoría centra su base. Lo importante en los individuos no es el control real del comportamiento, sino la percepción personal que cada uno tiene de su propio control. Es decir, ante una misma acción de aprendizaje, dos individuos desarrollan diferentes comportamientos, debido a la diferente confianza que posee cada uno de ellos sobre sus propias habilidades. Esta teoría hace hincapié en cuestiones subjetivas que en los estudios sobre el transporte no son habituales, ya que éstos se centran en analizar los fenómenos a partir de variables observables y su relación con el comportamiento. Por tanto es aquí donde hay que señalar a las variables latentes.

En el campo de la ingeniería del transporte se estudia el hábito como una de las variables que más afecta a la decisión final de los usuarios. Estos últimos, al no conocer toda la información relativa a cada una de las alternativas disponibles, se sirven de su propia experiencia para tomar la decisión, condicionando por tanto esa elección a su propio hábito. Este comportamiento puede verse modificado al surgir nuevas alternativas, como sería el caso de la aparición de otros modos de transporte. Si de estas

alternativas se dispone, por ejemplo, de nuevos datos sobre rutas más corta, ocasionarán un nuevo planteamiento por parte del usuario relacionado con su comportamiento⁵⁷.

Por último en este apartado, se destaca la teoría de la Cognición Social⁷. Esta teoría se centra en la interacción del comportamiento con otros factores, como son los ambientales y las características propias del individuo, y como estos últimos influyen sobre el propio comportamiento. Como base de esta teoría, los aspectos ambientales son un factor fundamental a la hora de analizar el comportamiento de los diferentes usuarios, y unidos al estudio de las características personales, modifican el comportamiento y las elecciones que realiza el individuo.

La literatura es diversa sobre las relaciones del comportamiento de los usuarios. La influencia de las limitaciones físicas y la importancia dada a los aspectos ambientales se verán finalmente reflejadas en el resultado de la encuesta realizada para el caso de estudio de la tesis. Gracias a la mejora del conocimiento sobre el comportamiento de los viajes de los usuarios y de sus elecciones, se garantizará una solución óptima en el diseño de la infraestructura de carriles para bicicletas.

2.2.2. Caracterización del usuario de la bicicleta

Una vez expuesta parte de la literatura existente sobre la teoría del comportamiento, se plantea conocer y analizar cómo es el usuario de la bicicleta. La realización de un estudio de todos los elementos que influyen sobre su uso es complicada, como ya se ha podido observar anteriormente. Partiendo de los estudios realizados por Rietveld¹⁰⁷, estos elementos se van a clasificar en factores socio-culturales, factores del usuario e influencias de los restantes modos de transporte.

Es necesario conocer la diversidad de usuarios que pueden utilizar la bicicleta como modo de transporte, lo que conlleva a no poder describir un usuario tipo. Esta diversidad de usuarios de la bicicleta viene influenciada por las características socio-demográficas propias de cada individuo, y pueden facilitar una mayor comprensión de los diferentes sectores de la población donde la bicicleta se convierte en un modo de transporte potencial. Por ello se ha recopilado, de la literatura existente, algunos de los factores que

tienen una mayor repercusión para el uso de la bicicleta como modo de transporte.

Características socio-demográficas

Edad. En los estudios actuales hay ciertas discrepancias a la hora de ajustar los márgenes de edades que son más proclives al uso de la bicicleta^{107 21 33}, aunque se puede definir este sector de edad entre los 18 y los 45 años. La edad está directamente vinculada con el estado físico de las personas, lo que condiciona el tener una mayor o menor capacidad de usar la bicicleta como modo de transporte. En este sentido este factor también se encuentra asociado a otro tipo de variables, destacando entre ellas la disponibilidad o no de un coche o su nivel de ingresos. Como se explicará en los siguientes apartados estas últimas son dos variables que afectan de manera directa al uso de los diferentes modos de transporte.

Género. Sobre la variable de género no hay estudios que justifiquen las diferencias en el número de usuarios. Si bien es cierto que se pueden nombrar diferentes estudios que se han llevado a cabo, los resultados no han mostrado diferencias significativas. En aquellas ciudades donde la bicicleta está consolidada como un modo más de transporte, el porcentaje de uso de la bicicleta entre hombres y mujeres es similar¹⁰². Por el contrario, en ciudades donde la bicicleta no tiene un uso generalizado, el porcentaje de usuarios masculinos es mayor⁴. Puede deberse a que la percepción del riesgo es diferente en ambos sexos⁴⁷, ya que las mujeres son más precavidas en relación al propio riesgo, teniendo una mayor capacidad de percepciones negativas a la hora de circular por la calzada en confluencia con otros vehículos motorizados⁵⁸. Esta percepción de riesgo también puede estar relacionada con el uso de la bicicleta en la época de juventud⁴⁰, lo que también explicaría que los hombres tengan un nivel de percepción del riesgo menor que el de las mujeres. En un estudio realizado a los ciclistas en Portland³⁵, mediante el seguimiento de rutas con el uso de GPS, se encontró que las mujeres eran menos propensas que los hombres a la hora de elegir calles con un mayor nivel de tráfico, teniendo una clara preferencia por evitar dicho tráfico.

Ingresos. El nivel de ingresos se incluye en muchos estudios de movilidad, ya que pudiera parecer un condicionante directo del uso de un determinado modo de transporte. En la literatura revisada existen las dos vertientes: por una parte hay estudios que

explican la relación entre el uso de la bicicleta y los ingresos de la población¹⁰² y, por otra, estudios donde la variable ingresos no es representativa a la hora del uso de un modo de transporte u otro⁹⁷.

Disponibilidad de vehículo. Existe una relación inversamente proporcional entre la disponibilidad de coche y el uso de la bicicleta²¹, donde el uso de esta última es mayor en los hogares que poseen pocos o ningún coche. En cuanto a la disponibilidad de la propia bicicleta, hay autores que señalan la influencia que genera la posesión de la bicicleta respecto a su uso⁹⁹.

Tamaño del hogar. La elección del modo de transporte está muy correlacionada con el tamaño del hogar. La relación existente entre ambas variables es directa, como puede suceder en núcleos familiares con un número elevado de individuos en el que no todos los miembros pueden tener acceso a vehículos privados, por lo que la opción de transporte público y, en este caso la bicicleta, se conviertan en un modo de transporte para estos usuarios.

2.2.3. Factores que influyen en el uso de la bicicleta

La investigación y análisis de los factores que determinan el uso de la bicicleta se ha llevado a cabo por diferentes autores y estudios en los últimos años, generando una literatura extensa en este sentido. En los siguientes apartados se van a sintetizar algunos de los elementos claves que se deben tener en cuenta para fomentar el uso de la bicicleta, diseñar estrategias de cambio modal hacia la propia bicicleta y planificar una mejor infraestructura para su utilización.

Sirva de ejemplo el análisis realizado por Rondinella¹¹⁰, el cual recoge los resultados de un amplio estudio, a partir de la literatura internacional existente, sobre el uso de la bicicleta como uno de los modos de transporte en las ciudades y su inserción dentro de los sistemas de transportes urbanos e interurbanos. Este estudio proporciona un indicador de los factores a tener en cuenta a la hora de diseñar las actuaciones para contribuir al cambio modal hacia la bicicleta.

Se han realizado estudios que determinan los factores de uso de la bicicleta, a partir de la motivación o disuasión del usuario¹²¹. Los factores motivadores más destacados son la elección de rutas más alejadas del ruido y de la contaminación y las rutas con recorridos paisajísticos y separadas del tráfico. Por otro lado, los factores disuasorios a destacar serían: las calles o vías con un elevado índice de tráfico y velocidades altas, y los efectos climatológicos como el hielo o la nieve. En este estudio se destacan los factores que ejercen una mayor influencia en la imposibilidad de uso de la bicicleta como son la seguridad, las condiciones meteorológicas, las interacciones con los vehículos motorizados y las condiciones de las rutas. El Departamento de Salud Pública de San Francisco desarrolló su propio Índice de Calidad de Medio Ambiente de la bicicleta⁹², considerando 22 variables diferentes agrupadas en 5 categorías: diseño de intersecciones, diseño de calles, tráfico de vehículos, seguridad y uso del suelo. Las encuestas realizadas sirvieron para asignar a las distintas variables la importancia que le daban los usuarios. Se acentúa en ellas el valor de las infraestructuras para la bicicleta, que unido a los anteriores factores, delimitarán uno de los principales objetivos indicados en la elaboración de esta tesis como es la importancia que tiene la ubicación y el diseño de la infraestructura para bicicletas y como ésta sirve para fomentar el uso de la bicicleta como modo de transporte dentro del entramado urbano actual.

Los factores que resultan mas determinantes para el uso de la bicicleta como modo de transporte son el tiempo de viaje y el volumen del tráfico motorizado, ya que condicionan de manera directa la elección de ruta de sus usuarios. Otros factores que tienen una gran influencia son el número de señales de paradas, la semaforización a lo largo de la ruta, el número de intersecciones existentes, los límites de velocidad, las características de la vía pública y la existencia y continuidad de los propios carriles para bicicletas¹¹².

El factor de seguridad es otro de los más importantes para el la elección de uno u otro modo de transporte, de ahí la gran cantidad de estudios que lo incluyen. La apreciación de la seguridad y comodidad de los ciclistas se ven afectadas por factores como el volumen de tráfico y la proximidad entre las infraestructuras para las bicicletas y el propio tráfico de otros vehículos, protagonizando una disminución de la seguridad y comodidad del ciclista de manera directa al mayor flujo en el tráfico de vehículos¹¹⁶⁴.

Algunos métodos para predecir la comodidad, desde la perspectiva del ciclista, en base al nivel de protección de los carriles para bicicletas son tratados en Mekuria⁴⁴. Estos métodos son capaces de medir el nivel de estrés provocado por el tráfico y experimentado por los ciclistas en un ruta. Existe cuatro niveles, con puntuación de 1 a 4, asociados al tipo de ciclista: niños, la mayoría de adultos, corredores entusiasmados y confiados y corredores fuertes y valientes, correspondiente a cada uno de los niveles de estrés. Anteriormente, Sorton y Walsh¹¹³ evaluaron el nivel de estrés sufrido por los ciclistas, experimentados y ocasionales, basado en el ancho del carril, el volumen del tráfico y la velocidad de circulación adyacentes. Por tanto la seguridad está condicionada por la percepción de cada uno de los usuarios y, en los estudios elaborados por Harkey⁵⁶, se llega a la conclusión que los ciclistas más experimentados suelen sentirse más cómodo a la hora de circular en bicicleta que los ciclistas menos experimentados, teniendo por ello una calificación del confort mayor.

Conseguir medir la peligrosidad de la bicicleta es complicado, debido a su peligrosidad inherente y a la interacción con los demás medios de transporte. Por ello se han propuesto metodologías que evalúan los diferentes diseños de infraestructuras desde el punto de vista de la seguridad vial de los usuarios de la bicicleta^{85 1288}. Sirva de ejemplo la evaluación, a partir de la investigación de Tilahun¹¹⁶, sobre la preferencia en la elección de la ruta, con cinco tipologías de infraestructuras, frente al tiempo de viaje. Estos tipos de infraestructuras son: carril bici separado de la vía, carril bici en el lateral de la calzada (sin estar permitido el estacionamiento de vehículos), carril bici en el lateral de la calzada (con estacionamiento permitido de vehículos), sin carril bici y sin estacionamiento de vehículos permitido en el lateral de la calzada y sin carril bici y con estacionamiento permitido de vehículos en el lateral de la calzada. El resumen de este trabajo concluye con una preferencia de los usuarios de aumentar su tiempo de viaje en hasta 20 minutos para cambiar la elección del tipo de infraestructura, pasando del peor escenario (sin carril bici estando permitido el estacionamiento de vehículos en el lateral de la calzada) al mejor escenario posible (carril bici separado de la vía).

Existen diferentes estudios que demuestran la relación entre un mayor número de infraestructuras para la bicicleta con el número de ciclistas, es decir, que tras la implantación de carriles bici aumentará el número de ciclistas que usarán estas infraestructuras³⁴.

Esto se debe a la posibilidad de aumento de la percepción de seguridad de los ciclistas. Estos estudios pueden derivar en la influencia de los carriles bici en áreas suburbanas, analizando la relación entre el uso de la bici y la proximidad a una infraestructura. La configuración de la ciudad es un factor director sobre el uso de la bicicleta^{74 112 13 122}. La densidad demográfica, el nivel de accesibilidad y la distribución de la red ciclista tienen una relación evidente según los estudios de McCahil y Norman⁸³. Otro factor a tener en cuenta con el incremento de los carriles bici se debe a la variación de los parámetros de uso de la bicicleta¹¹⁰. En 2003, se crea el índice CRC (*Compatibility of Roads for Cyclist*)⁹⁰, basado en datos recogidos a 200 ciclistas que debían de calificar la ruta en la que viajaban para diferentes criterios de las características de la calzada y el tráfico.

En lo referente a los tipos de carriles para bicicletas, se hará uso del estudio de Sanz¹. Consta de un análisis de las publicaciones de los diferentes manuales de diseño y/o recomendaciones específicas realizadas en España para este tipo de infraestructuras, concluyendo con la existencia de 8 tipologías diferentes en función de sus características geométricas. Por tanto el modelo de red que debe proporcionar un planificador de tráfico se desarrolla sobre el entorno urbano definido por sus características geométricas y operativas.

Recientemente hay un aumento de usuarios de la bicicleta dada la preocupación existente por el medio ambiente y la salud, lo que ha hecho considerar a la bicicleta como parte importante del transporte urbano. Existen investigaciones que proponen diferentes modelos de planificación de redes ciclistas, y entre ellas destaca la de Tolley¹¹⁸, donde concluye que las redes destinadas para el uso de la bicicleta necesitan incluir cinco requisitos básicos: la seguridad, la consistencia, la inmediatez, la comodidad y la diversión. Estos estudios justifican la investigación llevada a cabo en esta tesis, ya que fomentan el papel estratégico del planificador a la hora de tomar las decisiones de planificación y actuación en cuanto a las infraestructuras para bicicletas, consiguiendo un mayor atractivo para los usuarios y, por lo tanto, aumentando la elección modal de éstos. Una correcta planificación de la red de carriles para bicicletas también puede disminuir el índice de siniestralidad de sus usuarios⁸⁴.

En concordancia con los estudios que afectan a la elección de ruta de los ciclistas

hay que destacar los llevados a cabo por Stinson y Bhat¹¹⁵. Diferencian entre factores a nivel de arco y a nivel de ruta. En lo relacionado con los factores a nivel de arco, se diferencian entre tipos de vía, si está permitido o no el estacionamiento, la tipología de infraestructura para la bicicleta, el tipo de pavimento, etc. Dentro de los factores que se refieren a nivel de ruta, destacan el tiempo de viaje y la continuidad de la infraestructura (se considera continua cuando, al menos, el 75% de la ruta no tiene interrupciones), el número de semáforos por recorrido, el número de cruces por recorrido, etc. Como resultado, consiguen modelos capaces de calcular las rutas de los usuarios de la bicicleta, facilitando la evaluación de la eficiencia sobre nuevas rutas o midiendo las ya existentes.

En el estudio presentado por Replogle¹⁰⁵ se analiza el efecto sobre los hábitos de los viajeros que modifica sus factores principales, como son las instalaciones o los programas para el fomento de bicicletas y peatones. También incluye otros factores que repercuten en el uso de los modos de transportes no motorizados. Debido a la evolución tecnológica de los últimos años, los planificadores del transporte han empezado a utilizar como herramienta de apoyo los navegadores GPS. Hay estudios como los realizados por Hochmair⁶⁴, donde se analiza el comportamiento de los ciclistas en la elección de las rutas elegidas. Pero debe considerarse que la funcionalidad facilitada por estos dispositivos (GPS) es limitada ya que no consideran diferentes características sobre las preferencias de selección de ruta de los diferentes usuarios, dejando como único criterio de elección la distancia. Concluye su estudio con la posibilidad de que cada usuario pueda representar las preferencias de uso y selección a partir de diferentes atributos. Las investigaciones llevadas a cabo por Gliebe y Paul⁵⁰ concluyen que, a partir de los datos recogidos con GPS de las rutas seguidas por 162 ciclistas durante varios días, éstos desarrollan un modelo logit respecto a la elección de rutas que tiene como resultado la planificación de un modelo de red ciclista.

En el año 2000, Hyodo y Tetsuro⁶⁷ presentan un modelo capaz de relacionar el comportamiento de los usuarios en la elección de la ruta de la bicicleta y las características de las propias infraestructuras, pudiéndose aplicar dicho modelo a la hora de planificar las redes para bicicletas. De otra forma, Sener y Eluru¹¹², realizan otro modelo basados en las preferencias de elección de ruta de los ciclistas y los rasgos que afectan a dicha elección. Este modelo tiene la peculiaridad de que se puede emplear, al igual que el

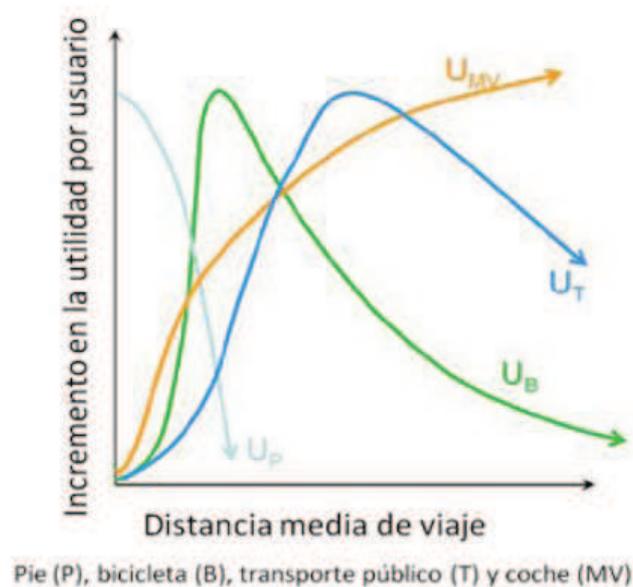


Figura 2.2: Relación entre distancia y utilidad usuarios

desarrollado por Hyodo y Tetsuro⁶⁷, para la mejora de la planificación de las rutas para bicicletas y, además, analizar la variación de la demanda producida por las diferentes alternativas posibles a aplicar en la red ciclista.

La distancia del viaje afecta de forma directa al uso de la bicicleta, y por ello Gliebe y Paul⁵⁰ exponen que los usuarios de la bicicleta están influenciados por la longitud total del trayecto que realizan. Como se explicó en el apartado "ventajas y beneficios del uso de la bicicleta" la bicicleta es un modo de transporte eficiente en determinadas distancias, pero su mayor aliciente aparece en recorridos con longitudes entre 1 y 15 kilómetros^{97 66}. En las distancias relativamente cortas la bicicleta no puede competir con los desplazamientos a pie, mientras que en los desplazamientos con distancias demasiado largas el uso de la bicicleta pierde eficacia. Aquí es importante destacar a la bicicleta como parte de la intermodalidad en el transporte, formando un elemento a tener en cuenta en estas conexiones¹⁰⁶.

Otro de los factores a señalar sería la pendiente y como influye ésta en un mayor porcentaje en aquellos casos de pendientes positivas a la velocidad y aceleración de los ciclistas, mientras que en pendientes negativas el efecto producido es mucho menor⁹⁵.

Se recomienda que en pendientes inferiores al 3% se tomen velocidades de 25km/h y en el caso de mayores pendientes se establezca una velocidad de hasta 35km/h . En el trabajo realizado por Romero¹⁰⁹, se ha realizado una calibración entre la velocidad de la bicicleta a flujo libre y la pendiente de los arcos, dividiendo finalmente a los usuarios de la bicicleta en cuatro categorías posibles.

El nivel de servicio (LOS: Level of Service) es el resultado de la suma de todos los factores que determinan el uso de la bicicleta. Un modo de clasificar los factores que afectan a estos niveles de satisfacción de los ciclistas se basa en el realizado por Dixon³⁶, donde define seis niveles diferentes de servicio. Estos niveles se establecen en base a las disputa entre modos, diferencias de velocidades entre cada uno de ellos, nivel de servicio de los vehículos motorizados y la capacidad de gestión de la demanda del transporte. A partir de la estimación del nivel de servicio se puede usar como un método para la planificación del transporte. Winters y Davidson¹²¹ llevan a cabo su investigación desarrollando un método de evaluación del nivel de servicio de los diferentes modos de transportes, mediante la correlación de los diferentes niveles de percepción de los usuarios de todos los modos de transportes. La percepción de los usuarios tendría como variables de actuación la seguridad y protección, el tiempo, el coste, la aceptación social y la comodidad o conveniencia.

Uno de los primeros intentos de medir el nivel de servicio percibido por los usuarios de la bicicleta en una carretera se llevó a cabo por Sorton y Walsh¹¹³. Basado en un método simple, tiene en cuenta la anchura del carril, el volumen de tráfico de la vía de circulación y la velocidad de los vehículos a motor. FHWA publicó, en 1998, *Bicycle Compatibility Index (BCI)*² donde se describe el nivel de servicio a partir de la encuesta realizada a diferentes usuarios sobre el volumen de vehículos a motor, la velocidad de esos vehículos y la anchura de la carretera disponible para los ciclistas⁵⁶.

Los factores más importantes que afectan a la calidad del servicio para peatones y ciclistas, según Guttenplan y Landis⁵⁴, serían la separación lateral de los peatone-

²FHWA Federal Highway Administration, perteneciente al U. S. Department of Transportation. Este organismo es el encargado de administrar la construcción, mantenimiento y conservación de carreteras, puentes y túneles de EEUU. También realiza investigaciones para la mejora de la seguridad, la movilidad y habitabilidad y fomento de la innovación.

s/ciclistas con los vehículos motorizados, el tráfico de dichos vehículos, la velocidad y el transporte público (frecuencia y tipo). En los trabajos realizados por Dowling y Petritsch³⁷, se expone un modelo para la evaluación de la calidad de servicio de los diferentes modos suministrados por una carretera urbana. El nivel de servicio está condicionado por los cruces transversales, las intersecciones y las características del tráfico.

Por otro lado, unos años antes, el propio Landis⁷⁹, analizó cuales son los factores principales que afectan al nivel del servicio para las bicicletas respecto a las intersecciones. En él se concluye que el volumen de tráfico, el ancho total del arcén de la vía y la distancia de cruce de la intersección afectan a este nivel de servicio. Jensen y Sørensen⁷¹ y⁷² aportan modelos sobre el nivel de satisfacción de los ciclistas, con la presencia y la anchura de los carriles bici como principales variables, donde el 45 % de los encuestados se declararon más seguros cuando circulan por carriles bici protegidos. En cambio, un 30 % declararon una mayor comodidad cuando circulan por carriles bici normales, y poco más del 10 % se decantaron por calles compartidas. Este estudio también recoge que el volumen de usuarios de bicicletas y ciclomotores (ya que también utilizan la infraestructura) aumenta en las calles donde existe los carriles bici protegidos.

En los estudios presentados por Sener¹¹² y Moudon⁸⁷ se obtienen conclusiones similares, explicando que la mayoría de los ciclistas usan la bicicleta por motivos recreacionales o deportivos. En caso de centrarse en las limitaciones que tienen los ciclistas para no usar este modo de transporte en su movilidad diaria, como sería deseable en los viajes relacionados con el trabajo, se encuentran la ropa para realizar el trayecto, el número de hora de trabajo, la disponibilidad de instalaciones adecuadas en el lugar de trabajo o la percepción individual de la imagen proyectada^{61 120}. En un estudio sobre transporte al trabajo en bicicleta realizado en Holanda⁶⁰ se demuestra que el tipo de ropa que se lleva no es importante, aunque en algunos trabajos el uso del traje sea necesario. En este sentido se han presentado estudios sobre la influencia positiva de las instalaciones, como taquillas para guardar la ropa, duchas o baños, que favorecen un mayor uso de la bicicleta para dirigirse al trabajo¹¹².

2.2.4. Infraestructura para la bicicleta

A pesar del rápido crecimiento de las investigaciones centradas en el modo de la bicicleta dentro de la planificación del transporte, sorprende la falta de metodologías que ayuden a decidir y seleccionar las ubicaciones para las diferentes inversiones en infraestructuras para la bicicleta.

Todos los esfuerzos de las políticas de planificación del transporte tienen como objetivo el aumento del número de usuarios de la bicicleta, pero existe una corriente de investigación discrepante sobre los beneficios y costes desde la perspectiva de inversión pública. En las investigaciones de Krizek y El-Geneidy⁷⁷, se realiza una evaluación de los beneficios económicos de este tipo de instalaciones y sugiere estrategias capaces de evaluar los beneficios económicos futuros. Hopkinson y Wardman⁶⁵ exponen unos resultados que demuestran que los usuarios valoran más la seguridad que el tiempo, a la hora de usar la bicicleta como medio de transporte, concluyendo que la planificación de este tipo de infraestructuras debe tener como variable principal la seguridad. Por el contrario, Ortuzar e Iacobelli²¹, mediante su estudio de la bicicleta como modo de transporte en la ciudad de Santiago de Chile, demuestran que el tiempo de viaje es una variable fundamental a tener en cuenta en las políticas de uso y planificación.

El problema del cambio del reparto modal, hacia modos de transportes más sostenibles, se debe a la falta de infraestructuras específicas para bicicletas. Una demostración de la influencia que ocasiona los carriles bici en la elección de uso de las personas se demuestra en los trabajos presentados por Nelson y Allen⁸⁹, dónde se realizan estudios aplicados en diferentes ciudades de Estados Unidos, proporcionando base científica a la relación entre el número de carriles bici y el de usuarios. Cervero y Sarmiento¹⁵ prueban que la presencia de los carriles para bicicletas son capaces de dirigir a los ciclistas por determinadas rutas. Un estudio realizado en la región de Twin Cities³, donde hay evidencias del aumento del 51 % en la longitud total del viaje si éste se realiza por un carril bici de alta calidad y seguro⁷⁶. La relación directa entre la existencia de carriles bici y el aumento de los usuarios tiene resultados contrapuestos, como lo

³Estudio realizado en el año 2007, en la región de Twin Cities, área metropolitana formada por Minneapolis, con 11 condados, y Saint Paul, con 2 condados, en Estados Unidos

reflejan los trabajos realizados por Aultman y Hall⁵, dónde se estudia si la presencia de infraestructuras para la bicicleta no condiciona el aumento de usuarios. En los estudios de Petritsch y Landis⁹⁸, se define un modelo de entorno urbano aplicado a los usuarios de la bicicleta y se establece como influyen las características geométricas y operativas de la red para satisfacer las necesidades de la movilidad sostenible.

La instalación de infraestructuras para bicicletas por sí solas no es una garantía de éxito para atraer a nuevos ciclistas, tal y como anuncian Noland y Deka⁹¹. El estudio diseñado por Handy⁵⁵ explora las relaciones que existen entre los desplazamientos de bicicletas, las infraestructuras para bicicletas, las características socioeconómicas y las actitudes personales y sociales de los usuarios. De hecho, una de las barreras que dificultan el aumento de usuarios de la bicicleta como modo de transporte sostenible es la falta de una infraestructura adecuada y atractiva para las personas⁹⁶. Por otro lado, son beneficiosas las medidas que aumenten la utilidad y el atractivo del uso de la bicicleta como modo de transporte. En este punto, algunas de las medidas que han tenido mayor repercusión entre los usuarios han sido las campañas de promoción de la cultura ciclista, favoreciendo las ventajas y beneficios de las misma, y los cursos de educación ciclista y de formación para conductores¹⁰¹.

Una parte de la literatura del transporte centra sus esfuerzos en los problemas relacionados con las infraestructuras para la bicicleta y la seguridad de los usuarios. Existe diferentes versiones que discrepan sobre la implantación de este tipo de infraestructuras. Por un lado, hay argumentos que defienden la posibilidad de circular libremente entre tráfico mixto, ya que así se ayuda a minimizar el número de usuarios de los vehículos a motor, fomentando el transporte sostenible⁴³. Por otro, existe la convicción de la gran influencia que tiene la percepción del peligro sobre la disposición a usar la bicicleta, y por ello una correcta infraestructura de carriles bici ayuda a acrecentar la sensación de seguridad en los usuarios⁴⁷. Los resultados de la investigación llevada a cabo por Lusk⁸¹, sugieren que los usuarios tienen una mayor sensación de seguridad en instalaciones con carriles para bicicletas segregados que cuando circulan en vías con tráfico mixto.

Tras la revisión de los resultados existentes sobre el transporte en bicicleta, se hace patente la ausencia de investigaciones capaces de planificar, diseñar y localizar

adecuadamente las infraestructuras para carriles bici en centros urbanos. De ahí se deriva la importancia que tiene la realización de esta tesis y los resultados finales obtenidos.

3

Optimización de recorridos

3.1. Modelos de red

El objetivo de todo modelo es representar el diseño de una nueva red de transporte o modificar las capacidades sobre vías ya existentes. La red viene definida a través de un conjunto de arcos que representan nuevas vías o nuevos servicios de transporte, y determinan los costes (en términos de tiempo de viaje en vehículo ó a bordo del autobús) tanto para los usuarios como para los diferentes operadores del transporte público.

3.1.1. Red

Los trazados de todos los recorridos determinan unívocamente la red, quedando por tanto caracterizada por los elementos que la componen. Cada uno de los recorridos está representado con un grafo $G = (N, A)$, donde N es el conjunto de nodos y A es el conjunto de arcos que conectan los diferentes pares de nodos. La transformación del modelo real para desarrollar la idealización de los elementos de la red, nodos y arcos, puede efectuarse bajo diferentes premisas. Los vertices o nodos del conjunto N pueden representar por ello distintas entidades de la realidad como pueden ser:

- Intersección de calles: Cuando se trata de un modelo detallado de red vial.
- Paradas: Cuando se estudian desde el punto de vista del transporte público pertenecen al conjunto de paradas posibles, y cuando se hace desde la perspectiva del transporte en bicicleta se puede entender como las bancadas o lugares destinados al estacionamiento de las bicicletas.
- Centroides: Nodos especiales, generalmente coincidentes con el baricentro de la zona, que no se corresponden con las intersecciones de las calles. Son puntos de distribución de la demanda de viajes (salidas y llegadas).

Los arcos pertenecientes al conjunto A , a su vez, pueden representar diferentes entidades de la realidad, aunque principalmente actúan como sección de una calle de la red vial, realizando la función de conexión entre dos nodos o una posible conexión entre centroides de zonas adyacentes.



Figura 3.1: Modelo de Red Vial de Málaga

Los diferentes modelos de red están condicionados con la tipología y nivel de agregación de los datos que la forman, restringiendo el tamaño de los modelos. Se exponen como modelos de red los siguientes:

Modelo detallado : Está compuesto por un subconjunto de calles de la zona de estudio, seleccionado especialmente para los modos de transportes analizados por dicho modelo. Se toma como referencia los trabajos de Fan y Randy⁴¹, dónde los nodos representan las intersecciones de las calles (nodos de intersección), y los arcos representan cada tramo que une dos de dichos nodos. Se realiza una división zonal, donde cada una de las zonas tiene como referencia un centroide, considerado punto de producción y atracción de la demanda de viajes. Estos centroides zonales usan los nodos de distribución para comunicarse con la red, y los arcos de distribución como modo de enlace.

Modelo no detallado : Considera un nodo para cada centroide zonal, y un arco como enlace entre dos de dichos nodos. El tiempo de acceso para este modelo no existe,

por tanto los arcos y nodos no tienen una correspondencia geográfica real⁶.

3.1.2. Demanda

Modelar la demanda de los viajes de una región de estudio requiere la división en zonas de la misma. Una matriz origen-destino ($D = d_{ij}$) es la encargada de caracterizar la demanda de los viajes en consonancia con la zonificación establecida. Cada una de las entradas d_{ij} indica la demanda de viajes interzonales producidos, desde la zona inicial i hasta la zona de destino j . La relación existente entre el nivel de detalle de la red y su relación con los elementos de la matriz origen-destino, puede encontrarse en los *Modelos de demanda del transporte*²⁰.

3.2. Búsqueda del camino óptimo

Uno de los propósitos de esta sección es definir el problema a resolver en esta investigación, llamado *Problema de Búsqueda de Camino Óptimo* (PCO), o en inglés path-finding problem. Se parte de una red, como la detallada anteriormente, en la que están definidos los distintos nodos y en la que es posible trazar rutas entre ellos a través de los arcos. Dicha ruta tendrá en uno de sus puntos, llamado *origen*, el inicio del recorrido y deberá llegar hasta otro punto, conocido como *destino*, discurriendo por diferentes puntos interconectados. El problema de camino óptimo más común tiene una única función objetivo a satisfacer, que es minimizar la distancia a recorrer entre los dos puntos. Por tanto ese camino óptimo será el que minimice la suma de los valores asociados a cada uno de los tramos (o arcos) que forman la ruta recorrida pasando por diferentes puntos intermedios (o nodos), desde el punto origen hacia el punto destino¹⁷.

Las restricciones también están presentes en este tipo de problemas, por ejemplo, a la hora de buscar un camino mínimo cuyo recorrido esté obligado por determinados puntos o, también, que dicho camino no pueda atravesar ciertos nodos. Estas restricciones marcarán la naturaleza del problema, limitando sus posibles soluciones. En la bibliografía revisada, solo se hace referencia al camino mínimo, sin prestar demasiada atención a los problemas de camino óptimo. Una de las características que diferencian ambos problemas es la consideración de maximizar algún otro criterio, en el caso de los

caminos óptimos.

La resolución de este tipo de problemas se desarrolla habitualmente en entornos modelados por la teoría de grafos. El grafo contará con un número finitos de nodos, pudiendo ser dirigido o no, y en él cada uno de los nodos estará unido como mínimo a otro mediante un arco. El planteamiento del problema sería por tanto que, establecido un grafo a partir de sus dos nodos principales (origen y destino), hay que hallar la serie de nodos, o en su caso arcos, que van desde el origen hasta el destino con el mínimo coste posible, teniendo en cuenta unas restricciones predeterminadas.

Dos de los ejemplos más conocidos de este tipo de problema son los llamados *Problema del viajante de comercio* y *Problema del enrutamiento de vehículos*. El primero de ellos es un problema de camino mínimo llamado en inglés *travelling salesman problem*. Se basa en la búsqueda de la mejor ruta que debe seguir un comerciante para recorrer un conjunto de ciudades, pasando por todas ellas, teniendo como origen y destino el mismo punto. La solución dada es la mínima distancia total recorrida, obtenida a partir de la suma de las distancias que separan a cada una de las ciudades. El segundo tipo de problema forma parte de los problemas de caminos óptimos, o en inglés *vehicle routing problem (VRP)*, que tienen como finalidad minimizar tanto el coste de la ruta recorrida como el número de rutas alternativas de unión entre el nodo origen y el resto de los nodos¹⁰³.

Cabe mencionar un tercer tipo de problema llamado *Camino mínimo (shortest path)*. Su objetivo es la búsqueda de la mejor ruta entre dos puntos, a partir de las diferentes restricciones existentes en su grafo base. Este tipo de problemas tiene un uso generalizado en aplicaciones como callejeros y mapas interactivos o el empleo de empresas de transportes para el cálculo de la ruta mínima.

3.2.1. Búsqueda del camino óptimo multiobjetivo

Cuando existen diferentes criterios, los problemas de caminos óptimos deben cumplir cada uno de ellos para que la ruta calculada sea considerada como óptima, y en estos casos dichos problemas son denominados multiobjetivo. La resolución para este tipo de

problemas implica que cada uno de los arcos del grafo formado tiene asociado diferentes valores según cada uno de los objetivos a optimizar, y cada una de las soluciones de camino mínimo propuesta como solución del grafo tendrá asociado un coste por cada uno de los objetivos.

Por tanto no existe una solución única para el problema de camino óptimo multiobjetivo, sino que dispondrá de un conjunto de soluciones subóptimas, ya que habrá ciertos objetivos mejor aproximados que otros. En los problemas anteriormente expuestos, como son el problema del viajante de comercio y el problema de enrutamiento de vehículos, también se aplica los criterios multiobjetivos para el empleo del cálculo de rutas óptimas y mínimas.

3.2.2. Principales algoritmos para Problemas del camino óptimo

A continuación se enumera algunos de los algoritmos existentes, en la literatura sobre teoría de grafos, para la resolución de problemas de cálculo de caminos óptimos. Los tres primeros métodos, *Floyd-Warshall*⁴², *Bellman-Ford*⁹ y *Dijkstra*³², son considerados deterministas mientras que, como método de resolución más actual, se considera el *Algoritmo A**⁵⁹.

- **Algoritmo de Floyd-Warshall:** desarrollado por Bernard Roy en el año 1959. Es un algoritmo diseñado para la búsqueda del camino mínimo sobre grafos dirigidos ponderados. Siendo un ejemplo de programación dinámica, realiza una búsqueda entre todos los pares de vértices en una única ejecución.
- **Algoritmo de Bellman-Ford:** publicado por Richard Bellman en 1958. Este algoritmo calcula el camino mínimo desde un nodo origen al resto de nodos pertenecientes al grafo. El peso de los arcos puede ser negativo en algunos casos e incluso puede existir ciclos con coste negativo.
- **Algoritmo de Dijkstra:** en “A note on two problems in connexion with graphs” escrito en 1959, se explica el trabajo realizado por Edsger W. Dijkstra, cuyo algoritmo calcula el camino mínimo desde un nodo origen a todos los demás. A diferencia

del algoritmo de Bellman-Ford, es necesario que los pesos asociados a cada uno de los nodos sean positivos.

- **Algoritmo A^* :** (1968) a diferencia de los algoritmos existentes hasta la fecha, la metodología de este algoritmo se basa en explorar todos los nodos vecinos, considerando no solo el mejor nodo posible (modelos voraces), con la finalidad de obtener la mejor ruta entre un nodo origen y un nodo destino.

En los últimos años, las investigaciones relacionadas con los problemas de caminos óptimos están evolucionando rápidamente. Los problemas tipo se están adaptando a las necesidades actuales, como se presentan en los estudios de Bradley y Stewart¹¹⁴, con una adaptación del algoritmo A^* multiobjetivo. También puede observarse esta adaptación en las investigaciones de Wakuta¹¹⁹ y Raith¹⁰⁴, donde se exponen diferentes aplicaciones del problema de camino mínimo multiobjetivo y se presenta una extensión del algoritmo de Dijkstra para el cálculo de la ruta mínima⁸⁰.

3.3. Optimización: Función objetivo y restricciones

Desde el punto de vista científico, la optimización se define como la selección de la mejor solución posible a un problema dado. En un problema de optimización existe una búsqueda previa de distintas soluciones, un criterio para diferenciarlas, y un objetivo final que es encontrar la mejor. El planteamiento teórico consiste en la búsqueda de cómo estructurar un conjunto de variables de estudio para lograr ciertos objetivos. Los problemas se clasifican de forma natural en dos categorías: en los primeros las soluciones están codificadas mediante variables que tienen valores reales y ,en los segundos, las variables poseen valores discretos. Respecto a estos últimos se pueden encontrar una clase de problemas llamados *Problemas de Optimización Combinatoria*, los cuales serán desarrollados en los siguientes apartados.

La resolución matemática de la mayoría de los problemas de optimización es la minimización (o maximización) de alguna función objetivo de valores escalares, con respecto a un vector de parámetros ajustables. El algoritmo de optimización es un procedimiento recursivo para cambiar los parámetros ajustables desde una suposición inicial (o conjunto de suposiciones) hacia un valor final que ofrece una mejora en la

función objetivo.

Un problema de optimización viene definido por tres elementos fundamentales: las *variables del problema*, utilizadas para construir el conjunto de decisiones, la *función objetivo* que evalúa el coste o beneficio de cada decisión y el *conjunto de soluciones* que determina la validez de las decisiones tomadas. Más formalmente, dentro de un conjunto factible de soluciones C , esto puede ser expresado como:

$$\begin{aligned} & \min/\max f(x) \\ & \text{sujeto a } \quad x \in C \end{aligned}$$

La formulación descrita es demasiado genérica para que su estudio conduzca a métodos satisfactorios de resolución, ya que C representa un conjunto cualquiera y por tanto esta descripción también recoge la situación donde C es un espacio de dimensión infinita, como puede ser en el caso de un espacio de funciones.

El modelo de optimización requiere la representación de los intereses de los usuarios. En el caso de los usuarios de transporte público, el objetivo de cada uno de ellos es realizar su viaje desde una zona origen a una zona destino de la forma más rápida, cómoda, segura y económica posible. El tiempo de viaje, principal objetivo a optimizar, tiene tanto una componente de tiempo de espera en la parada como otra de viaje en el vehículo. Una solución óptima lograría que cada uno de los usuarios viajase por su camino más corto dentro de una red G , es decir, que para todo par (i, j) de nodos con demanda d_{ij} existente, hay un recorrido que incluye al camino más corto entre i y j en la red G . La existencia de estos actores o usuarios con diferentes objetivos, para cada uno de los casos, conlleva que en el propio modelado del problema del diseño óptimo de recorridos se encuentren diferentes funciones objetivos para cada uno de los respectivos usuarios.

3.3.1. Optimización multiobjetivo

En el mundo real existe una variedad de problemas cuyas soluciones tienen diferentes componentes que entran en conflicto, por lo que a veces la mejora de una de ellas implica

el deterioro en alguna de las otras. En este tipo de problemas es difícil lograr la mejor solución, ya que es posible que la optimización de unos objetivos influya negativamente en otros y, por ello a menudo la última decisión queda en manos del criterio de su diseñador. Para concretar qué es un Problema MultiObjetivo, *Multi-Objective Problem*, se utiliza la definición propuesta por Osyczka⁹³:

”Es la búsqueda de un vector de variables de decisión que satisface un conjunto de restricciones y optimiza un vector función, cuyos elementos representan las funciones objetivo. Estas funciones forman una descripción matemática de los criterios de rendimiento de un sistema determinado, que normalmente están en conflicto entre si. Así, el término optimizar significa encontrar una solución que dé a cada función objetivo un valor aceptable para el diseñador”

En un problema de optimización de objetivo único, la finalidad es encontrar una solución óptima de la función objetivo $f(x)$. Exceptuando los casos donde la función objetivo es multimodal en el dominio de soluciones factibles, existe una única solución al problema. Por otro lado un problema de optimización multiobjetivo está formado por varias funciones objetivo que moderan diferentes intereses en conflicto. Se puede expresar de la siguiente manera:

$$\min/\max F(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots, f_n(x))$$

$$\text{sujeto a } x \in C$$

donde el conjunto que define las soluciones factibles viene dado por C , siendo f_i , con $i \in [1..N]$, cada una de las distintas funciones objetivo a minimizar o maximizar según el criterio elegido³⁰.

La optimización multiobjetivo tiene como finalidad hallar una solución que satisfaga todos los objetivos de manera simultánea. Existen casos donde dichos objetivos pueden entrar en conflicto, por ejemplo cuando el resultado que maximiza un objetivos provoca el perjuicio de otros, y en estos casos solo será posible hallar ”buenas” soluciones con diferentes grados de compromiso. El conjunto de estas ”soluciones de compromiso” debe ser tal que no puede existir una solución que mejore a otra en un objetivo sin empeorar a alguno de los restantes. Por tanto aquellas soluciones que sean peores que otras

en alguno de los objetivos, aunque sean capaces de mejorar en otros, no son buenas soluciones de compromiso.

En la práctica, a la hora de realizar una optimización multiobjetivo suele ser necesario tomar decisiones que impliquen seleccionar una única solución con un cierto nivel de compromiso. Tal y como se distingue en los estudios realizados por Deb y Kalyanmoy³⁰, en la selección de dicha solución se distinguen diferentes metodologías:

- **Preferencias de optimización multiobjetivo.** Consta de un procedimiento basado en las preferencias de optimización, donde se determina la importancia relativa de los diferentes objetivos, a partir de un vector de pesos $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_N)$. Una vez establecidos los pesos, se resuelve el problema de optimización objetivo único, cuya función es $\lambda_1 f_1, \dots, \lambda_N f_N$
- **Procedimiento ideal de optimización multiobjetivo.** Consta de dos fases. En la primera se localizan todas las soluciones factibles con diferentes niveles de compromiso, tales que no existe ninguna que comparada con otra empeore en todos los objetivos simultáneamente. En la segunda fase, se elige una solución con un determinado nivel de compromiso.

En ambas metodologías existe un papel principal de uno de los actores que debe aportar la información adicional. Y esto ocurre tanto para la estimación de los valores del vector de pesos, como para la toma de decisiones respecto a la elección entre soluciones con diferentes niveles de compromiso. Deb y Kalyanmoy³⁰ concluyen que el procedimiento ideal es el más apropiado para la resolución de modelos de optimización multiobjetivo, por las razones siguientes:

- En la primera metodología descrita, el procedimiento basado en preferencias, el resultado está muy condicionado por el vector de pesos utilizado para formar la función objetivo compuesto. Un simple cambio en dicho vector, puede tener como resultado una solución de compromiso diferente.
- La labor de encontrar a priori un vector de pesos capaz de reflejar las preferencias de los distintos objetivos es altamente subjetiva y no inmediata.

- En el procedimiento ideal, segundo de los métodos descrito, se produce la elección de una solución a partir del conjunto de soluciones de compromiso hallado, de la que se dispone de información previa del problema. Mientras, en el procedimiento basado en preferencias, un vector de pesos debe ser provisto a priori, sin conocimiento alguno de los posibles resultados.

Definiciones

Un modelo de optimización multiobjetivo está formado por N funciones objetivo que se pretenden optimizar de forma simultánea. De modo general, se utiliza el operador de comparación genérico \triangleleft entre los valores que corresponden a una misma función objetivo f_i , que sería $<$ para los casos de minimización, o $>$ en casos de maximización. Se dice que una solución $x_1 \in C$ domina a otra solución $x_2 \in C$ ($x_1 \preceq x_2$ por notación) si se cumplen las condiciones siguientes:

1. x_1 no es peor que x_2 en todos los objetivos, es decir $f_j(x_1) \triangleright f_j(x_2)$ para todo $j \in [1, \dots, N]$.
2. x_1 es exactamente mejor que x_2 en al menos un objetivo, es decir $\exists j \in [1, \dots, N]$ tal que $f_j(x_1) \triangleleft f_j(x_2)$.

El cumplimiento de estas dos condiciones determina que x_2 está dominada por x_1 , y x_1 no está dominada por x_2 . La relación de dominancia es asimétrica, es decir, si p domina a q , entonces q no domina a p , y transitiva, es decir, si p domina a q y q domina a r , entonces p domina a r , respectivamente.

Dado un conjunto de soluciones $P \subset C$, se define el subconjunto no dominado P' de P al formado por aquellas soluciones pertenecientes a P que no son dominadas por ninguna otra solución de P . Cuando $P = C$, siendo C el total del espacio de soluciones factibles, el subconjunto P' de soluciones no dominadas de C , es decir, tales que no existen otras que mejoren los objetivos simultáneamente, se denomina *óptimo de Pareto* o *frente de Pareto*. La resolución de un modelo de optimización multiobjetivo implica hallar el conjunto óptimo de Pareto. En el trabajo de Amora⁴⁵ se facilita un ejemplo de la representación gráfica de varias funciones objetivos de vectores que representan el llamado *frente de Pareto*,

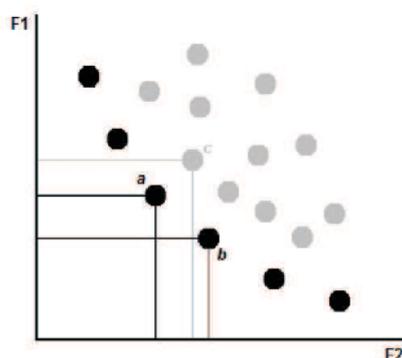


Figura 3.2: Esquema de frente de Pareto

El ejemplo de frente de Pareto expuesto en el esquema está compuesto por un problema con dos funciones objetivo, $F1$ y $F2$. En la gráfica vienen representado dos tipos de puntos, unos de color negro que representan las soluciones del frente de Pareto de las dos funciones objetivo del problema, y unos puntos grises que simbolizan las soluciones dominadas del problema. Como se puede ver en el ejemplo, las soluciones del frente de Pareto no son dominadas, y son los casos a y b (puntos en negro). Por otro lado, se encuentra el punto c , en gris, que pertenece a una de las soluciones dominadas. Comúnmente, a la hora de solucionar estos problemas, se tiene como objetivo localizar tantas soluciones del frente de Pareto como sea posible, dado que todas y cada una de ellas serán válidas y “óptimas”.

La toma de decisiones multicriterio según Kaliszewski⁷³, se define como la búsqueda del problema de seleccionar una solución de compromiso entre cada uno de los diferentes objetivos en conflicto en base a los criterios del responsable de la toma de decisiones. Una definición de la propiedad de eficiencia de una solución, para un problema de optimización multiobjetivo, se encuentra en Ehrgott³⁹, dónde se hace referencia a comparaciones con espacio C de soluciones factibles, o en el espacio \mathbb{R}_M de las funciones objetivo.

Optimización combinatoria multiobjetivo

En el marco de optimización combinatoria, aquellos problemas cuyas soluciones estén representadas mediante variables discretas se denominarán *Problemas de optimización combinatoria*. La finalidad de este tipo de problemas es la búsqueda de un objeto

dentro de un conjunto finito o infinitamente contable, donde dicho objeto puede ser un número entero, un subconjunto de ellos, una permutación o una estructura de grafo⁹⁴.

Los problemas de optimización combinatoria están presentes en diversos campos de la ciencia, especialmente en el campo de la teoría de la computación, debido a que muchos de estos problemas pertenece a la clase de los *NP*. Las técnicas existentes para este tipo de problemas se pueden clasificar, básicamente, en dos: algoritmos exactos y algoritmos aproximados. El objetivos de los algoritmos del primer grupo (exactos) es la búsqueda de una solución óptima, demostrando que dicha solución es de hecho la óptima global^{11,94}. Algunos ejemplo de este tipo de algoritmos son: back-tracking (proceso de vuelta atrás), brach and bound (ramificación y acotación), programación dinámica, etc.

La evolución de los algoritmos aproximados se debe al bajo rendimiento para la resolución de muchos de los problemas por parte de los algoritmos exactos. Los algoritmos aproximados proporcionan resultados de alta calidad con unos tiempo de ejecución relativamente razonables. Estos tipos de algoritmos se pueden dividir en dos, constructivos y de búsqueda local. Los primeros están basados en generar soluciones desde cero, incorporando componentes a cada solución paso a paso. Este tipo de algoritmos se conocen como voraces y algunos ejemplos son los algoritmos de Kruskal⁷⁸, de Prim¹⁰⁰ y de Dijkstra¹¹. Tienen una elevada velocidad de ejecución pero no son capaces de garantizar soluciones óptimas con respecto a cambios a nivel local.

Para dar estas garantías existen los segundos algoritmos, denominados de búsqueda local. Estos algoritmos intentan mejorar la solución actual con soluciones cercanas, a dicha solución, en base a algún criterio. Se destaca en este sentido los algoritmos de mejora iterativa, basados en que: si en la cercanía de la solución actual s se encuentra una mejor solución s' , la solución actual es reemplazada por la nueva solución y el proceso de búsqueda continúa a partir de s' ; pero si en el proceso de búsqueda no se encuentra una solución mejor, el algoritmo tiene como resultado un óptimo local. Las soluciones de óptimos locales pueden no ser de calidad cuando los resultados están muy alejados del óptimo global y por ello las investigaciones actuales se centran en la mejora adicional en la calidad de la construcción de soluciones.

Según Ehrgott³⁸, el problema de optimización combinatoria multiobjetivo está restringido al caso de función objetivo y restricciones lineales. Para este tipo de problemas, es conocido un resultado que establece la existencia de soluciones pertenecientes al frente óptimo de Pareto, que no se obtienen mediante la resolución del siguiente problema de optimización de objetivo único:

$$\min/\max \lambda_1 f_1(x) + \dots + \lambda_N f_N(x)$$

$$\text{sujeto a } x \in C$$

para ningún vector de pesos positivos λ .

Tales soluciones se denominan *soluciones eficientes no soportadas*, y constituyen el conjunto $X_{N,E}$. Las soluciones tales que es posible hallarlas mediante una combinación particular de pesos λ se denominan *soluciones eficientes soportadas*, y constituyen el conjunto X_{SE} . La existencia de ambas soluciones se extiende para problemas con funciones objetivos y/o restricciones no lineales. Desde una perspectiva teórica, la localización de las diferentes soluciones eficientes, para los problemas de optimización combinatoria multiobjetivo, se considera el mayor reto. Para un gran número de estos problemas, encontrar el conjunto X_E , requiere un procedimiento de tipo *NP*, siendo cierto incluso en los procesos donde coexiste un método eficiente para los problemas relacionados de objetivo único³⁸.

Métodos aproximados para optimización combinatoria multiobjetivo

Los métodos o algoritmos aproximados para la optimización combinatoria multiobjetivo alcanzan sus resultados mediante un conjunto de soluciones no dominadas, que no necesariamente forman el *frente de Pareto aproximado*. Estos métodos, al igual que en los casos de objetivo único, son conocidos como heurísticos³⁹.

La resolución exacta de un caso multiobjetivo encuentra todas las soluciones eficientes, que pueden ser no soportadas (siendo una solución heurística en un sentido estricto), o es capaz de hallar algunas soluciones eficientes no soportadas. La resolución aproximada de problemas de optimización combinatoria multiobjetivo, empleando la heurística,

puede darse de dos formas:

1. Un primer método se basa en el empleo similar al de la optimización de objetivo único, es decir, resolviendo los problemas mediante diferentes transformaciones del problema original. Existen diferentes métodos (suma ponderada, método de Benson, etc.) que son utilizados en aplicaciones reales de optimización multiobjetivo, y resuelven el problema de forma exacta. Estos métodos poseen algunas desventajas en cuanto a sus aplicaciones, ya que solamente son capaces de satisfacer una solución no dominada como resolución del problema, no siendo capaces de hallar todas las soluciones del frente de Pareto óptimo. Requieren un conocimiento previo del problema, como por ejemplo la determinación de los valores de los pesos o restricciones.

2. La otra manera de utilizar la heurística para la resolución de problemas de optimización combinatoria multiobjetivo consiste en tratar los diferentes objetivos de forma simultánea. Esta aplicación específica de la heurística para optimización multiobjetivo se centran actualmente en las metaheurísticas. A partir de los estudios presentados por Glover y Fred⁵², se introdujo el término *metaheurística*, derivado de la composición de las palabras griegas *meta*, que significa "más allá de, en un nivel superior", y *heurística*, que significa "encontrar, descubrir". La metaheurística contiene diferentes estrategias de alto nivel para analizar espacios de exploración usando diferentes métodos, y engloba conceptos de muchos y diversos campos como la biología, las matemáticas, la física, la inteligencia artificial, etc. Una clasificación de los ejemplos de metaheurística podría ser³⁹:
 - Algoritmos evolutivos^{6,70}.
 - Recorrido simulado⁸².
 - Búsqueda tabú⁶².
 - Optimización de colonia de hormigas^{39,41}.
 - Otros (Redes neuronales artificiales, GRASP y Búsqueda dispersa).

Métricas de performance

En un problema de optimización multiobjetivo, al contrario de lo que ocurre en un problema de objetivo único (donde un método aproximado busca hallar una solución lo más cercana posible a la óptima), el resultado está formado por un conjunto de soluciones óptimas no dominadas, que constituyen un frente de Pareto aproximado. Dicho frente de Pareto, debe cumplir dos características³⁰:

1. *Cercanía* respecto al frente óptimo. En todos los métodos de resolución de modelos de optimización esto es un objetivo primordial. En el caso de un problema multiobjetivo, consiste en la resolución de varias soluciones no dominadas que deben de estar lo más cerca posible del frente de Pareto óptimo.
2. *Diversidad*. Los procesos de resolución del modelo multiobjetivo no cuentan con información que permita valorar las distintas funciones objetivo, por lo que se necesita la mayor cantidad posible de soluciones no dominadas, repartidas en un amplio rango a lo largo del frente de Pareto.

Jaszkiewicz⁷⁰, en su trabajo desarrollado durante el año 2001, realiza una clasificación de la calidad de los frentes de Pareto, desde el punto de vista *cardinal*, donde cuenta la cantidad de soluciones que cumplen los requisitos. El estudio *geométrico*, analiza y estudia las posiciones y distancias de las diferentes soluciones en el espacio de las funciones objetivos. Por otra parte Ehrgott³⁹ establece que no existe dentro de la literatura de optimización multiobjetivo unas métricas aceptadas, presentando además, unas directrices sobre las nociones de cotas y radios para este tipo de optimización. Finalmente, Deb³⁰ realiza una clasificación de las métricas caracterizándolas por la cercanía, diversidad, o ambas propiedades simultáneamente, sobre un frente de Pareto aproximado P .

4

Tratamiento de datos

4.1. Introducción

En este capítulo se va a presentar la metodología seguida para el tratamiento y realización de las diferentes bases de datos relacionadas con la distribución urbanística, usos del suelo y movilidad dentro del municipio de Málaga.

Estos procedimientos se inician con la recapitulación de la información pertinente sobre la distribución de la población dentro del municipio, prestando especial atención a las diferentes características socio-económicas de la población. A partir de ahí se examina la movilidad de dicha población, para conocer y analizar sus hábitos de conducta, a la hora de efectuar o planificar los desplazamientos diarios realizados dentro del municipio de Málaga. También se describe la metodología empleada en la elaboración de la infraestructura de la red vial del municipio, que será la base de aplicación de la futura optimización de la red de carriles para la bicicleta en Málaga.

4.2. Zonificación del municipio de Málaga

Según el Instituto de Estadística de Andalucía la población de Málaga era de 568.479¹ habitantes a comienzos del 2013, situándose como la sexta ciudad en población de toda España y la segunda de Andalucía.

El crecimiento demográfico municipal ha mantenido una línea ascendente desde los años 60, cuando se contabilizaban algo más de 300.000 habitantes, con un aumento de la población que supera el umbral de los 500.000 habitantes en la década de los ochenta. El crecimiento poblacional puede considerarse como explosivo hasta los años ochenta, originando sobre la estructura física de la ciudad un impacto significativo, desde el punto de vista demográfico y social.

La distribución de la población, existente en tal fecha, es heterogénea en el término municipal de Málaga, debido a su considerable extensión y la gran dispersión territorial de su entramado urbano. La mayor parte está concentrada en los barrios que

¹Datos procedentes de estadísticas del padrón municipal y de las variaciones intercensales del INEbase (Instituto Nacional de Estadística).

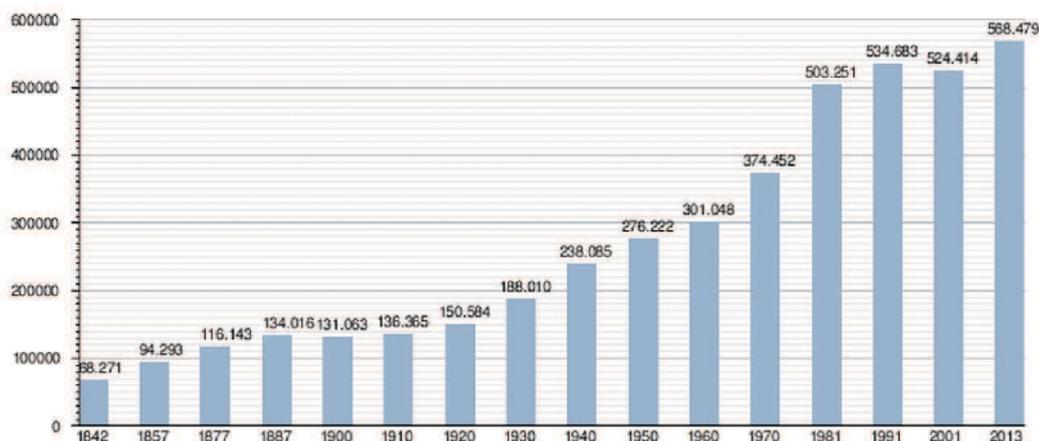


Figura 4.1: Evolución población Málaga

constituyen el frente litoral de la ciudad, sobre todo en la zona del centro histórico y el este, con casi un 30% respecto de la población total de de Málaga ². La parte del litoral oeste del municipio concentra el otro gran núcleo de la población malagueña.

En los trabajos destinados al análisis y descripción de la movilidad en Málaga, la zonificación urbana en la que se ha clasificado la ciudad está basada en *Macrozonas*. Dichas macrozonas son el resultado de la división realizada por la EMTSAM ³ para el Área de Tráfico y Movilidad del Excmo. Ayto. Málaga. No obstante, para poder interrelacionar estos estudios, se han asociado las distintas macrozonas a las Áreas Histórico-Tipológicas que se presentan en el PGOU de la ciudad^{27,28}.

Los estudios, planes y proyectos redactados en los últimos años relacionados con la ordenación de la movilidad de Málaga, han tenido un eje común: la oferta de transporte existente en la ciudad y el análisis del comportamiento de la población a partir de la oferta disponible de los diferentes modos de transporte. Por otro lado, también se han tomado como referencia los estudios realizados sobre la demanda de transporte.

En el *Estudio sobre la Movilidad y Modelización de la Demanda de Transporte en la*

²Distribución poblacional extraídas del PMMS (Plan Municipal de Movilidad Sostenible) de Málaga.

³Empresa Malagueña de Transportes, Sociedad Anónima Municipal. Empresa del Excelentísimo Ayuntamiento de Málaga, responsable de la gestión del transporte urbano en la ciudad de Málaga.

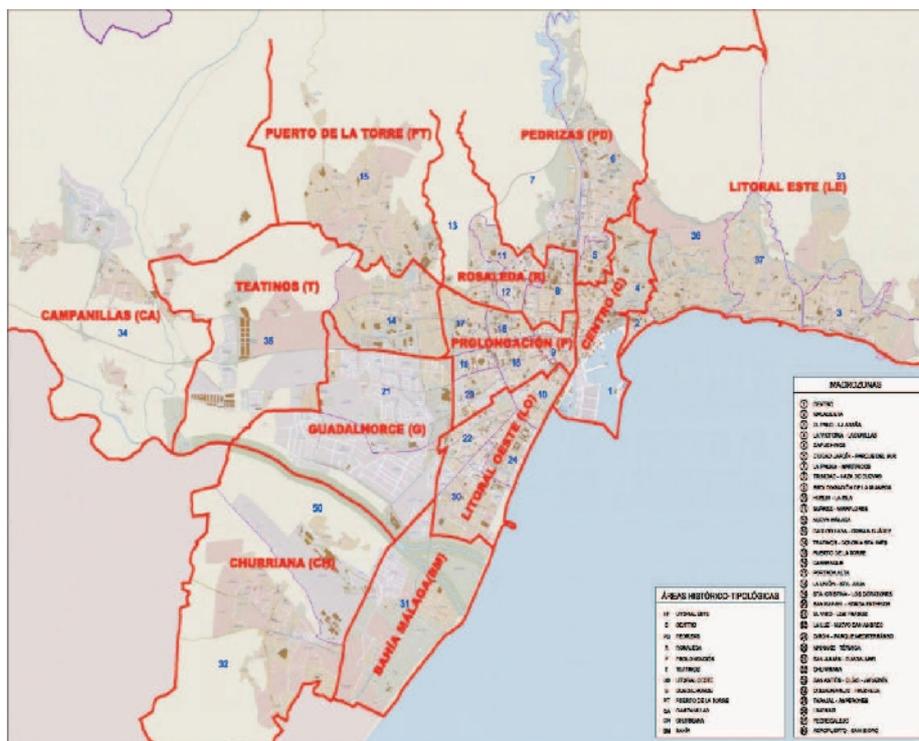


Figura 4.2: Clasificación zonal de Málaga

*Ciudad de Málaga*²⁷, aunque parta de datos algo desfasados tomados en el año 1993, se sientan las bases para realizar los estudios posteriores de demanda en la ciudad. Este primer estudio analiza la problemática de la movilidad motorizada a partir de los datos obtenidos por una encuesta domiciliaria y una encuesta origen-destino del vehículo privado. El estudio está complementado por un análisis de las características socioeconómicas y de la movilidad del municipio. Se realiza, por tanto, una modelización de la demanda de movilidad, así como de la oferta de transporte, incluyendo exclusivamente los sistemas motorizados.

Posteriormente, el Ayuntamiento de Málaga presentó un nuevo estudio denominado *Análisis de la Movilidad en la ciudad de Málaga*²⁸. El objetivo principal fue estimar las pautas de movilidad de un día medio laborable de la población residente en el término municipal de Málaga. Sus resultados proporcionan información sobre las demandas de viajes que se realizan en la ciudad, así como la asignación de reparto modal, motivos, orígenes y destinos, además de otros datos que ayudan a la actualización de las pautas

y demandas de movilidad que rigen actualmente en Málaga. Este trabajo sirve de base para la última actualización de los datos de movilidad presentados en el *Estudio de Demanda de Movilidad en la ciudad de Málaga* del año 2014²⁹. Todos estos estudios realizados sobre la demanda de transporte permitirán realizar pronosis futuras y evaluar la evolución de la movilidad en los últimos años en la ciudad.

Esquema General de la Movilidad Urbana (2014). Los datos básicos de movilidad descritos en el *Estudio de Demanda de Movilidad en la ciudad de Málaga*²⁹, permiten calcular el flujo de viajes que se realizan entre las diferentes zonas de transporte de la ciudad de Málaga. El número total de desplazamientos urbanos que se producen en Málaga en un día laborable es de 1.380.984, con un 50.1% considerados como viajes mecanizados y, el 49.9% restante como no mecanizados. En comparación con los datos del 2008 se ha producido un aumento de la movilidad no motorizada dentro del municipio de Málaga, provocado por una parte por la situación económica y por otra por la aparición del sistema de préstamo de bicicleta pública. Para una mayor comprensión de los resultados de movilidad urbana sobre el reparto modal, se describen todos los modos de transporte disponibles en la ciudad de Málaga. La red de metro no se incorporó en este estudio debido a la falta de datos existentes, dada la poca vida útil de la que se disponía acerca de este modo de transporte en el municipio.

Modo	Total	%
A pie	666.207	48.2 %
Bici	23.473	1.7 %
Bus Discrecional	11.520	0.8 %
Bus EMT	141.269	10.2 %
Bus Interurbano	956	0.1 %
Cercanías/Tren	3.662	0.3 %
Coche	424.383	30.7 %
Moto	93.145	6.7 %
Taxi	16.370	1.2 %
Total	1.380.984	100 %

Tabla 4.1: Reparto modal (Málaga).

Matrices de viajes para el municipio de Málaga. Los datos de movilidad que han servido de base al presente trabajo son los facilitados por el *Análisis de Movilidad en la ciudad de Málaga*²⁸. La distribución modal de la movilidad urbana del municipio de Málaga en ese análisis está configurada y distribuida en las 12 áreas histórico-tipológicas. Esto es importante dado que uno de los requisitos de los modelos de transportes es el establecimiento de una división por zonas de transporte adecuadas para el fin del estudio.

En el caso de la ciudad de Málaga, con una extensión cercana a los 400 km^2 , se ha considerado que los resultados de movilidad pueden tener un valor más significativo y real si se establece una distribución del municipio en 32 zonas, y no en los 12 distribuidos por el *Análisis de Movilidad en la ciudad de Málaga*²⁸. En base a ello se ha realizado un proceso de cálculo de las propias matrices de viajes para los orígenes y destino, que serán denominadas *matrices O/D*. Los pasos realizados a la hora de confeccionar las *matrices O/D* de los viajes del municipio de Málaga, para los diferentes modos de transportes, son los siguientes:

- Limpieza y depuración de datos. La primera medida a realizar consistía en analizar y comprobar los datos de la encuesta de movilidad de Málaga del año 2008. El número inicial de encuestas era de 13.458 e incluían todas las encuestas realizadas para el estudio. Se analizaron posibles errores de datos y, aunque no se encontró ninguno, se optó finalmente porque los datos que sirvieran para el estudio estuvieran basados en 11.692 encuestas, debido a la supresión de datos innecesarios tales como los procedentes de menores de 4 años.
- Corrección de *matrices O/D*. Los datos resultantes de las encuestas depuradas se comparan con la base de datos de las secciones censales por zonas de transporte, para cotejar las respuestas y comparar el porcentaje de representación existente en las diferentes agrupaciones de datos. El proceso consistió en una comparación por zonas de los datos procedentes de las encuestas de movilidad y los datos extraídos del INE, teniendo como resultado un factor de corrección zonal. Las variables analizadas fueron sexo, edad, disponibilidad y número de vehículos por hogar, además del tamaño del núcleo familiar. Una vez corregidos los resultados de las matrices, se obtuvieron las diferentes *matrices O/D (12x12)* para los diferentes modos de transporte analizados en el estudio.

- Cálculo de *matrices O/D* expandidas. Para un mejor análisis de la movilidad dentro del municipio de Málaga, se calcularon las *matrices O/D* expandidas para las 32 áreas de transportes diseñadas en este estudio. El método usado para repartir el número de viajes totales producidos en cada una de las 12 áreas histórico tipológicas a las nuevas 32 áreas de transportes se basa en un reparto gravitacional de los viajes. Al disponer de una base de datos formada por las 428 secciones censales, que forman el municipio y donde se recogen las características socioeconómicas, datos sobre viviendas y los diferentes equipamientos, se facilita la distribución de los viajes entre las diferentes secciones censales que forman cada una de esas nuevas 32 áreas de transporte. Como resultado se obtienen cada una de las *matrices O/D* para los modos de transporte: coche, bus urbano, moto, bicicleta, a pie y, una matriz O/D con el total de los viajes para el municipio.

Estos cálculos se realizaron antes de la exposición pública del *Estudio de demanda de movilidad en la ciudad de Málaga*²⁹, octubre del 2014. De este modo se puede realizar una comparación de éstos resultados²⁹ y las diferentes *matrices O/D* calculadas en el presente trabajo. La comparativa de los principales datos se presentan en la siguiente tabla:

Modo	2008	2014	Bikenetcoon	Error
A pie	45.9 %	48.2 %	49.54 %	-0.03 %
Bici	0.4 %	1.7 %	1.64 %	-0.26 %
Bus Discrecional	1.4 %	0.8 %	0.8 %	-0.27 %
Bus EMT	9.7 %	10.2 %	9.76 %	-0.09 %
Bus Interurbano	0.2 %	0.1 %	0.2 %	-0.27 %
Cercanías/Tren	0.1 %	0.3 %	0.3 %	-0.16 %
Coche	34.9 %	30.7 %	30.05 %	-0.43 %
Moto	6.2 %	6.7 %	6.5 %	-0.02 %
Taxi	1.2 %	1.2 %	1.21 %	-0.25 %
Total	100 %	100 %	100 %	-1.78 %

Tabla 4.2: Comparativa sobre resultados de movilidad.

4.2.1. Áreas de transportes

El presente trabajo tiene como ámbito de actuación el Término Municipal de Málaga, y en él se ha realizado la adaptación de las macrozonas de transporte planteadas por la empresa de transportes municipal, EMTSAM, tratando de suplir la falta de información existente en los restantes trabajos revisados. Por ello se ha considerado la distribución administrativa del municipio de Málaga mediante secciones censales, facilitada por el Instituto Nacional de Estadística, disponiendo con ello de cifras de población y censo demográfico actualizados al año 2011.

La riqueza de la base de datos del Censo de Población y Vivienda permite conocer las características de las personas clasificadas por: sexo, edad, nacionalidad, niveles de estudios, situación laboral, movilidad, etc. Se disponen, a su vez, de datos sobre el tamaño, composición y núcleos de los hogares, describiendo diferentes categorías de viviendas, dependiendo de la superficie, habitaciones e incluso régimen de tenencia. Otros de los datos más importantes, usados en la elaboración de este proyecto, han sido los vinculados a los diferentes equipamientos, donde se detallan el número y las diferentes tipologías (culturales, educativos, sociales, deportivos, industriales, etc.) existentes para cada una de las secciones censales analizadas.

Los resultados definitivos del Censo de población y viviendas del año 2001 ⁴ disponen de una herramienta para la creación de tabla de datos con las diferentes distribuciones administrativas, por comunidades autónomas, provincias, municipios y, la división de mayor interés, inframunicipal.

Esta herramienta online se usó para la realización de la base de datos por secciones censales del municipio de Málaga. Los datos extraídos se corresponden con las 422 secciones censales que forman el municipio, donde se recapitula diferente tipo de información relacionada con la población, viviendas y equipamientos disponibles. En base a los datos de población, se agrupa la información sobre características socioeconómicas de cada una de las secciones censales, desglosando el tipo de población existente,

⁴Sistema de consulta de la información de los Censos de Población y Viviendas del año 2001 <http://www.ine.es/censo/es/inicio.jsp>

diferenciada por edad, sexo, nacionalidad, nivel de estudios, disponibilidad de coche y ocupación laboral. También, se ha agrupado la información relacionada con las clases de viviendas y características de los hogares disponibles. El conjunto de datos relacionados con la población y viviendas ayuda a comprender, unido a los estudios de movilidad, el comportamiento de los usuarios a la hora de realizar los viajes entre las diferentes áreas de transporte en las que se dividirá la ciudad. Éstos datos ofrecen información de las posibles zonas generadoras de viajes, siendo zonas de mayor importancia las que acumulen un mayor número de posibles viajes de los usuarios en un día laboral.

Por otro lado, se estructuran todos los datos relacionados con las áreas que tienen una mayor capacidad para atraer los viajes de los diferentes usuarios. Éstas áreas están asociadas a un mayor número de equipamientos. Se describe todos los equipamientos disponibles que existen en cada una de las secciones censales, prestando una mayor atención en los equipamientos, tradicionalmente, más atractores de viajes como pueden ser los educativos, comercial e industrial y oficina.

De forma paralela, se realizó una base de datos con los resultados detallados del Censo de Población y Viviendas del año 2011 ⁵. Esta base de datos consta de 428 secciones censales, a diferencia que las 422 en las que se distribuye el municipio para el año 2001. Por ello se procedió a un análisis comparativo de las secciones censales, pudiéndose comprobar una nueva distribución para el año 2011. Como un primer paso, se unificaron las dos bases de datos, 2001 y 2011, localizando las diferencias entre las secciones censales, a partir de herramientas de sistemas de información geográfica, como ArcGis ⁶ La base de datos resultante se basa en la obtenida del año 2011.

El uso de los datos del año 2001 son necesarios debido a la gran riqueza que poseen, sobre todo en información relacionada con los equipamientos disponibles en cada sección censal. Como es necesario una actualización de los datos, éste proceso se realiza a partir del cálculo de un *factor de evolución*. Dicho factor surge de la comprobación sobre el crecimiento o desarrollo en cada una de las secciones censales existentes.

⁵Resultados detallados sobre los Censos de Población y Viviendas del año 2011 http://www.ine.es/censos2011_datos/cen11_datos_inicio.htm

⁶Software de la compañía ESRI. ArcGIS permite conectar mapas, aplicaciones y datos para diferentes análisis de toma de decisiones.



Figura 4.3: Clasificación zonal de Málaga.

Para este caso en particular, se analizó la transformación que han sufrido las secciones censales, diferenciando los datos del año 2011 y 2001, en relación con la población total, número de viviendas y número de vehículos, teniendo como resultado un promedio de evolución por sección censal. Se resume como : $FE = \alpha_{Poblacion} + \alpha_{Viviendas} + \alpha_{Vehiculos}$, donde cada uno de las α es el resultado de comparar los datos del año 2011 y 2001 de las bases de datos elaboradas. Con ese valor, multiplicado por cada uno de los equipamientos del 2001, se obtiene el número de equipamientos actualizados para el año 2011 para cada una de las secciones censales que conforman el municipio de Málaga.

Por tanto, se construye una base de datos única, con datos reales y calculados para el año 2011, de las secciones censales las cuales, a su vez, estarán agrupadas por las diferentes áreas de transporte diseñadas en las que se divide el municipio de Málaga. Ésta base de datos tendrá gran importancia en la aplicación del algoritmo, tal y como se verá en los capítulos siguientes de este estudio.

Como resultado, se dispone de una nueva zonificación en 32 macrozonas, que tienen como base la dispuesta por la EMTSAM, adaptadas a la distribución del censo facilitada por el INE respecto a las secciones censales. Toda las bases de datos, con las secciones censales actualizadas usadas para la elaboración de esta tesis doctoral, hacen alusión a la zonificación resultante de 32 macrozonas elaborada en la presente investigación.

4.3. Infraestructura de Red vial

La elaboración del modelo de red es una de las piezas principales de este estudio. La base de datos, formada por la infraestructura de la red vial del municipio de Málaga, cuenta con gran cantidad de información que servirá como eje principal a la hora de optimizar y diseñar las diferentes infraestructuras para la bicicleta dentro de la ciudad.

La modelización se llevó a cabo con el uso de PTV Visum, software utilizado para el análisis de tránsito, planificación y gestión de datos basada en SIG. Estudia de manera consistente a todos los usuarios de las vías públicas y sus interacciones y se ha convertido en un estándar reconocido en el campo de la planificación de transporte, proporcionando una gran cantidad de funciones para cualquier aspecto de planificación e ingeniería de transporte ⁷. PTV Visum utiliza como mapa base de trabajo los facilitados por Open Street Map (OSM). Los mapas de Open Street Map se crean utilizando información geográfica capturada con dispositivos GPS móviles, ortofotos y otras fuentes distribuidas bajo licencia abierta. Esto facilita la labor de trabajo al disponer de información gratuita y actualizada.

⁷PTV Visum es uno de los software de modelización del transporte de PTV Group, perteneciente a Vision Traffic Suite, y es el estándar mundial en planificación de transporte, ingeniería de tránsito y simulación de tráfico basada en software.

Para la utilización de PTV Visum se ha utilizado una licencia facilitada específicamente para la elaboración de la presente tesis. La licencia es de tipo *D2* y se caracteriza por tener un número máximo de zonas asignadas de 400, una limitación de 5.000 arcos para el diseño de las vías e infraestructuras para los diferentes modos de transporte y un máximo de 2.000 nodos para representar los cruces e intersecciones de la red vial del municipio de Málaga.

Los elementos principales que conforman la red vial elaborada, al igual que en los grafos, son los nodos y arcos. Se describe, a continuación, el proceso de realización de la base de datos de la infraestructura de red del municipio de Málaga.

Partiendo del mapa base facilitado con Open Street Map, se introdujeron los diferentes **nodos** con el software PTV Visum. Cada uno de los nodos forman parte de los cruces existentes entre las diferentes calles y viales que conforman el entramado urbano de la ciudad. Como criterio primero, a la hora de establecer los nodos, se usó la simplicidad en las intersecciones, facilitando la lectura del número de nodos y el cálculo de las matrices formadas. La dificultad existente en algunas de las intersecciones de la ciudad condiciona el volumen de los nodos que la forman. El número total de nodos que constituyen la red vial de Málaga es de 1.539.

El siguiente punto en la elaboración de la red son los **arcos** o calles existentes. A pesar la gran extensión del municipio de Málaga, cercana a los 400 km^2 , se realizó una modelación de cada uno de los arcos muy completa con más del 70% del total de viales que conforman el municipio de Málaga y con un total de 4.918 arcos que conforman la base de datos de la red vial. El gran número de arcos modelados proporciona un nivel de detalle preciso y factible para la obtención de un buen resultado a la hora de optimizar la infraestructura de carriles para bicicletas. El diseño óptimo de los “carriles bici” se realiza a partir de la información facilitada por los arcos. Las características que poseen cada uno de los arcos, se han introducido gracias al potencial de PTV Visum, y se enumeran en:

1. Nodo origen y destino: cada arco describe la conexión de nodos existente.
2. Tipo de vía: para la modelización vial se han establecido 5 categorías de vías

diferentes, con características genéricas propias para cada tipo. Las clases de vías se corresponden con:

Tipo de vía	V_0	V_{max}	Capacidad
Semipeatonal	30 <i>km/h</i>	50 <i>km/h</i>	500 <i>veh./h</i>
Urbana	50 <i>km/h</i>	60 <i>km/h</i>	700 <i>veh./h</i>
Arterial	60 <i>km/h</i>	90 <i>km/h</i>	800 <i>veh./h</i>
C. Nacional	100 <i>km/h</i>	160 <i>km/h</i>	1000 <i>veh./h</i>
Autovía	120 <i>km/h</i>	180 <i>km/h</i>	1100 <i>veh./h</i>

Tabla 4.3: Tipología de vías modelizadas.

Siendo V_0 la velocidad a flujo libre de la vía y V_{max} la velocidad máxima permitida en la vía a la hora de realizar las futuras modelizaciones, ambas expresadas en *km/h*. El tipo de vía tiene asignado una capacidad de diseño máxima estipulada en vehículos que circula por cada tipo de vía en una hora.

Cada una de las tipologías de vías posee información adicional, dónde se indica la posibilidad de circulación de los diferentes modos de transporte. Cada uno de los arcos incorpora información sobre la disponibilidad que tienen los diferentes modos de transporte, incorporados en el modelo, para hacer uso de la infraestructura vial.

3. Modo de transporte: para el caso particular de este estudio, se han incorporado 4 modos de transporte: B (bus), C (coche), W (a pie) y Bi (bicicleta). Cada uno de estos modos tiene sus propias características que condicionan la red vial del municipio. Se pueden encontrar casos particulares debido a la gran extensión de datos que incorpora la red. Un breve resumen de los modos de transportes sería:
 - a) Bus: el autobús se ha configurado para que pueda circular por todas las vías, con excepción de las semipeatonales. El caso particular se presenta con la disponibilidad de los carriles de uso exclusivo bus y/o taxi, dónde el bus se ve obligado a circular por su carril específico.
 - b) Coche: para este modo de transporte se incluye, también, la motocicleta. Tienen permitido su circulación por todos los arcos de la red, salvo en los arcos

cuyo caso particular no incluya a este modo como posible usuario de la vía pública.

c) A pie: en el modelo de red diseñado, la modelización de los usuarios a pie está permitida en la gran parte de los arcos exceptuando los viales que no disponen de aceras, como por ejemplo autopistas y autovías y cualquier vía con una circulación de vehículos a motor de elevada velocidad y gran afluencia de vehículos.

d) Bici: al igual que el modo a pie, la modelización de los viajes en bicicleta pueden realizarse en la mayoría de los arcos que conforman la red diseñada. Existe la singularidad de los carriles propios para el uso de la bicicleta (aceras bici, carriles bici por la calzada, etc.), todos estos tipos están incluidos en la red, determinando la tipología de carril y la parte de la vía pública que ocupa.

4. Longitud: gracias al uso de herramientas basadas en sistemas de información geográficas, se dispone de la longitud de cada uno de los tramos de calles en los que se divide la red diseñada.
5. Número de carriles: cada uno de los arcos dispone de información sobre el número de carriles que conforman la calzada. Éste número puede variar dependiendo del tipo de vía o, en su caso, de tramos especiales del vial.
6. Anchura de carriles: una información muy valiosa para este estudio es el poder disponer de una descripción del ancho de cada uno de los carriles que conforman la infraestructura de la red vial de Málaga. Esta información condicionará la posibilidad de incorporar el carril bici en calzada o en su detrimento buscar otra alternativa viable para su ejecución.
7. Sentido de los carriles: la base de datos de la red vial dispone de información sobre los sentidos disponibles para cada uno de los arcos, facilitando posibles modificaciones de la circulación para la totalidad de modos que usan la vía pública.
8. Aceras: es el espacio público usado por los peatones. Dependiendo de la tipología de carril bici, es posible su implantación en la acera respetando un espacio de coexistencia entre peatones y ciclistas. Se dispone, en la base de datos, de la existencia de las aceras.

9. Anchura de aceras: además de contar con la posibilidad de existencia de acera en la base de datos de la red diseñada, se posee información de las anchuras de las aceras para los diferentes tramos del entramado urbano del municipio de Málaga.
10. Aparcamientos: la existencia de aparcamientos puede condicionar la planificación y diseño de las diferentes infraestructuras de los carriles bici. Se dispone de datos relacionados con los aparcamientos existentes en la red vial.
11. Anchura de aparcamientos: los datos relacionados con la anchura de los aparcamientos facilitan información sobre la tipología de aparcamiento existente y la posibilidad de implantar el carril bici en el lugar que ocupan en la vía pública.
12. “Carriles bici”: este apartado está relacionado con la infraestructura destinada al uso exclusivo de la bicicleta existente en el municipio de Málaga. Los datos están vinculados a los arcos dónde existe este tipo de infraestructura, facilitando información sobre la tipología de carril bici y su lugar de ejecución dentro del espacio público.
13. IMD: existe información de la red de carreteras provincial sobre el número de vehículos que circulan por las calles. Se ha realizado una clasificación, a partir de datos sobre aforos de las vías municipales, sobre la intensidad media de vehículos que transitan por los diferentes arcos de la red. Su índice también dependerá de la tipología de la vía y las características físicas propias de los arcos, como de la toma de aforo peatonal de las principales calle del municipio. Se clasifican en:

IMD	Flujo de vehículos
1	Mínimo
2	Poco
3	Normal
4	Elevado
5	Máximo

Tabla 4.4: Clasificación de IMD de los arcos.

14. Área de transporte: cada uno de los arcos tiene asignado el área de transporte a la que pertenece. Este apartado está directamente enlazado con la base de datos

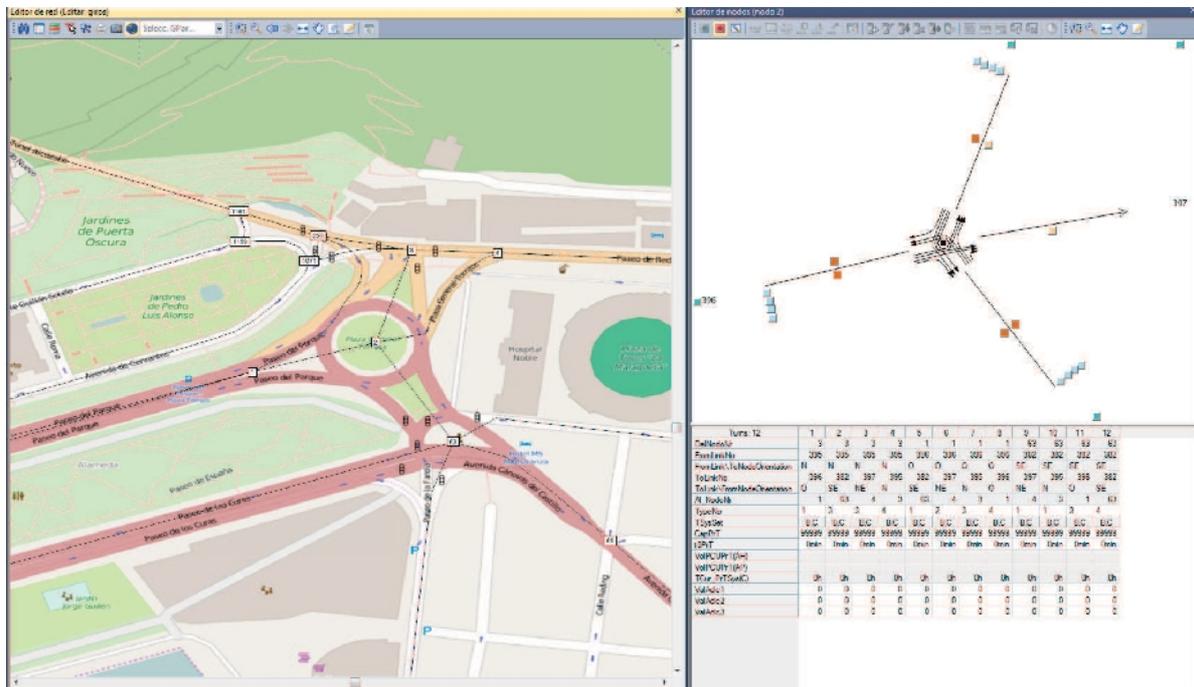


Figura 4.4: Ejemplo de giro realizado con PTV Visum.

realizadas por secciones censales y, por tanto, por las diferentes áreas de transportes en las que se ha clasificado el municipio. cada uno de los arcos tiene asociado la información correspondiente de su área de transporte sobre datos socioeconómicos, de vivienda, los diferentes equipamientos, etc.

Una vez completado el modelo de red realizado con el software PTV Visum, en cuanto a los nodos y arcos, se configuran los **giros** de cada uno de los cruces que se producen en la red diseñada. La importancia de esta sección está basada en el realismo de la red modelada de la ciudad, donde cada uno de los cruces existentes se ha analizado y configurado los giros disponibles y permitidos para cada una de las intersecciones.

Para futuros trabajos, el modelo aparece completado con los diferentes modos de transportes existentes actualmente en la ciudad, incluido el servicio de metro. Además, están diseñadas todas las infraestructuras propias para cada modo. tal y como corresponde en el diseño de un modelo de transporte, se ha ejecutado los diferentes operadores de transporte público: EMT y Metro Málaga. La elaboración de un completo modelo de transporte en combinación con el trabajo aquí presentado, facilitará una mejor compren-

sión de los resultados de partida que tendrán su efecto en la planificación y diseño de las infraestructuras para la bicicleta, siempre relacionado de una manera directa todos los modos de transporte que participan en la movilidad de la ciudad de Málaga.

4.4. Toma de datos de movilidad

4.4.1. Encuesta de Movilidad en Málaga y Preferencias de uso de la Bicicleta

Uno de los objetivos principales para la elaboración de la presente tesis doctoral, se ha basado en la realización de la *Encuesta de Movilidad en Málaga y Preferencias de uso de la Bicicleta* que permita el conocer las pautas de movilidad y preferencias de uso de la movilidad ciclista en el municipio de Málaga.

En el siguiente capítulo, se procederá a presentar el diseño y la metodología empleada en la realización de la encuesta descrita, incorporando los hábitos de movilidad actuales en la ciudad de Málaga y caracterizando a los usuarios de la bicicleta. Se finaliza con las conclusiones obtenidas por el análisis de los resultados de la encuesta y las preferencias en el uso de la bicicleta por parte de los usuarios de la vía pública de Málaga.

5

Encuesta de Movilidad en Málaga y Preferencias de uso de la Bicicleta

5.1. Introducción

La relación de las encuestas de movilidad y la planificación del entramado urbano han quedado patentes en los diseños de las diferentes infraestructuras destinadas al transporte. Se exponen los principales aspectos considerados en la realización de la encuesta de movilidad, analizándose cada uno de los pasos para su elaboración y ejecución, con especial atención en el análisis de los datos obtenidos relacionados con la movilidad sostenible, identificación de los patrones del uso de la bicicleta y preferencias del usuario en el caso particular del entorno urbano del municipio de Málaga.

5.2. Objetivos del análisis de la movilidad en Málaga y preferencias de uso de la bicicleta.

En los últimos años se han presentado diferentes proyectos relacionados, directamente o indirectamente, con la ordenación de la movilidad de la ciudad de Málaga. La mayoría de estos estudios han tenido como objetivo el análisis de la movilidad de la ciudad, centrado en el reparto modal de los diferentes modos de desplazamiento, dejando a un lado los estudios sobre la demanda del transporte.

Se presentan algunos de los estudios y planes considerados en la presente investigación. Se destacan:

- **“Estudio sobre la Movilidad y Modelización de la Demanda de Transporte en la Ciudad de Málaga”²⁷**: es un estudio completo sobre la problemática de la movilidad motorizada en el término municipal de Málaga. Se basa en la realización de encuestas domiciliarias, con resultado de matrices origen-destino del vehículo privado.
- **“Análisis de la Movilidad en la ciudad de Málaga”²⁸**: en él se estiman las pautas de movilidad de un día medio laborable de la población residente en el término municipal de Málaga. Sus resultados permiten conocer las demandas de viajes, así como la asignación de reparto modal, motivos, orígenes y destinos, que sirven para actualizar las pautas y demandas de movilidad que rigen actualmente del municipio.

- **“Propuesta para la Mejora de la Movilidad Urbana de la Ciudad de Málaga”**²⁵: supone, únicamente, una recopilación de las actuaciones previstas por el Área de Tráfico del Ayuntamiento para el año 2006 y una prospección para los años 2007-2013, donde se establece claramente la necesidad de realizar un Plan de Movilidad Sostenible.
- **“Estudio de Demanda de Movilidad en la ciudad de Málaga”**²⁷: corresponde al último estudio de movilidad elaborado en la ciudad para el año 2014 y fue realizado por el Observatorio de Medio Ambiente Urbano del Ayuntamiento de Málaga (OMAU). Está basado en los datos actualizados de movilidad del municipio de Málaga y pone especial atención en la concienciación de la movilidad sostenible.

Tras una revisión de los planes y estudios de movilidad planteados, se ha considerado como principal objetivo el conocer las preferencias de uso de la bicicleta en relación con la movilidad cotidiana de cada uno de los usuarios. Se pretende sentar las bases para un futuro análisis de políticas de movilidad, capaces de fomentar un mayor uso de los medios de transportes sostenibles. Con la finalidad de averiguar las preferencias de usos sobre la bicicleta se ha realizado un trabajo de encuesta basado en preferencias declaradas, cuya relevancia se explicará en los siguientes apartados.

Además de analizar el objetivo principal, la elaboración de la encuesta cubre los siguientes objetivos secundarios:

- Realizar la caracterización de la movilidad ciclista en la ciudad.
- Definir los diferentes perfiles de usuarios de cada uno de los modos de transporte, en especial el de la bicicleta.
- Conocer la percepción de la bicicleta en la población de estudio.
- Estudiar y analizar los diferentes factores que condicionan o fomentan el uso de la movilidad sostenible.
- Conocer los diferentes escenarios posibles que facilitarían el aumento de la bicicleta como modo de transporte en la ciudad.

Para una mayor comprensión de la movilidad en general, y de la ciclista en particular, se tienen en cuenta algunos de los datos mencionados en los apartados anteriores sobre el número de desplazamientos realizados en los diferentes modos de transporte, los motivos de dichos desplazamientos y los orígenes y destinos de la distribución zonal de la ciudad.

5.3. Encuesta de Movilidad en Málaga y Preferencias de uso de la Bicicleta.

La realización de la encuesta ha facilitado el conocimiento en los hábitos de movilidad y preferencias de uso sobre la bicicleta en el municipio de Málaga. Como base para la planificación de la encuesta se han considerado la *Campaña de encuestas de movilidad sobre el sistema público de bicicletas de Málaga*²⁶ y el *Estudio de Demanda de Movilidad en la ciudad de Málaga*²⁹. Se observa una cierta falta de información sobre la demanda ciclista actual y sobre las preferencias de uso para cada uno de los diferentes usuarios. Por este motivo, se decidió elaborar una encuesta que aportase información de estas preferencias de movilidad. A continuación se detalla el diseño y metodología de encuestas, así como los resultados y conclusiones de ésta.

5.3.1. La bicicleta en la ciudad de Málaga.

Tal y como se ha desglosado en el capítulo anterior, según el censo de INE¹ del 2013, el municipio de Málaga consta de una población de 568.479 personas. La complejidad en la elaboración de esta tipología de encuestas reside en la calidad de los datos que se pretenden obtener, a partir de un tamaño muestral representativo y significativo de la movilidad del municipio. La dispersión de la población condiciona parte de los resultados debido a la distribución zonal del municipio. La heterogeneidad de la población se resuelve con el tratamiento de la encuesta sobre cada una de las diferentes tipologías de usuarios, clasificadas por rangos de edad, profesión, motivos de viaje, etc.

¹Datos procedentes de estadísticas del padrón municipal y de las variaciones intercensales del INEbase (Instituto Nacional de Estadística).

La modelización de la demanda de transporte se basa en la información acerca de las elecciones y decisiones observadas por los usuarios, es decir, de datos de preferencias reveladas²⁰. En este sentido, en los últimos años se ha producido un gran avance en la evolución de proyectos que tienen en consideración la influencia de los términos relacionados con la percepción de los usuarios, destacando las encuestas de preferencias declaradas²⁰.

En el trabajo publicado en 1994 por Hensher⁶³ se presenta una guía práctica sobre la toma de datos de preferencias declaradas. Para una correcta planificación de las preguntas de preferencias reveladas a realizar, se tiene en consideración las directrices expuestas en el “*Manual de Encuestas de Movilidad (Preferencias Reveladas)*”⁶⁸, elaborado por el grupo de investigación de sistemas de transporte de la universidad de Cantabria.

La complejidad que requiere la elaboración de una encuesta de movilidad es elevada. Debido a ello, se ha realizado un cuestionario que combina ambos tipos de preguntas (reveladas y declaradas). De este modo, se facilita al usuario una mayor comprensión de las preguntas y, por tanto, de los objetivos que se pretenden conseguir con este estudio. El diseño que se ha optado se presenta en el siguiente apartado.

Como punto de partida para el diseño del cuestionario se ha considerado el realizado por Liñán⁸⁰. En él se analiza las preferencias de usuarios sobre diferentes aspectos de la infraestructura para la bicicleta en la ciudad de Málaga y, concluye, en los aspectos de mejora para aumentar el uso de la bicicleta como modo de transporte habitual en el municipio. También se ha llevado a cabo la realización de grupos focales con el objetivo de calibrar la encuesta piloto y obtener mejoras. Se obtuvo como resultado el cuestionario final, formado por las preguntas recopiladas durante la revisión bibliográfica especializada, teniendo especial atención en aquellas preguntas de interés sobre la percepción y preferencias de uso referentes al municipio de Málaga.

Diseño de la encuesta

En esta sección se van a exponer todas las partes que forman el cuestionario final. Se desglosa en:

1. **Características socio-económicas.** Formado por un conjunto de preguntas cuya finalidad es la caracterización de los encuestados. Se recopila información sobre rango de edad, sexo, tamaño del hogar, nivel de estudios, nivel de ingresos, ocupación. Además, se incluyen 3 preguntas para analizar el estado físico y el hábito de la práctica deportiva.
2. **Identificación de la Movilidad.** El objetivo de este bloque es analizar el comportamiento de viaje de las personas. Se describe origen y destino del viaje, el modo de desplazarse, el horario de salida y llegada, motivo del desplazamiento realizado, frecuencia del desplazamiento y la posible combinación con otros modos de transporte.
3. **Movilidad en bicicleta.** Son un conjunto de cuestiones cuya finalidad es valorar a los usuarios habituales de la bicicleta como modo de transporte. Se analiza la frecuencia y motivos de su uso.
4. **Factores favorables al uso de la bicicleta.** Sección cuyo objetivo es valorar qué factores son importantes a la hora de decidir usar la bicicleta como medio de transporte. La valoración de las respuestas se desglosa en seis categorías.
5. **Factores disuasorios de la movilidad ciclista.** Formado por un conjunto de interrogantes que valoran la importancia de cada uno de los usuarios a diferentes variables que pueden influir en una menor utilización de la bicicleta como modo de transporte o impiden su uso.
6. **Tendencia de uso de la bicicleta.** Este bloque de preguntas están relacionadas con el uso de la bicicleta, proponiendo algunos escenarios ficticios que representan situaciones y casos hipotéticos. Se realiza una valoración por parte de los encuestados sobre su percepción respecto a cada uno de los escenarios propuestos, señalando si usarían la bicicleta como modo de transporte habitual.

Los tres primeros bloques corresponden a las caracterización de los usuarios y al análisis de sus hábitos de movilidad. Se consideran de gran importancia a la hora de estudiar la percepción y el efecto de las diferentes variables y situaciones expuestas en el resto de preguntas.

Los bloques cuatro y cinco, corresponden a los factores que favorecen al uso de la bicicleta como medio de transporte y a las variables disuasorias del uso de la bicicleta, respectivamente. El análisis previo de las preguntas de los primeros bloques, condicionan la tipología de usuarios de la bicicleta y los posibles usuarios potenciales, diferenciando para cada uno de los casos la importancia dada por los encuestados a las preguntas sobre que factores favorecen o disuaden el uso de la bicicleta como modo de transporte en el municipio de Málaga.

El último bloque de la encuesta es el de mayor aporte y peso del estudio de la movilidad y preferencia de uso de la bicicleta. Los encuestados deben señalar la frecuencia de uso de la bicicleta que tendrían en los diferentes escenarios propuestos:

- Escenario 1: existencia de una red de carriles bici completa.
- Escenario 2: limitación del volumen y velocidad del tráfico (en corredores y zonas de interés).
- Escenario 3: aceras para peatones y ciclistas compartiendo espacios.
- Escenario 4: aceras para peatones y ciclistas con espacios separados.
- Escenario 5: calzadas compartidas entre bicicletas y vehículos a motor.
- Escenario 6: calzadas con espacios separados para bicicletas y vehículos a motor.

Formato de la encuesta. Online

La metodología empleada para la realización de la encuesta por parte de los usuarios fue en formato *online*. La facilidad actual de acceso a las nuevas tecnología unido al aumento en los últimos años de en la adquisición de teléfonos de ultima generación (smartphones) y un incremento del nivel de conocimientos y acceso de las personas a

internet, ha condicionado dicha elección.

La captura de datos para la encuesta se hizo a través de Formularios Google ², dónde se recogen todos las preguntas pertenecientes a los bloques descritos en el apartado anterior.

La forma de realizar la encuesta es sencilla. Formada con preguntas fáciles para garantizar un mayor número de encuestas válidas. Para asegurar la realización de cuestionarios completos, el encuestado debía completar el total de preguntas de cada bloque antes de continuar con el siguiente. Aunque la encuesta está formada por preguntas sencillas, el tiempo total destinado a la realización de la encuesta es elevado, de 8 a 10 minutos. Debido a ello, el componente de abandono ha sido elevado. Para evitar posibles fallos en encuestas realizadas o respuestas falsas, se llevaron a cabo preguntas muy concretas capaces de asegurar que las situaciones descritas eran reales. Como ejemplo se incluyen las preguntas de *Identificación de la Movilidad*, dónde el encuestado describe el origen y destino de su viaje, las horas de salida y llegada y los modos de transporte. El conjunto de estas respuestas fue comparado con la base de datos realizada en ArcGIS, comprobando para cada uno de los casos el cálculo del viaje (tiempo y modo) del encuestado. Tras la comprobación llevada a cabo se descartaron un total del 6% de las encuestas realizadas en el municipio de Málaga.

5.3.2. Explotación de resultados.

En este apartado se describen y analizan los resultados de la encuesta realizada sobre “Movilidad y Preferencias de uso de la Bicicleta” en la ciudad de Málaga. En las siguientes páginas se especifica el tipo de usuario, caracterizado por los resultados sobre las preguntas de preferencias declaradas, relacionadas con el uso de la bicicleta como modo de transporte. Por último se desglosan las percepciones sobre el uso de la bicicleta basadas en las preferencias declaradas por los diferentes encuestados.

El periodo de realización de la encuesta tuvo lugar entre los meses de febrero y mayo

²aplicación de Google que facilita la creación de cuestionarios y la publicación de datos en internet. Con ella se recogen los resultados de la encuesta en una hoja de cálculo de Google Docs y se permite operar de manera directa o exportar como formato xlsx (Microsoft Office Excel).

del 2015, coincidiendo con el inicio del periodo primaveral en la ciudad de Málaga. Debido al aumento de usuarios de la bicicleta se incrementó la predisposición a participar en dicha encuesta. Al realizarse de manera online, se facilitó el cuestionario a diferentes asociaciones ciclistas de la ciudad, asociaciones de vecinos, tiendas especializadas en la bicicleta y diferentes grupos sociales de la ciudad para llegar a una mayor difusión y captar el mayor número de encuestas posibles.

También se destaca el apoyo dado por la Cátedra de Gestión del Transporte de Málaga, perteneciente al grupo de investigación de Gestión del Trabajo y del Transporte de la E.T.S. Industrial de la Universidad de Málaga y con la colaboración del Observatorio de Medio Ambiente Urbano (OMAU) del Ayuntamiento de Málaga.

La muestra final recogida, para el análisis y calibración de los resultados contenidos en esta tesis, finalizó el día 31 de mayo. Debido al interés mostrado por algunas instituciones públicas, como OMAU, para la utilización y aprovechamiento de los resultados obtenidos, se aumentó el plazo para la realización de la encuesta online. El incremento del número de datos lleva a una mayor precisión del estudio a realizar y permite diferentes aplicaciones metodológicas. Tras finalizar el primer plazo del 31 de mayo, el número de muestras finales recogidas fue de 211 en el municipio de Málaga. Para dicha cantidad, si se calcula un intervalo de confianza del 95 %, se alcanza un error estadístico del 6,85 %, que se sitúa por encima del 5 % permitido. No obstante, al tratarse de una calibración previa, para la comprobación y estimación del algoritmo desarrollado en esta tesis, se aceptan los resultados de las encuestas realizadas. Para trabajos futuros, se tendrán en cuenta los nuevos datos de encuestas realizadas por los usuarios, motivo por el cual también fue beneficioso ampliar el periodo de disponibilidad del enlace web.

Las encuestas con las que se han analizado y calibrado las variables de movilidad y preferencias de uso del municipio de Málaga han pasado diferentes niveles de control, para evitar posibles errores y duplicidad de datos, tal y como se ha explicado en el apartado anterior.

A continuación se describen los resultados de la encuesta realizada. Las cuestiones se clasifican según los bloques en los que se ha diseñado la encuesta, siguiendo el orden

cronológico de las preguntas realizadas en él.

Características socio-económicas. Las preguntas de este primer apartado están enfocadas a conocer y caracterizar a la población desde la perspectiva social y económica dentro del municipio de Málaga. El conjunto de preguntas de este apartado condicionan la futura calibración sobre la percepción de seguridad. Tal y como se desarrolló en el Estado del Arte, la importancia de variables como el sexo, edad, condición física, ocupación, etc. ejercen un valor positivo o negativo sobre la intención de uso de la bicicleta como modo de transporte en algunas de las etapas de viaje dentro del municipio de Málaga.

Es interesante tener en consideración la diferencia entre sexos para analizar el comportamiento de los usuarios a la hora de usar la bicicleta, o tener la predisposición de usarla como modo de transporte. Tras la revisión bibliográfica realizada, se va a tener especial atención en la distribución por sexos en la población encuestada^{102 58}. Según los resultado de las encuestas, la distribución de la muestra está repartida en un 61 % de hombres y el restante 39 % formado por mujeres. Supone una participación mayoritaria de hombres en el presente estudio, si se tiene en cuenta que el reparto de toda la población dentro del municipio de Málaga es cercano al 48 % y 52 % para hombres y mujeres respectivamente.

Para catalogar a los diferentes usuarios encuestados, se ha llevado a cabo una partición de los mismos por rango de edad. Se clasifican en dos grupos, jóvenes y adultos, donde los primeros engloban a todos los usuarios encuestados menores de 30 años. Esta selección se debe a una similitud entre las características de tipo de hogar, renta y trabajo, y cuya percepción del riesgo difiere del resto de los usuarios. El segundo grupo, por consiguiente, está formado por todos los encuestados mayores de 30 años, representados por características similares entre ellos.

Dentro de la población de interés se destaca la clasificación de jóvenes por sexo. Se describe una pequeña disminución en el número de hombres jóvenes que han realizado la encuesta (cercano al 58 %) con la correspondiente subida de las mujeres jóvenes al 42 % de los encuestados.

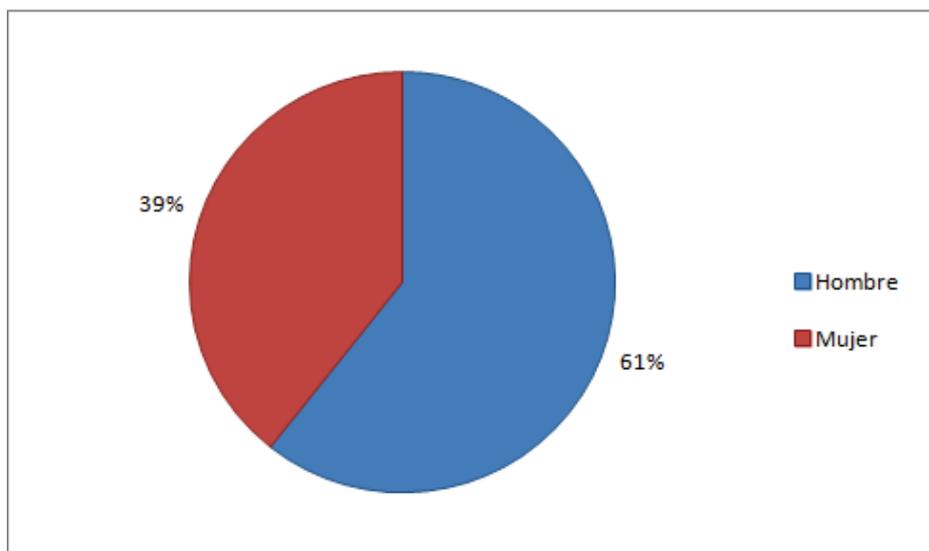


Figura 5.1: Sexo

Como caracterización de los encuestados, en relación con la edad, se observa una mayoría que oscila entre los 25 y los 50 años. Esto es debido a la tipología de la encuesta realizada, al considerarse mucho más atractiva por parte de estos colectivos. El número de participantes de más de 65 años y menores de 17 representan menos del 2% de la muestra. La frecuencia de uso de la bicicleta se ve afectada por la edad¹⁰⁷, identificando un mayor número de usuarios de la bicicleta (ocasionales o habituales) con edades menores a los 30 años.

Al relacionar el estado civil con el usuario habitual de la bicicleta, se observa una distribución poblacional similar a la población total de la población del municipio de Málaga (véanse las figuras 5.3 y 5.4). Se destaca que prácticamente la mitad de las mujeres ciclistas en el municipio son solteras, elevándose hasta un 73% la agregación de aquellas ciclistas cuya situación es de pareja o soltería. Por otro lado, desde el punto de vista masculino, se señala como cerca del 68% de los varones están formados por ciclistas solteros (37%) y en pareja (31%). Se diferencia, como dato interesante, el resultado de usuarios de la bici entre casados y solteros o en pareja para ambos sexos. Una interpretación de estos resultados puede deberse a la dificultad que tienen algunas personas casadas para desplazarse en bicicleta debido a la posible existencia de hijos.

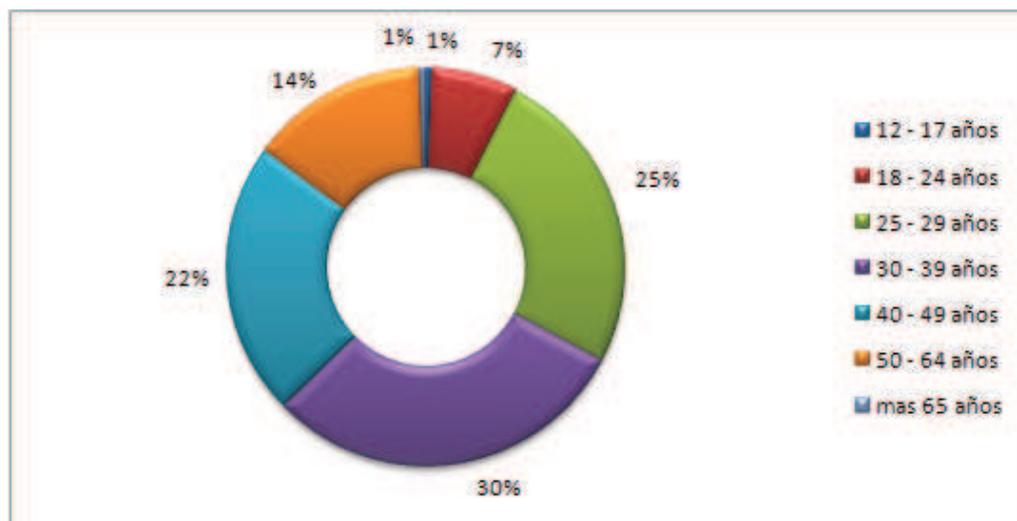


Figura 5.2: Rango de edad.

Otra de las preguntas realizadas en la encuesta ha sido la nacionalidad del encuestado. No se han obtenido conclusiones significativas que relacionen la nacionalidad y el uso habitual de la bicicleta como modo de transporte, debido a la falta de usuarios extranjeros que han realizado el cuestionario. Se destaca una mayoría de usuarios con nacionalidad española. Algunas de las nacionalidades de las personas que han realizado la encuesta han sido italiana, alemana, argentina y británica.

En relación a posibles trabajos de investigación futuros, se propone el realizar estudios de preferencias de uso de la bicicleta en el municipio por parte de personas extranjeras. En este sentido merecería la pena prestar un interés especial en aquellos estudiantes con la beca Erasmus de la Universidad de Málaga.

El tamaño del hogar es considerado como una de las variables más significativas a estudiar en los casos relacionados con el transporte. Es lógico señalar que los casos de hogares con un mayor número de miembros tendrán una mayor predisposición a usar la bicicleta u otros modos de transportes. Esto es debido a un número limitado de vehículos a motor por hogar. En el caso del municipio de Málaga se señala como el número medio de vehículos por hogar en poco más de 1. Evidentemente en los hogares con más de un

Una de las preguntas realizadas en la encuesta trata sobre el estado civil de los usuarios, distinguiendo entre solteros, en pareja, casado(a)s, divorciado(a)s y viudo(a)s. La distribución de la muestra se centra en las tres primeras categorías (solteros, en pareja y casados) condicionado con la edad de los propios usuarios. Se obtiene menos del 5% de los encuestados entre divorciados y viudos.

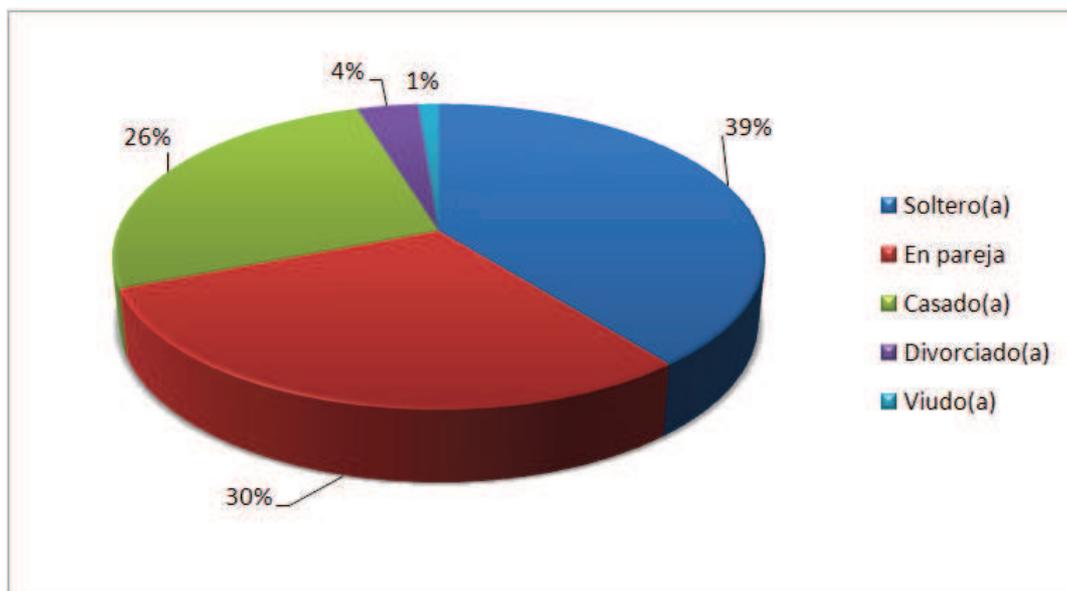


Figura 5.3: Estado civil ciclistas.

miembro existe una mayor disposición a usar otros modos de transporte. Una distribución del tamaño de hogar para el caso de estudio se se presenta en la figura 5.6.

En la literatura tradicional existe una tendencia de mayor uso del vehículo privado entre los sectores con un nivel de estudios superior. Considerando esta premisa, se cumple dicha particularidad para los usuarios con estudios universitarios y superiores en el municipio de Málaga. Desde la perspectiva de los usuarios de la bicicleta existe un alto porcentaje de usuarios con niveles de estudios superiores.

Respecto al nivel de estudios se realiza una descripción de la muestra total del estudio desglosando los resultados por sexo y por grupos de jóvenes y adultos. Diferenciando el nivel de estudios por sexo, se observa un mayor número de mujeres con estudios superiores en comparación con los hombres. Es destacable como el nivel de estudios de

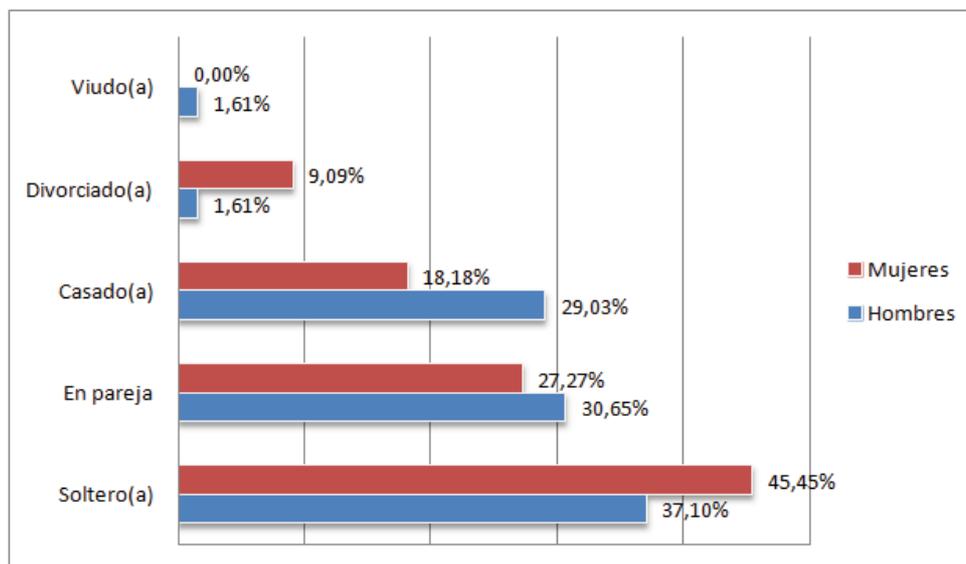


Figura 5.4: Sexo de los ciclistas.

los jóvenes, menores de 30 años, es bastante más elevado en comparación con el grupo de adultos.

El nivel de ingresos, expresado en la figura 5.9, es una variable directamente relacionada con el modo de transporte elegido por los usuarios, tal y como se expone en Ortuzar²⁰. Un mayor nivel de renta implica menores restricciones en la elección del modo de transporte disponible. Es decir, una renta mayor facilita el acceso a toda la oferta de transportes disponibles, teniendo una mayor preferencia por los modos de transportes de vehículos privados a motor.

Se destaca la presencia de un mayor número de usuarios con ingresos menores a 500 €/mes como usuarios habituales de la bicicleta. Los vehículos privado motorizados, como el coche y la motocicleta, tienen un mayor número de usuarios con rentas que oscilan entre los 1000 y 1500 €/mes. Es característico señalar en el caso del municipio de Málaga el hecho de que exista un mayor número de usuarios de la bicicleta con sueldos mayores de 1500 €/mes. Se produce un cierto cambio en la influencia del nivel de ingresos sobre la elección del modo de transporte y, por tanto, un cambio de mentalidad dentro de los encuestados.

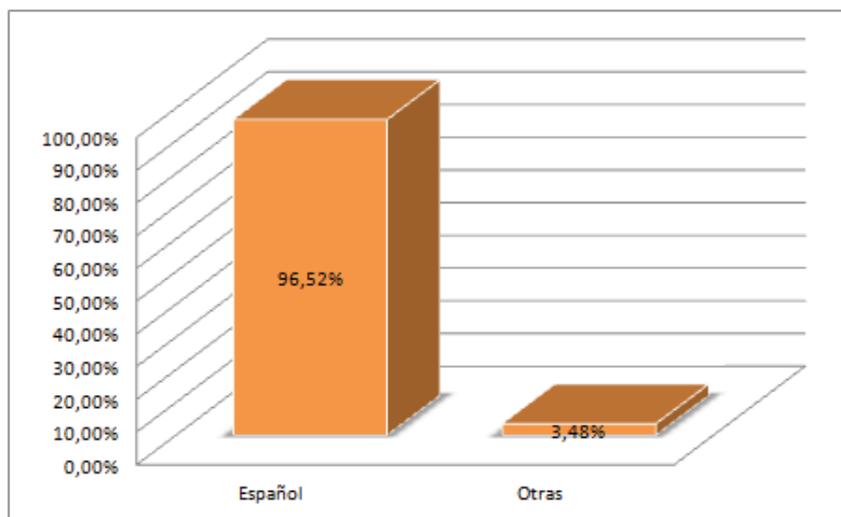


Figura 5.5: Nacionalidad.

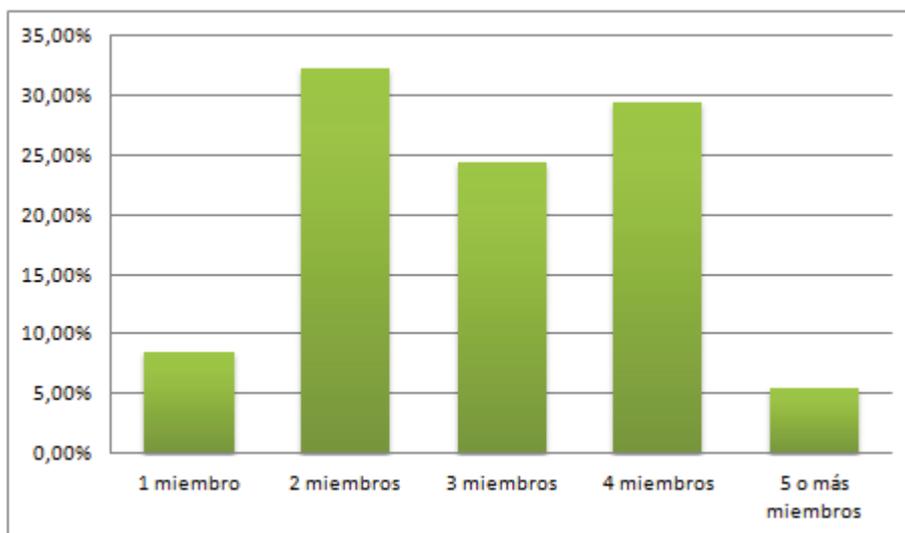


Figura 5.6: Tamaño del Hogar.

La mayoría de la población encuestada tiene sueldos entre 1000 y 1500 €/mes. Este hecho implica una mayor dependencia del vehículo a motor por parte de los usuarios y, por tanto, una mayor facilidad de acceso (figura 5.10). El alto porcentaje de jóvenes con sueldos inferiores a 500€/mes se explica por una mayoritaria condición de estudiantes.

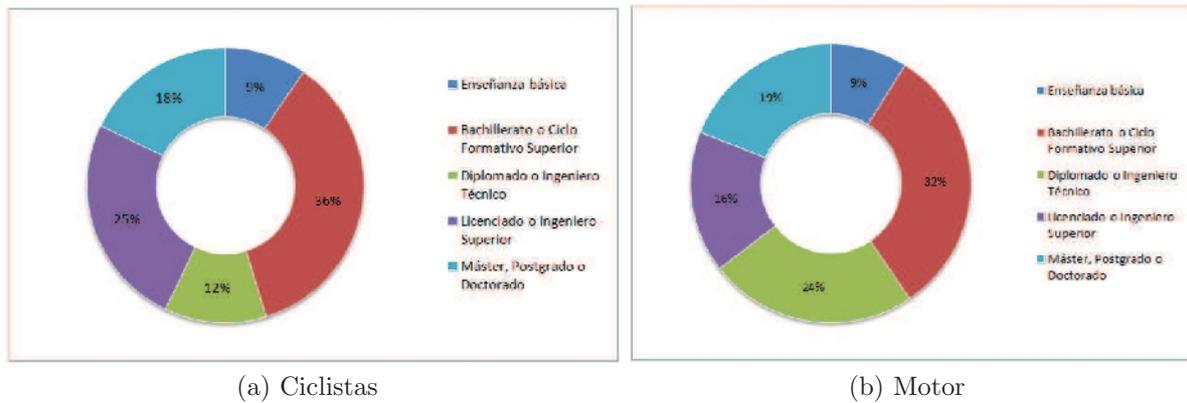


Figura 5.7: Nivel de estudios

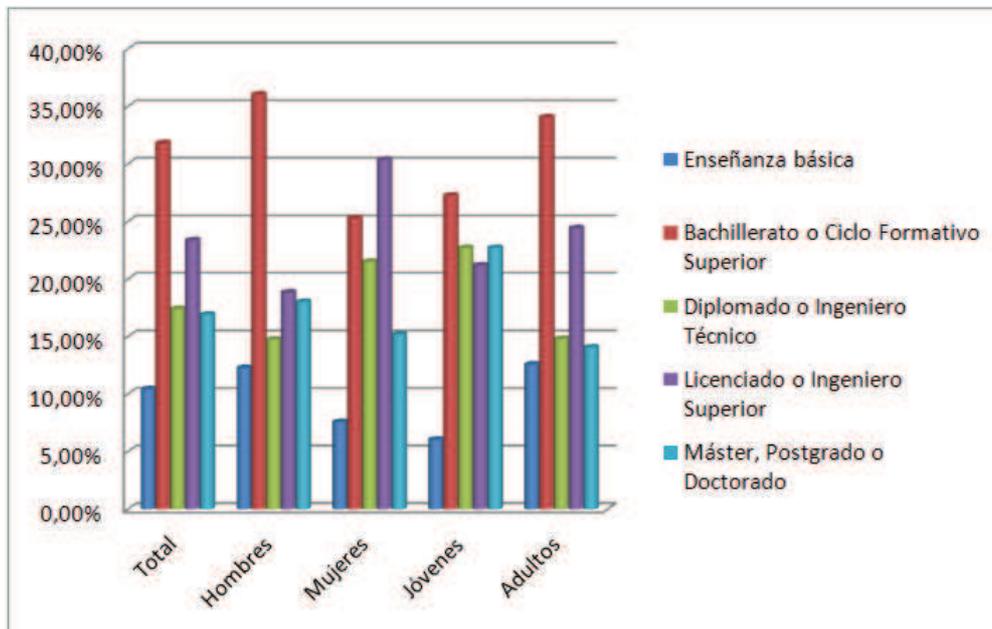


Figura 5.8: Nivel de estudios.

La relación directa existente entre el nivel de ingresos y la disponibilidad de coche se aprecia en los resultados obtenidos en la encuesta. Tal y como aparece en la figura 5.11, se percibe la disminución de la disponibilidad o posesión de coche por parte de los usuarios cuando tienen una renta inferior. La disponibilidad más baja de vehículos se da

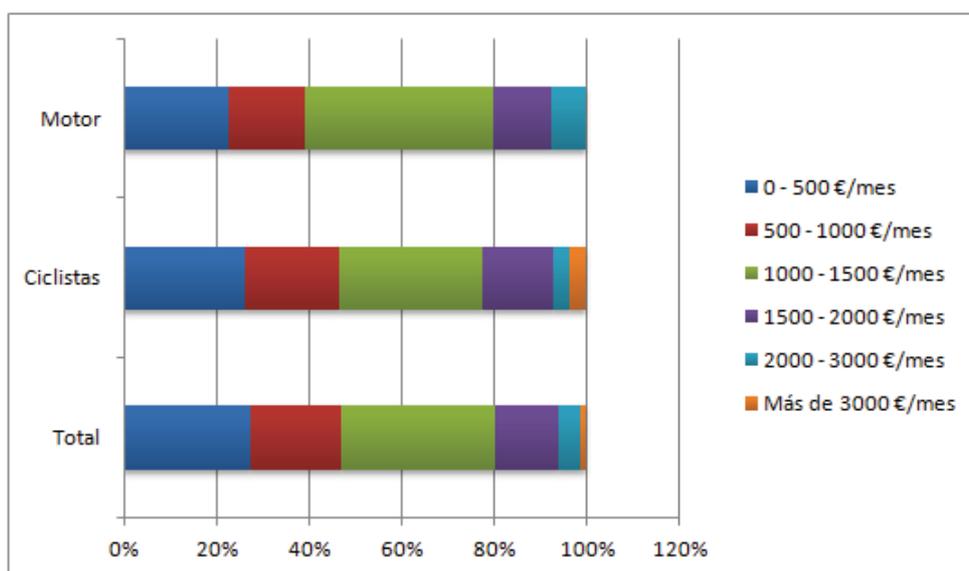


Figura 5.9: Nivel de ingresos.

entre los usuarios de menor renta (500 €/mes).

Al incrementar la perspectiva de análisis desde el punto de vista de los ingresos, se atiende a la relación de la movilidad con el resto de modos disponibles en la ciudad. Se presentan los datos obtenidos de la muestra para el municipio de Málaga.

Se aprecia como la mitad de los hombres no posee ningún tipo de bono transporte. Dicha disposición posee una relación directa con el nivel de ingresos medio y la ocupación para este sexo, condicionando un uso del vehículo privado en la mayoría de los desplazamientos. Por el contrario, las mujeres son partidarias del uso del transporte público. Se relaciona con la mayor posesión del bono transporte y se destaca como la mayoría de mujeres se decantan por el bono para el modo bus, seguido de la posesión del bono para bus y metro. Diferenciando a usuarios por la edad, los adultos tienen una mayor preferencia por la posesión de ambos abonos de transporte (bus y metro).

Como aclaración, se incluye la disponibilidad del bono transporte para el modo metro aunque a niveles del número de usuarios no se han tenido en cuenta debido a la reciente puesta en servicio como modo de transporte dentro del municipio. La media de disponibilidad de abono del metro para las diferentes agrupaciones, por sexo y edad, no

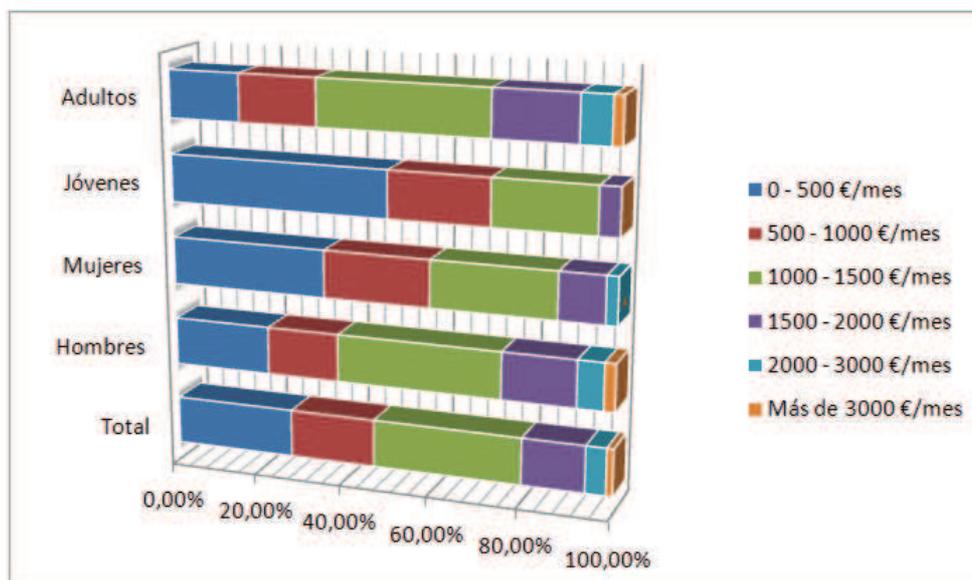


Figura 5.10: Nivel de ingresos.

alumbra notables diferencias. Se puede observar estos resultados en la figura 5.12.

Centrado en el uso de la bicicleta, al igual que la posesión del coche fomenta un mayor uso de éste, la disponibilidad por parte de los usuarios de tener bicicleta facilita su uso como modo de transporte. La disponibilidad de la bicicleta va asociada a diversos factores como la posibilidad de espacio en el hogar para depositarla. Anteriormente se asociaba la posesión de la bicicleta al condicionante de la edad. Con el cambio de paradigma que la movilidad ha sufrido en la mayoría de ciudades y, en especial, en el municipio de Málaga, no existe diferencias notables entre la disponibilidad de la bicicleta y el rango de edad de los usuarios. Sin embargo, cuando se comparan datos de posesión de la bicicleta con el sexo de las personas, los datos presentan un mayor número de usuarios masculinos con disponibilidad de bicicleta, facilitando su uso como modo de transporte habitual.

La situación actual que se vive en el municipio de Málaga es diferente con la incorporación del servicio de bicicleta pública (*"málagabici"*), en un total de 23 estaciones repartidas por las zonas de mayor tránsito de la ciudad. La puesta en marcha de este servicio, unido con las situaciones económica y social actuales, ha supuesto un aumento

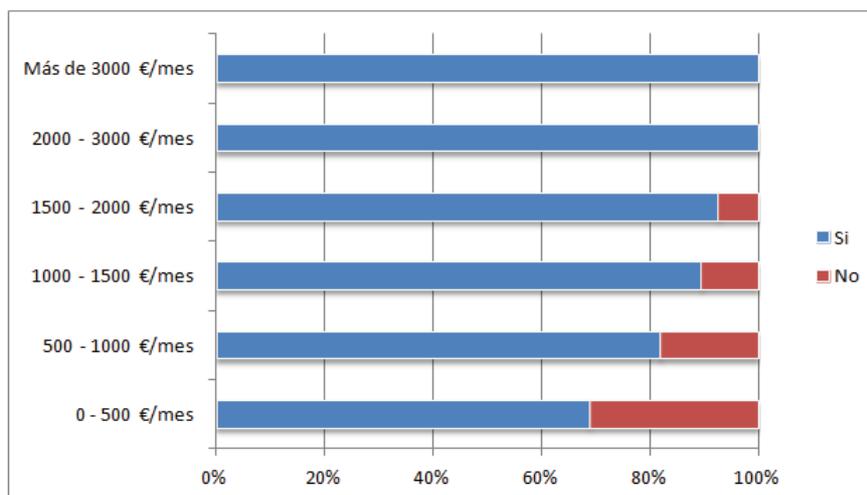


Figura 5.11: Nivel de ingresos y disponibilidad de coche.

en el reparto modal de la bicicleta según datos del “Estudio de Demanda de Movilidad en la ciudad de Málaga”³. Produciéndose un aumento del 0,4 % en el año 2008 hasta un 1,6 % del reparto modal para la bicicleta en el año 2014. El sistema “málagabici” supone un cambio de mentalidad en los usuarios, modificando la percepción de uso de la bicicleta como modo de transporte. Dicho servicio ha variado lo determinante que resulta la posesión de tener o disponer de bicicleta para elegir este modo a la hora de realizar los desplazamientos.

Las respuestas por parte de los encuestados, en relación con la ocupación laboral, indica unos índices de paro más elevados que la media nacional. Esto tiene una incidencia especial en el nivel de paro del colectivo de los jóvenes, que repercute directamente en el número de viajes y trayectos realizados a diario con motivo de trabajo.

La diferencia de ocupación por sexo de la muestra de población encuestada es insignificante. Existe una leve superioridad en el número de mujeres cuya ocupación es el estudio y hay un mayor número de hombres cuyo motivo de viaje obligatorio es el trabajo, tal y como puede apreciarse en la figura 5.14.

³elaborado por el Observatorio de Medio Ambiente Urbano del ayuntamiento de Málaga y Agenda 21 de Málaga

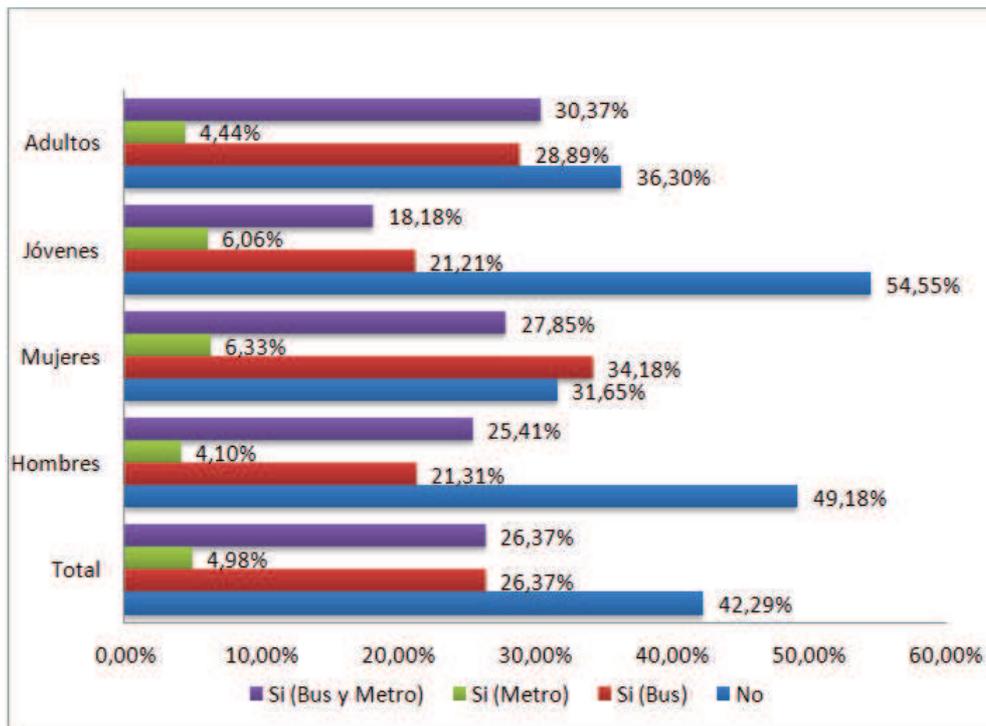


Figura 5.12: Disponibilidad del bono transporte.

También se muestra una mayor proporción de usuarios, dentro del grupo de adultos, cuya ocupación es el trabajo. Por el contrario, entre los encuestados menores de 30 años, hay un número elevado de estudiantes (33%). Este dato es comprensible debido a un rango de edad directamente relacionado con la época estudiantil de la población.

Si se analiza el efecto que produce la dedicación personal de cada usuario con su elección del modo de viaje se pueden observar indicadores de elección propios para el municipio (figura 5.15). Los desempleados tienen a la bicicleta como el modo de transporte que más se usa, seguido del modo a pie. Es lógico pensar que las características económicas y las situaciones laboral y social de este colectivo condicionan la elección del modo de transporte. Se hace notable un mayor uso de los modos de transportes más económicos como la bicicleta y el caminar.

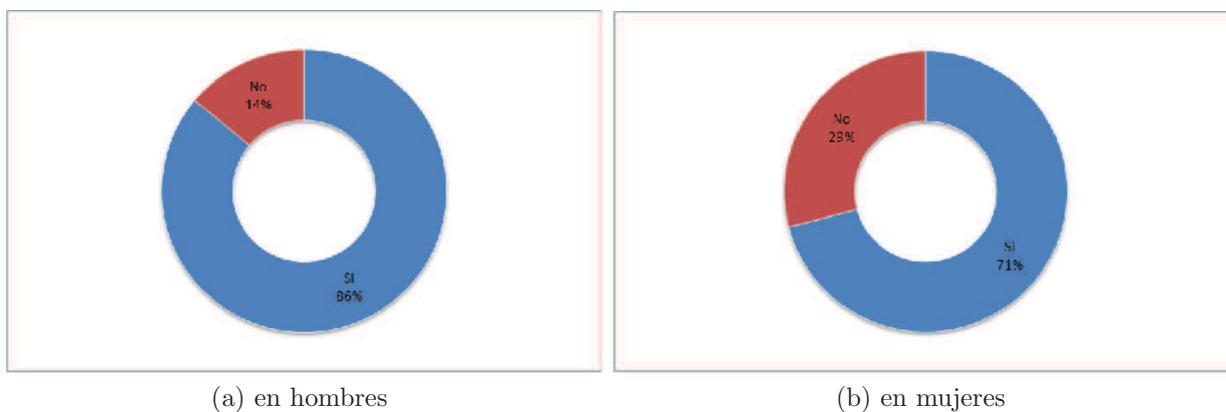


Figura 5.13: Disponibilidad de la bicicleta.

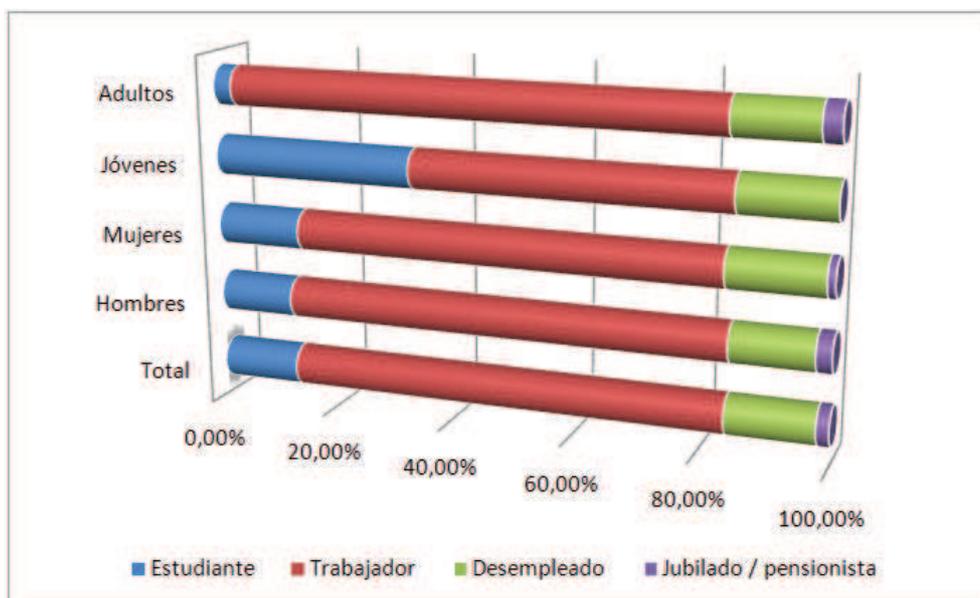


Figura 5.14: Ocupacion.

El grupo de trabajadores tiene un mayor uso de los modos de transporte a motor, destacando el coche como primera opción. A pesar de todo se señala un alto porcentaje de trabajadores cuyos desplazamientos se realizan en bicicleta. Se debe fundamentalmente a la alta participación en la encuesta de ciclistas y usuarios habituales de la bicicleta como modo de transporte. Sin embargo, los jubilados tienen como medio de transportes habituales el coche, el bus y a pie, respectivamente. Como último grupo analizado se

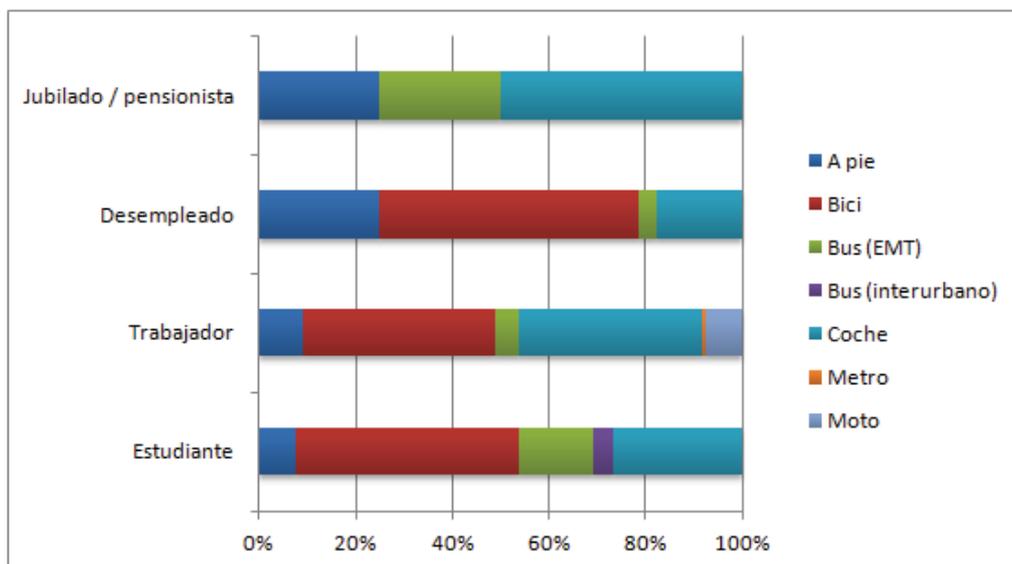
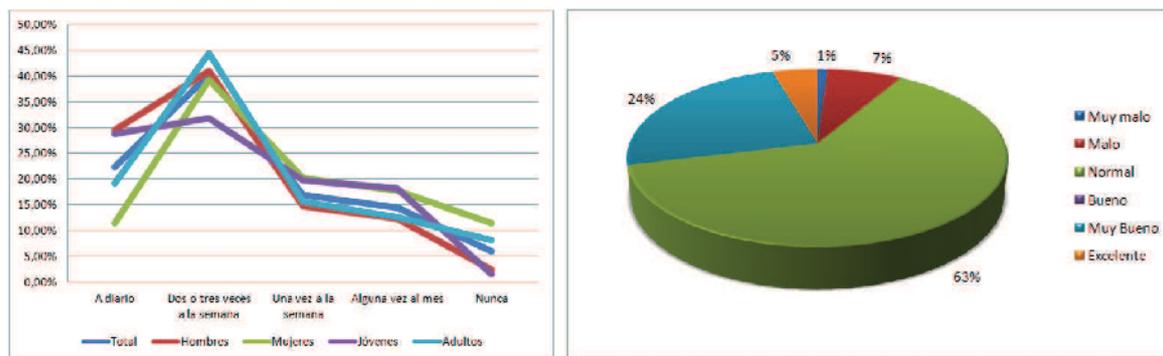


Figura 5.15: Ocupacion y motivo del viaje.



(a) Frecuencia de actividad deportiva

(b) Percepción del estado físico personal

Figura 5.16: Hábito deportivo y Estado físico.

encuentran los estudiantes. A priori se predispone un mayor uso de la bicicleta y el modo a pie, condicionado por una capacidad económica que condiciona una elección del modo de transporte más económico. Por ello el uso de la bicicleta es el más popular entre los estudiantes dentro del municipio de Málaga, seguido del modo coche y bus.

En el análisis realizado con anterioridad sobre las variables y condicionantes que afectan a los usuarios, a la hora de elegir la bicicleta como modos de transporte, se

contempla la relación directa existente entre el estado físico y la edad^{35 21}. Para tener presente estos indicadores, en la encuesta se realizaron preguntas relacionadas con el hábito deportivo de los usuarios y el estado físico. La primera pregunta trata de analizar la rutina de actividad física asociada a cada uno de los usuarios. Con la segunda pregunta, se obtiene la valoración personal que tiene cada uno de los encuestados sobre el estado físico en el que se encuentran. Es preciso profundizar en un análisis futuro de este tipo de variables debido a la complejidad de cálculo y subjetividad que conllevan.

Identificación de la Movilidad. El conjunto de preguntas realizadas en este apartado, para conocer e identificar los viajes realizados por los encuestados, es extenso. Formado por diferentes tipos de preguntas se desglosa como sigue:

- Origen del viaje: las preguntas se basan en conocer con exactitud el inicio del viaje por parte del encuestado. Se realiza un tratamiento de datos y se incorporan las respuestas en la base de datos de movilidad creada en ArcGIS. Los encuestados responden preguntas sobre el nombre de la calle, la hora de inicio del viaje y el código postal.
- Destino del viaje: preguntas cuya finalidad es analizar donde termina el viaje de los encuestados dentro del municipio de Málaga.
- Motivo y Modo del viaje: se analiza el cómo realizan el desplazamiento y con qué finalidad.
- Motivo y Frecuencia del uso de la bicicleta: son un conjunto de preguntas centradas sobre el uso de la bicicleta por parte de los usuarios encuestados.

Las preguntas relacionadas con la hora de inicio de viaje y hora de llegada no están presentes en estas consideraciones, pero si se tendrán en cuenta en líneas futuras de investigación para el análisis del modelo de transporte de la ciudad. Al igual que los datos de los horarios, en las preguntas realizadas en el cuestionario se pretendía obtener información del punto de partida y del punto de finalización del viaje. Se entienden como datos imprescindible para calcular las matrices orígenes destino (O/D) de la movilidad. Las respuestas recogidas de las encuestas se tratan y adaptan a la zonificación elaborada

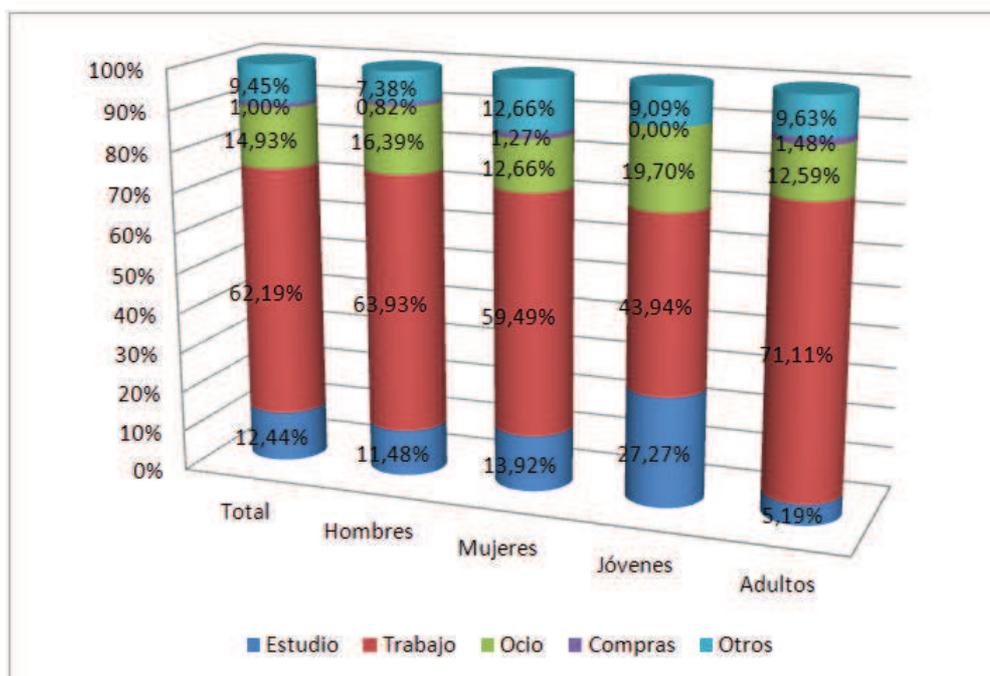


Figura 5.17: Motivo del viaje.

para el desarrollo de esta tesis especificando, para cada uno de los viajes, la zona de inicio y fin de los desplazamientos.

Para este grupo de preguntas se destacan las referidas al modo y motivo del viaje. Se tiene en especial consideración la posibilidad de intermodalidad o combinación de modos de transportes en el caso de realizar el viaje en diferentes etapas, y la frecuencia y motivo del uso de la bicicleta como modo de transporte.

En la figura 5.17 se presentan se desglosan en los diferentes porcentajes correspondientes al motivo del viaje: estudios, trabajo, ocio, compras y otros. Desde la perspectiva general de la población total, la mayoría de los viajes tienen como motivo el trabajo. Algo lógico considerando que dentro de la población muestral de la encuesta hay un gran porcentaje cuya situación laboral es activa. Sin embargo los desplazamientos con motivo estudios tiene un papel destacado entre el grupo de jóvenes. Al estar formado por personas menores de 30 años es lógico que exista un mayor porcentaje de usuarios

cuyo motivo de viaje sean dichos estudios.

Un breve análisis del modo de viajes de los encuestados revela una mayor participación de usuarios habituales de la bicicleta como modo de transporte (figura 5.18). Por ejemplo se destaca un uso del autobús menor de lo esperado. El metro de Málaga empieza a consolidarse como modo de transporte dentro del municipio, especialmente para las mujeres que son las que tiene una mayor predisposición a la hora de elegirlo como medio de transporte habitual. Sin embargo, cuando se comparan los modos de viaje en los diferentes grupos de la población hay algunas diferencias a señalar. El mayor usuario del autobús como modo de transporte sería una mujer joven. Por el contrario, los hombres mayores de 30 años consideran a la bicicleta como un modo de transporte importante.

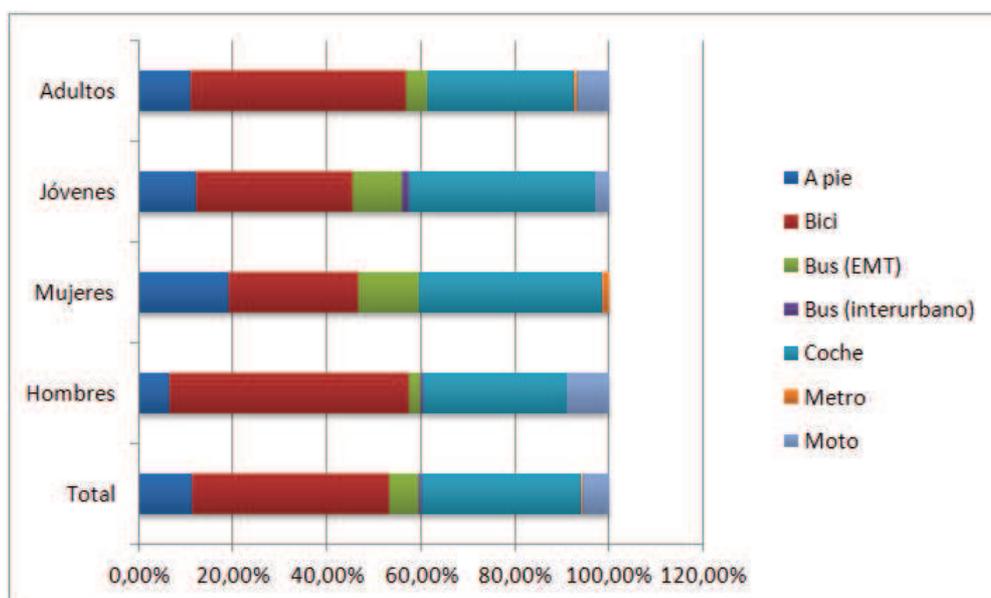


Figura 5.18: Modo del viaje.

En futuros análisis se plantea la posibilidad de realizar estudios de modos de transporte en comparación con distancias recorridas, marcado por la prioridad individual de cada uno de los usuarios a la hora de elegir modo de transporte. Desde este punto de partida, se puede tomar nuevas pautas de diseño a la hora de llevar a cabo nuevas

políticas de movilidad sostenible en el entorno metropolitano de Málaga.

Con la intención de conocer de una manera exhaustiva el itinerario de viajes, se han realizado preguntas relacionadas con la posibilidad de combinación con otros modos de transporte a la hora de realizar el desplazamiento diario de cada persona. Como primer apartado, se desglosa los resultados obtenidos que definen el modo de viaje elegido por los diferentes usuarios a la hora de realizar la segunda etapa del viaje. Algo más del 50 % de los usuarios no utiliza otro modo de transporte, realizando una única etapa de viaje (figura 5.19.)

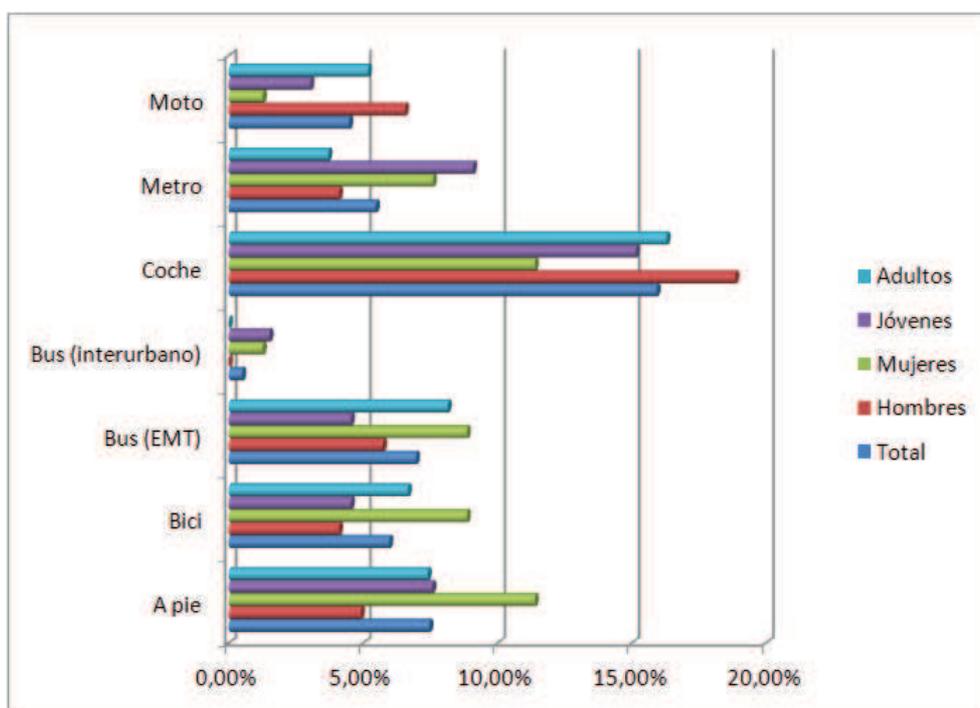


Figura 5.19: Modo del viaje (segunda etapa).

El modo de transporte elegido para realizar la segunda etapa de viaje es dispar entre los diferentes grupos de usuarios. El coche sería el gran protagonista teniendo gran parte del total de viajes. Los más propensos a su uso son los hombres y adultos. Mismo papel tiene la moto para estos usuarios. La disposición al uso del metro por parte de las mujeres y de los jóvenes se ve reflejado en los resultados de viajeros que el Metro de

Málaga está cosechando pese a su juventud. Los desplazamiento en bus son preferidos como segunda etapa de viaje por mujeres y adultos. Los modos de desplazamientos a pie y en bici coinciden en un usuario tipo: la mujer, como principal compromisario en la segunda etapa de sus viajes.

Del total de usuarios encuestados existe una minoría que utiliza un tercer modo de transporte en sus desplazamientos habituales. Entre la elección como tercer modo de transporte se destaca el modo a pie, con un reparto similar entre los diferentes grupos en los que se ha clasificado la muestra. El modo bici es actor importante como tercer modo de transporte, y este protagonismo es paralelo a la consolidación del servicio de préstamo de bicicleta pública en la ciudad.

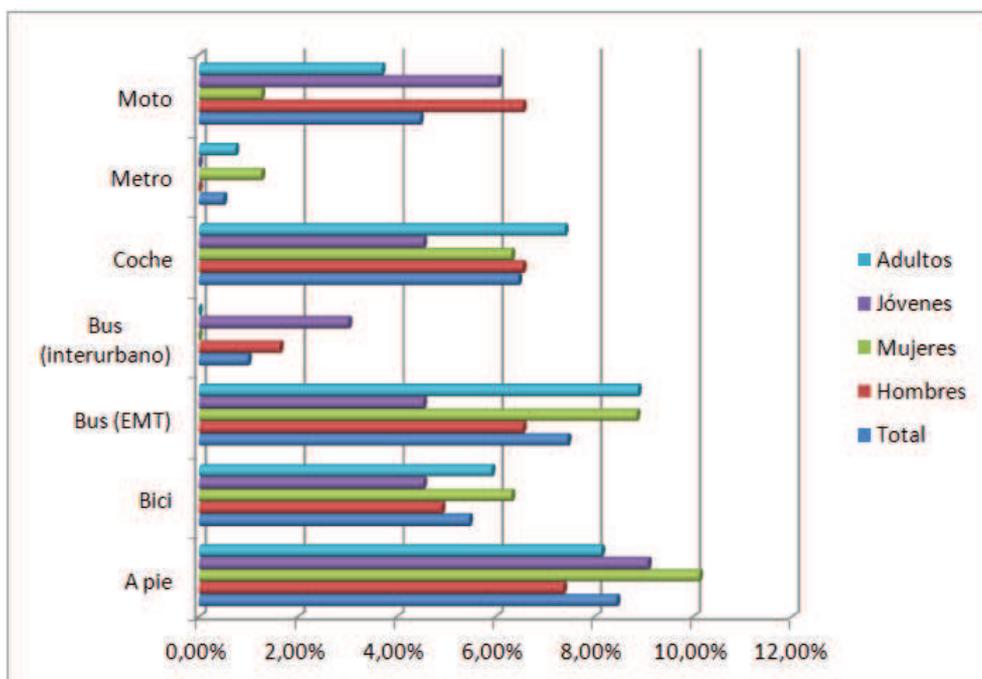


Figura 5.20: Modo del viaje (tercera etapa).

Movilidad en bicicleta. El análisis de los hábitos respecto al uso de la bicicleta de cada usuario ayuda a comprender parte de la elección individual de los encuestados y

permite plantear futuras políticas urbanas y de movilidad que hagan más atractivo ese modo de transporte sostenible en la ciudad. Un factor determinante a la hora de elegir el modo de transporte es la experiencia y costumbre en el uso de la bicicleta. Tal y como se adelantó en el capítulo 2, *Estado del Arte*, aquellos usuarios cuyo hábito de uso de la bicicleta sea mayor serán más propensos a elegir la bicicleta como modo de transporte habitual.

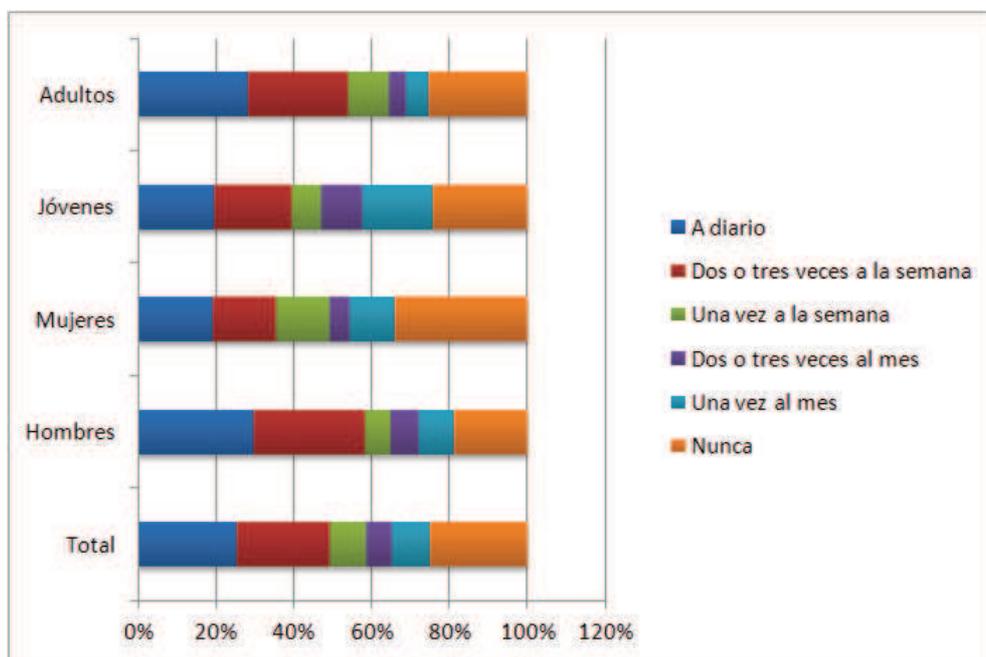


Figura 5.21: Frecuencia de uso de la bicicleta.

La importancia de este factor se manifiesta claramente en el reparto modal descrito por los encuestados, lo cual es algo evidente al tener en cuenta el perfil de usuario que ha realizado la encuesta. Como muestra, en la figura 5.21 se presentan los resultados obtenidos sobre la frecuencia de uso de la bicicleta. La descripción del usuario habitual en el municipio de Málaga, sería un varón con una frecuencia de uso de dos o tres veces por semana. Por otra parte, existe una mayoría de usuarios adultos cuyos hábitos de uso de la bicicleta es mayor que en los jóvenes.

Relacionando el hábito de la bicicleta con el motivo de su uso se obtiene una infor-

mación interesante para elaborar los diferentes perfiles de usuarios que circulan habitualmente por las calles del municipio. El ciclista habitual tiene un motivo de uso principal: el trabajo. Cerca del 50 % de usuarios que eligen la bicicleta como reparto modal habitualmente lo hacen con motivo de desplazamiento para el trabajo, seguido de los estudios. Se evidencia unos desplazamientos con motivos claramente obligados en el día a día de las personas.

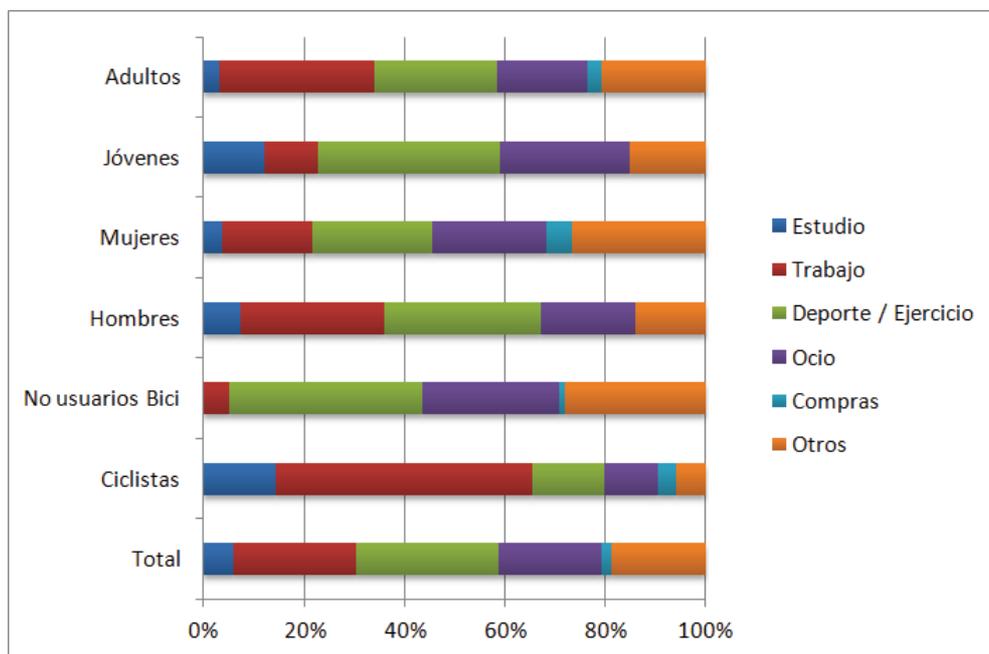


Figura 5.22: Motivo uso bici.

Los no usuarios habituales tienen como motivo principal el deporte, seguido del ocio, destacando una frecuencia de uso para este perfil de usuarios muy baja (figura 5.22). Un análisis de los factores disuasorios que afectan al no uso de la bicicleta permitiría un mejor ajuste en los objetivos e intencionalidad de las políticas a plantear para el diseño de las infraestructuras de carriles bici.

El uso de la bicicleta por parte de los jóvenes, como motivos obligados (trabajo o estudio), es mínimo. La causa puede deberse a una percepción de uso de la bicicleta exclusivamente para el ocio y deporte, excluyendo así un uso habitual en la manera de

desplazarse diariamente. También se realiza una segunda elección sobre el motivo de uso de la bicicleta, y en este caso el ocio predomina como el principal motivo secundario por el que los encuestados usan la bicicleta, algo comprensible debido a las características climatológicas y turísticas del municipio.

Factores favorables al uso de la bicicleta. El objetivo final es comprender los factores o variables que afectan al comportamiento de los usuarios a la hora de elegir usar la bicicleta como modo de transporte. En la tesis, tras la radiografía realizada sobre la importancia de la percepción y subjetividad del usuario respecto al uso real de la bicicleta, se proponen una serie de preguntas capaces de valorar la importancia dada por los usuarios sobre diferentes factores que favorecen el uso de la bicicleta.

El proceso de elaboración de las variables, que analizan el uso de la bicicleta en el municipio de Málaga, se realizó en el trabajo presentado por Liñán⁸⁰ con la premisa de conocer las percepciones sobre los diferentes factores que favorecen el uso de la bicicleta. A continuación se exponen las conclusiones sacadas de dichas valoraciones sobre los factores que favorecen el uso de la bicicleta en el municipio.

1. Rapidez: los encuestados valoran la percepción que tienen de la bicicleta con respecto al tiempo de recorrido de los desplazamientos. Por ejemplo a la hora de evitar atascos, realizar trayectos de puerta a puerta, seleccionar alternativas de rutas más corta, etc.

La valoración total de los usuarios ofrece claramente una perspectiva global sobre la importancia que tiene la rapidez a la hora de elegir la bicicleta como modo de transporte. Casi la totalidad de los encuestados valoran, entre importante y fundamental, lo favorable que les resulta la rapidez como característica de la bicicleta (figura 5.23.)

Existen diferencias notables entre los ciclistas habituales y los no usuarios de la bicicleta. Los primeros consideran, entre fundamental y muy importante, la

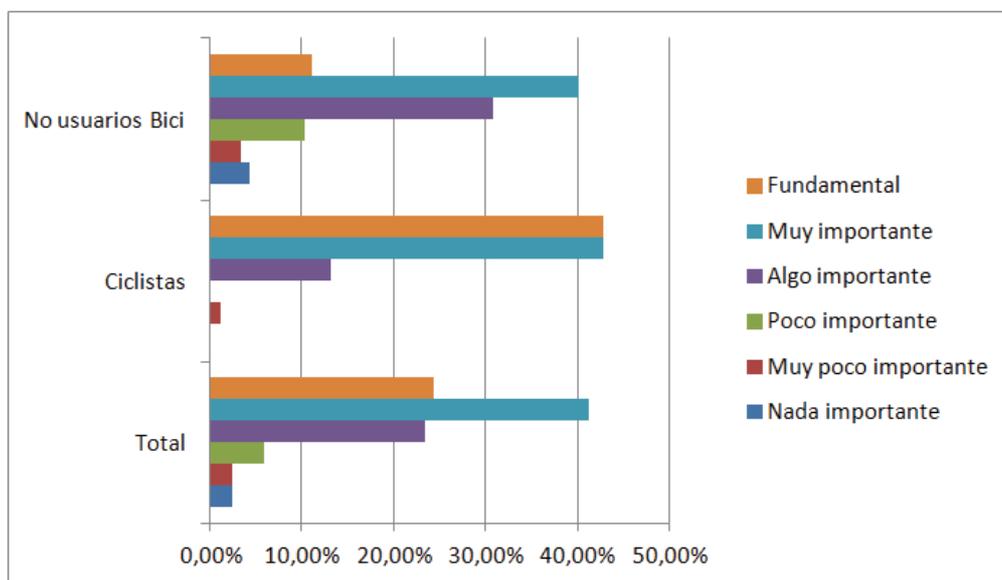


Figura 5.23: Factor favorable: rapidez.

rapidez que otorga la bicicleta como medio de transporte. Por otro lado, los no usuarios de la bicicleta tienen una valoración de la rapidez entre muy importante y algo importante. Es digno de mención reseñar que los usuarios de la bicicleta, al ser conocedores de las ventajas que ésta proporciona en los desplazamientos menores a 5 km., valoran con mayor importancia la rapidez de la bicicleta con respecto a otros modos de transporte. Desde el punto de vista de la edad, los jóvenes ofrecen mejor valoración a la rapidez. Desde la clasificación por sexos, los hombres consideran la rapidez como un factor favorable de uso de la bicicleta.

2. Libre de horarios: la flexibilidad de horarios es una de las principales características de la bicicleta. No conlleva tiempos de espera ni de búsqueda de aparcamientos, otorgando una mayor autonomía a la hora de desarrollar el viaje del usuario.

Este factor está valorado muy positivamente por parte de los encuestados. Más del 60 % considera fundamental o muy importante la libertad de horarios a la hora de elegir la bicicleta. Se observa un mínimo porcentaje de usuarios que valoran negativamente el horario como factor de uso. Debe relacionarse estos resultados

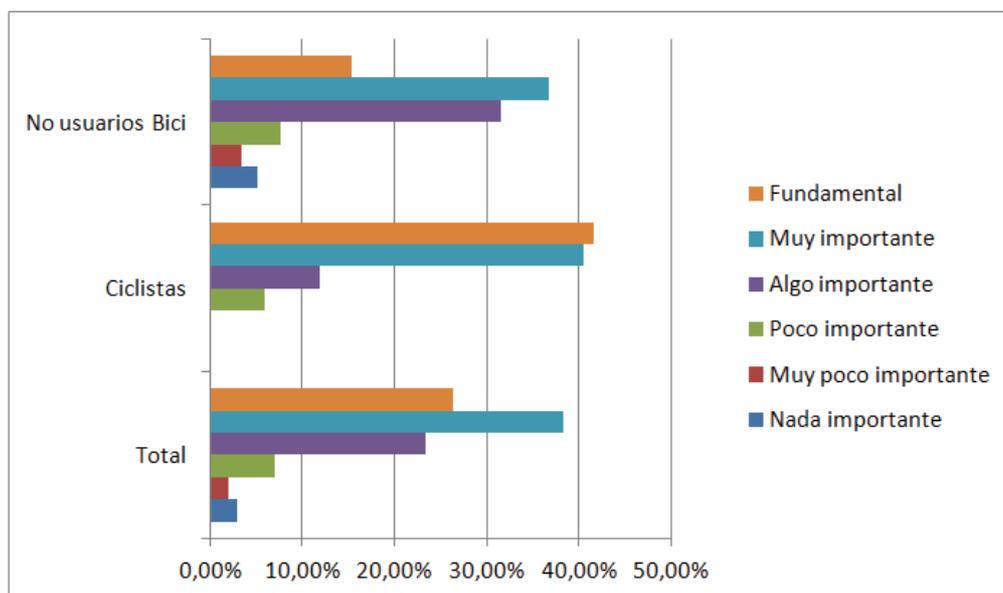


Figura 5.24: Factor favorable: horario.

con el hecho de que la bicicleta pública de Málaga tiene su uso restringido durante el horario nocturno. Al igual que en el factor anterior, los ciclistas tienen una valoración positiva de la bicicleta como modo de transporte al no tener horarios que dificulten o condicionen su uso (figura 5.24). Se marca un cambio de valoración en los no usuarios de la bicicleta, otorgándole éstos una mayor importancia a la libertad de horarios.

3. Económico: son conocidas las ventajas económicas existentes de la bicicleta frente a otros medios de transporte, basados en unos costes de adquisición menores junto con unos costes de reparación y mantenimiento muy bajos. En este aspecto la percepción por parte del total de usuarios es similar. Desde el punto de vista de los ciclistas, más del 50% creen fundamental esta variable para su uso. Seguido de más del 30% de los usuarios que lo creen muy importante. Los no usuarios de bicicleta cambian el valor de la importancia sobre el efecto económico de la bicicleta, con una mayoría que consideran muy importante esta variable, seguida de los usuarios cuya percepción es de fundamental. Se destaca la percepción dada por los jóvenes, como consecuencia de las propias características de este grupo, que condicionan de

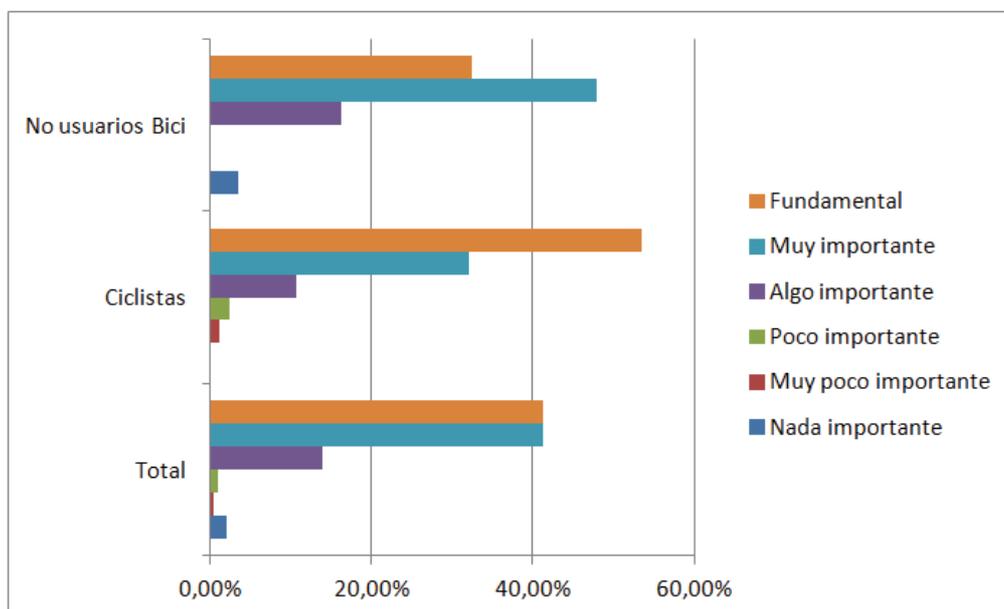


Figura 5.25: Factor favorable: economico.

manera subjetiva a valoración de dicha variable.

4. Saludable: el uso de la bicicleta proporciona múltiples beneficios sobre la salud. De una manera genérica, todos los usuarios valoran positivamente los beneficios físicos que aporta el uso de la bicicleta. Se considera fundamental o muy importante el efecto que produce la bicicleta sobre el estado físico personal, convirtiéndose en un valor que favorece y apoya el uso de la bicicleta como medio de transporte. No se destaca diferencias de percepción relacionables con la edad o el sexo (figura 5.26.)
5. Ecológico: este factor está relacionado con la no contaminación que produce el uso de la bicicleta, es decir, cero emisiones en su uso, la no producción de gases de efecto invernadero y una emisión de ruido mucho menor que el resto de los vehículos. Desde un punto de vista global de los encuestados (figura 5.27.) existe una relación muy directa entre la importancia otorgada a la bicicleta y la contaminación. Se considera como importante este valor a la hora de favorecer el uso de la bicicleta como modo de transporte. Son los ciclistas los que le otorgan una mayor valoración. Se muestra por tanto una mayor conciencia con los temas ambientales y, en

definitiva, con la movilidad y la sostenibilidad.

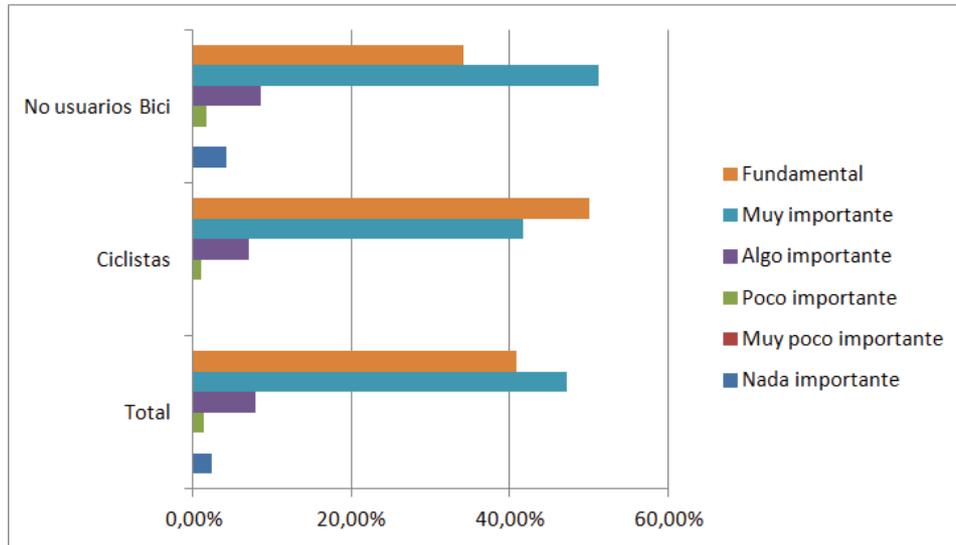


Figura 5.26: Factor favorable: saludable.

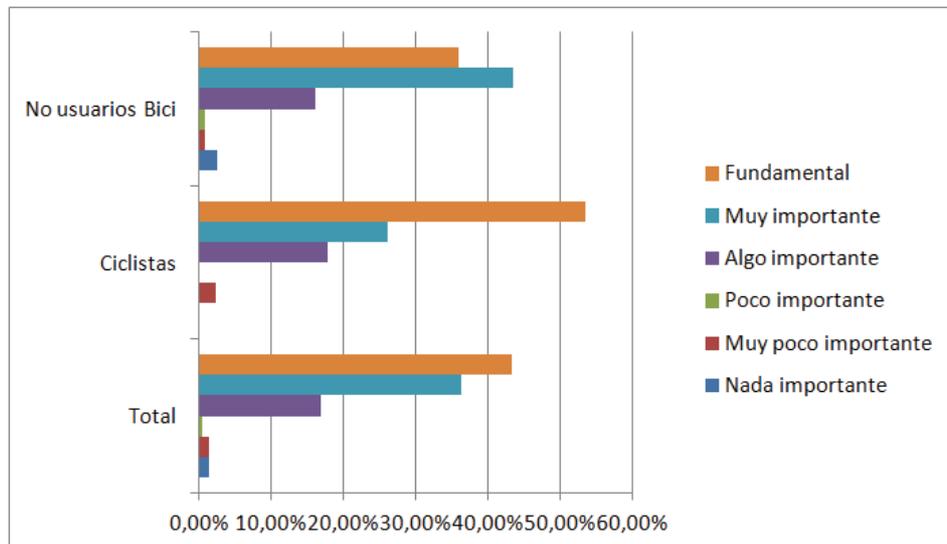


Figura 5.27: Factor favorable: ecologico.

6. Divertido / Atractivo: (figura 5.28) consiste en valorar las sensaciones individuales de los usuarios relativas a la libertad de movimientos, la felicidad producida con

su uso, etc. Las respuestas se reparten por la importancia dada en cada uno de los casos. Los valores de percepción son equivalentes para las respuestas de fundamental, muy importante y algo importante. Se destaca que el factor divertido o atractivo no es un condicionante tan influyente para el aumento de uso de la bicicleta como modo de transporte. Hay diferencias entre las percepciones de este valor de los ciclistas y los no usuarios de bicicleta. Los primeros valoran como fundamental el atractivo de usar la bicicleta. Por el contrario, los no ciclistas no valoran tan positivamente esta variable para ser determinante a la hora de elegir la bicicleta.

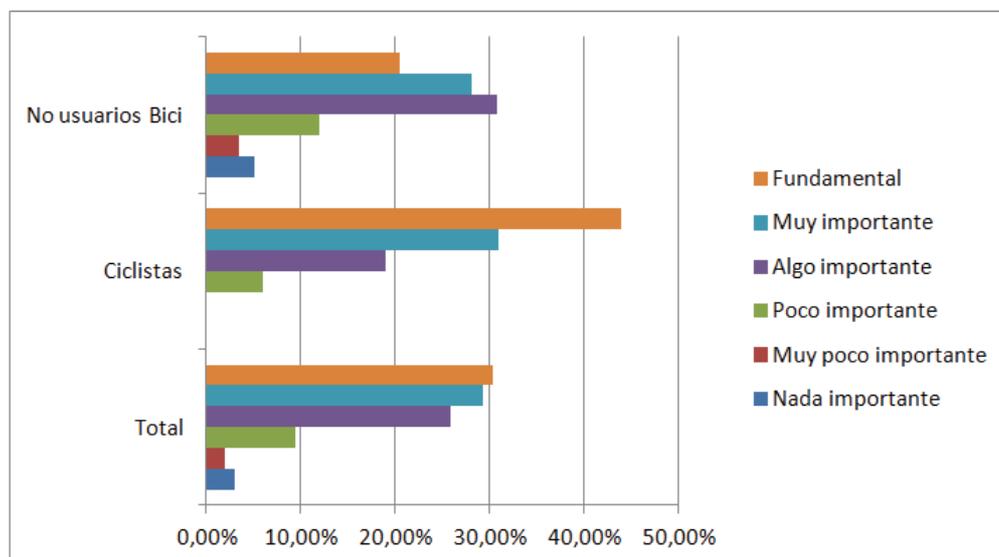


Figura 5.28: Factor favorable: divertido / atractivo.

Los factores que favorecen el uso de la bicicleta han sido valorados positivamente por parte de los encuestados. Tal y como reflejan los resultados obtenidos, se obtiene una media superior al 4.7 sobre 6. Esto supone una catalogación de estos factores como *algo importante*, muy cercanos a *muy importante*. Las percepciones de los usuarios pasan a ser consideradas como aptas para la adaptación e implementación del software y su aplicación al caso en particular del municipio de Málaga.

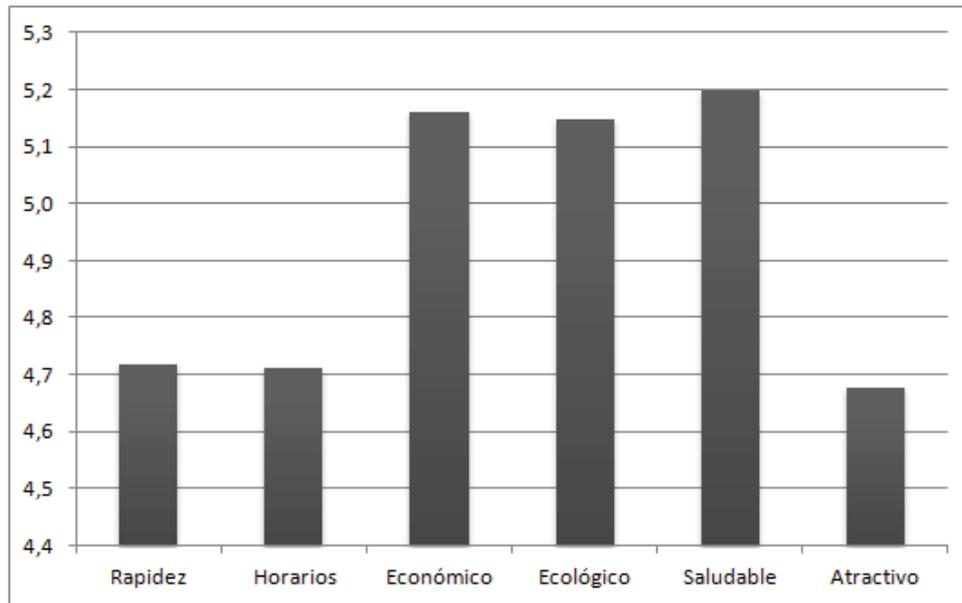


Figura 5.29: Resumen factores favorables uso bici.

El factor mejor considerado por los encuestados es el factor saludable y representa la importancia dada por ellos al estado físico y los beneficios que produce el uso de la bicicleta en la salud personal (figura 5.29). Sin embargo, desde la perspectiva de los no usuarios de la bicicleta, se valora el motivo de uso de la bicicleta con fines deportivos. Después de este factor se encuentra el económico y el ecológico. El primero presenta una mayor atracción para los usuarios, dependiendo de la situación económica y laboral de los encuestados. Por otro lado, la importancia del valor ecológico evidencia el aumento sobre la conciencia en temas relacionado con la movilidad y la sostenibilidad. De este modo, se confirma el cambio de paradigma sufrido en la sociedad respecto a la incorporación de la bicicleta como modo de transporte.

Existe un último bloque que engloba los factores sobre rapidez, libertad de horarios y la diversión y/o atractivo, ambos con consideraciones muy parecidas. Los factores de rapidez y libertad de horarios tienen una alta valoración, confirmando a la bicicleta como una alternativa real del transporte en el municipio. La valoración sobre el factor atractivo y divertido afianza la importancia que tiene el diseño de las infraestructuras de carriles bici para facilitar un recorrido cómodo, seguro y placentero entre las diferentes

tipologías de usuarios de la bicicleta.

Factores disuasorios de la movilidad ciclista. Se realizaron un conjunto de preguntas capaces de medir la importancia otorgada por los encuestados sobre cuáles son los mayores factores que afectan negativamente al uso de la bicicleta en la ciudad. En capítulos anteriores de la presente tesis, se ha recogido un conjunto de variables que penalizan el uso de la bicicleta. De este modo se exponen a continuación algunas de las preguntas realizadas en el cuestionario, culminando con el resumen y análisis de las respuestas de los encuestados para el caso de estudio en cuestión.

Los factores analizados como disuasorios de la movilidad ciclista son los siguientes:

1. Distancias: la eficiencia de la bicicleta como modo de transporte está sujeta a desplazamientos de distancias pequeñas^{97 66}. El aumento de las distancias a recorrer puede suponer un inconveniente a la hora de elegir la bicicleta como modo de transporte. La respuesta de los encuestados sobre la importancia de estas distancias difieren para el grupo de usuarios habituales de la bicicleta y los no habituales (figura 5.30). Los primeros no otorgan demasiada importancia a la realización de recorridos con distancias mayores. Mientras que los no usuarios de la bicicleta sí se ven más condicionados a la hora de realizar desplazamientos más largos.
2. Orografía: se trata de averiguar la percepción de los usuarios respecto al obstáculo que supone las pendientes a la hora de usar la bicicleta. En datos generales, la orografía es un factor algo o muy importante para los usuarios dentro del municipio pero para los habituales a la bicicleta la orografía es menos importante a la hora de elegirla como modo de transporte. Por el contrario, los no usuarios de la bicicleta dan una mayor importancia a este factor a la hora de tomar la decisión sobre su uso (figura 5.31). Existe una mayor importancia de esta variable para las mujeres, condicionadas por la falta de hábito en el uso de la bicicleta.
3. Tiempo: este factor tiene una relación directa con la distancia recorrida. A partir de los estudios realizados por Tilahun¹¹⁶, se comenzó a considerar la importancia

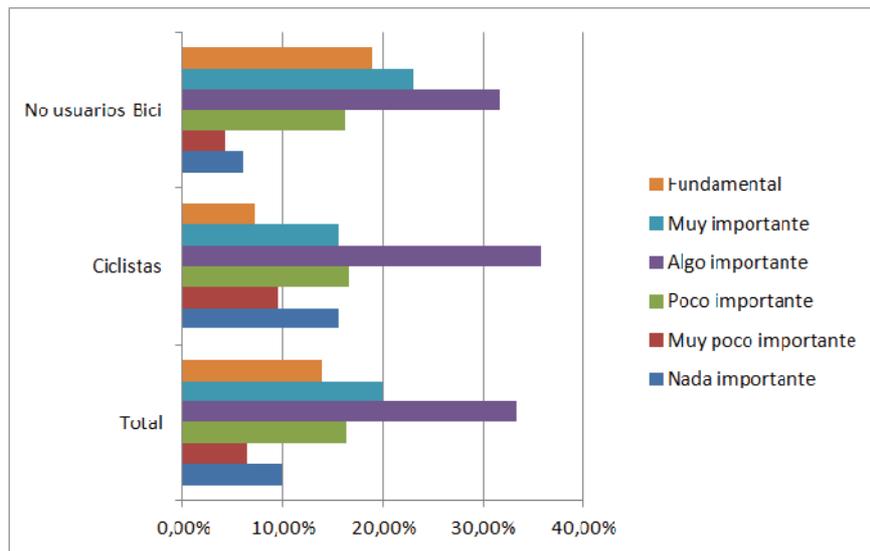


Figura 5.30: Factor disuasorio: distancia.

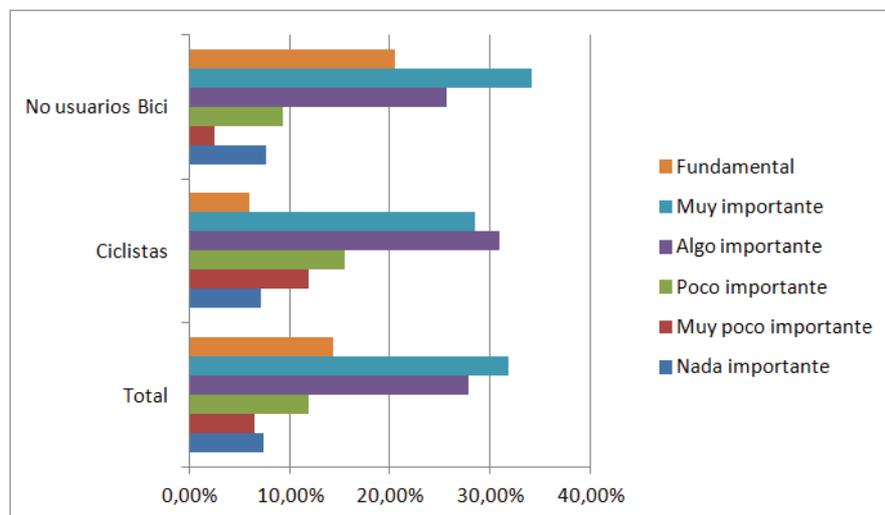


Figura 5.31: Factor disuasorio: orografía.

de analizar la percepción de los encuestados sobre el tiempo de viaje estimado para los desplazamientos en la bicicleta. Se analizan los resultados para los dos grupos diferenciados de usuarios. Los ciclistas, o usuarios habituales de la bicicleta, consideran entre algo importante y poco importante el tiempo de viaje empleado.

En contraposición, los no usuarios de la bicicleta otorgan una mayor importancia al tiempo de viaje como factor disuasorio para la movilidad ciclistas, como se demuestra en la figura 5.32.

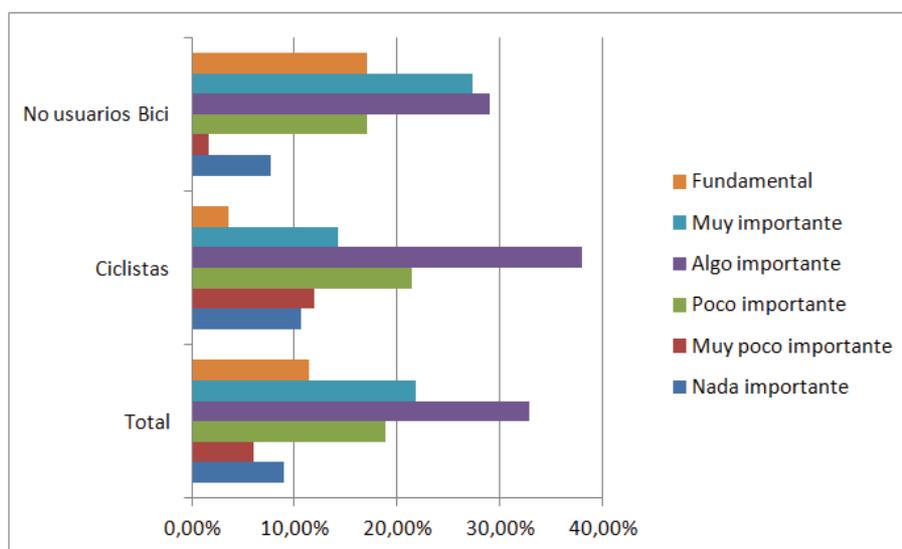


Figura 5.32: Factor disuasorio: tiempo.

4. Climatología: es un factor claramente geográfico. En sociedades nórdicas, este factor no afecta al uso de la bicicleta, salvo casos extremos de nieve o hielo. En el caso del municipio de Málaga, los factores climatológicos adversos condicionan altamente el uso de la bicicleta. La percepción negativa es alta para el conjunto de los usuarios (figura 5.33), existiendo una mayor importancia para los no usuarios de la bicicleta.
5. No posesión de bicicleta: la posesión y/o disposición del vehículo es un factor directo a la hora de elegirlo como modo de transporte ⁴, y por tanto la posibilidad de disponer de la bicicleta aumenta su facilidad de uso como modo de transporte. Para los encuestados este factor tiene gran importancia. Los ciclistas otorgan una mayor importancia a la disposición de bicicleta como factor disuasorio (figura 5.34). Esto se entiende por el uso mayoritario de la bicicleta privada por parte de los

⁴Ortuzar2000

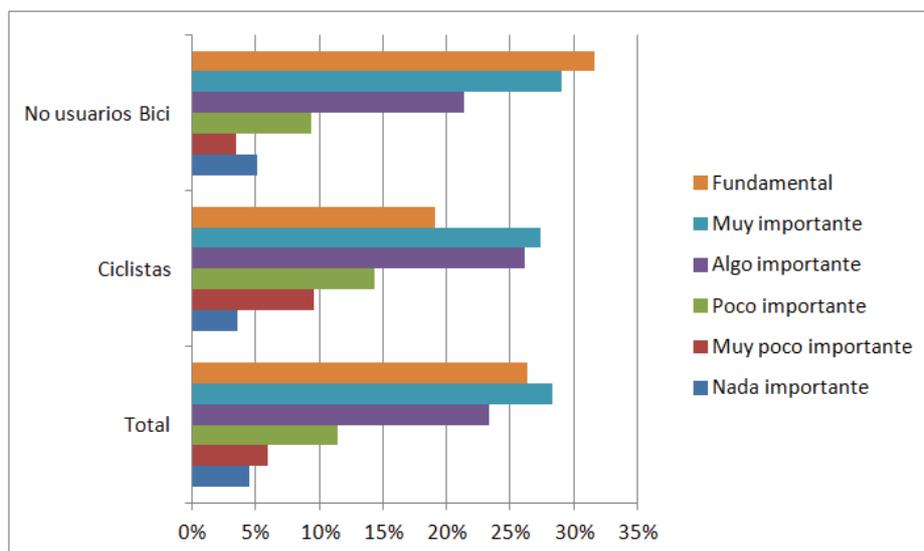


Figura 5.33: Factor disuasorio: climatología.

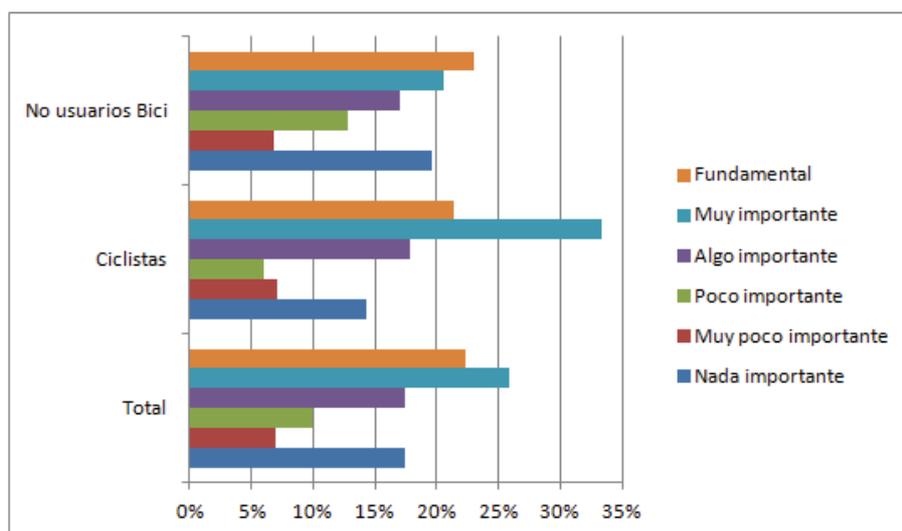


Figura 5.34: Factor disuasorio: no tener bici.

ciclistas aunque se debería analizar datos del servicio de préstamo de la bicicleta pública para concluir mejores resultados.

- Seguridad: uno de los principales factores a medir es la percepción del riesgo por parte de los encuestados. La disponibilidad de infraestructura de carriles bici y la

tipología determinan los diferentes niveles de seguridad percibidos por los usuarios. En el análisis de las encuestas, se demuestra la gran importancia dada a este factor. Destaca la importancia otorgada a esta variable, incluso mayor en los no usuarios de la bicicletas. Se puede ver como consideran este factor como fundamental cerca de un 35% de los usuarios no ciclistas (figura 5.35.), resaltando que los usuarios que consideran más importante la seguridad como factor disuasorio de la movilidad ciclista son las mujeres.

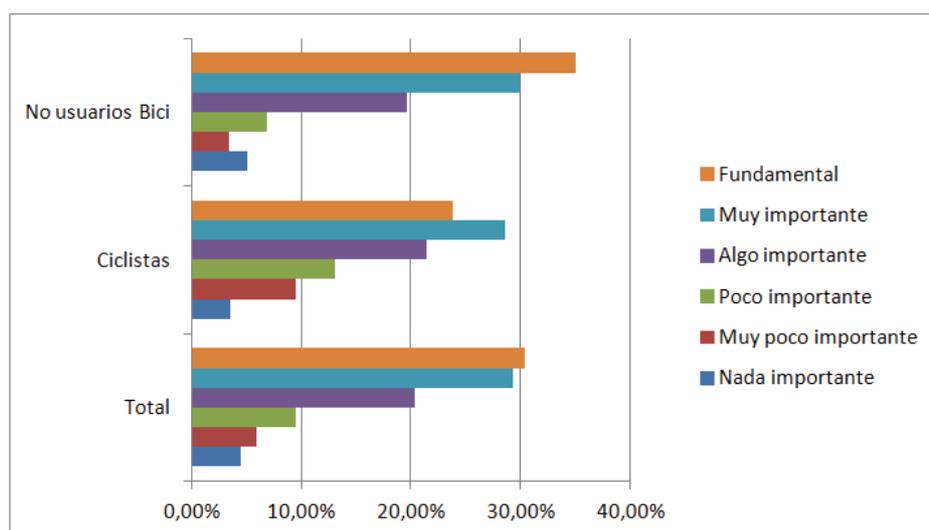


Figura 5.35: Factor disuasorio: seguridad.

- Contaminación: existe dos variables muy relacionadas, la contaminación y el ruido durante el trayecto. Ambas son producidas por un exceso de vehículos de tráfico rodados que circulan. Los niveles de contaminación vienen definidos por el IMD⁵ de la vía. Son los ciclistas los usuarios que consideran la contaminación como un factor disuasorio importante (figura 5.36). Este análisis puede deberse a un mayor conocimiento de la situación de la ciudad adquiridos por los hábitos de uso de la bicicleta.

⁵IMD: esta dato señala la Intensidad media diaria medida en vehículos/día. También puede tenerse en cuenta datos sobre IMDP (intensidad media diaria de vehículos pesados medida en vehículos pesados-día).

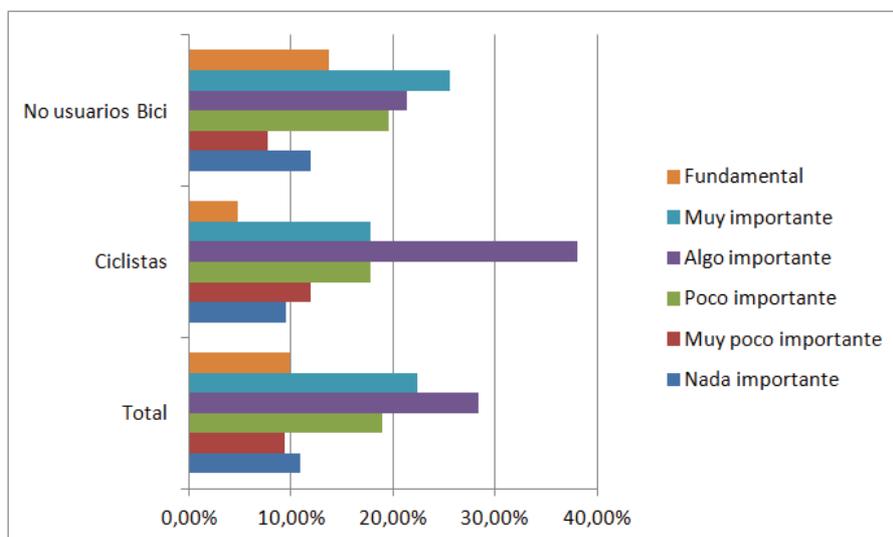


Figura 5.36: Factor disuasorio: contaminación.

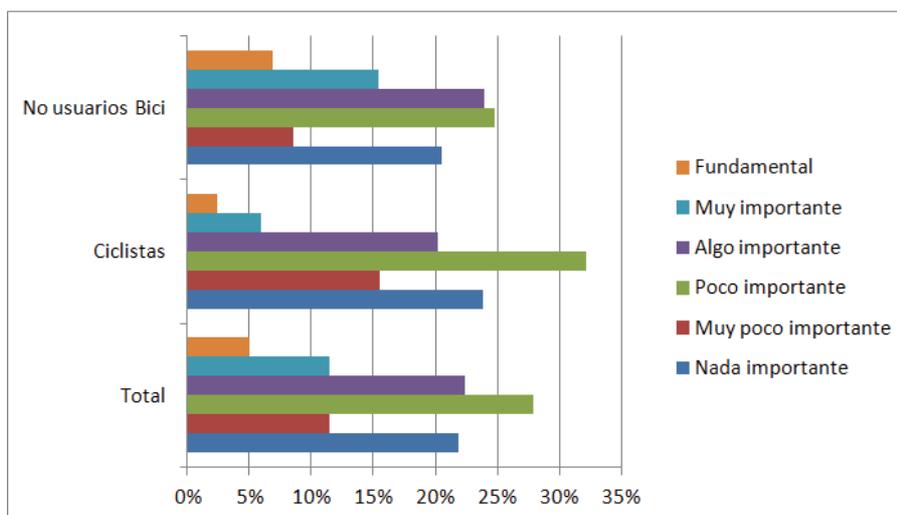


Figura 5.37: Factor disuasorio: ruido.

8. Ruido: junto con la anterior variable, este factor está directamente condicionado con el IMD de las vías que forman la red urbana del municipio. Al contrario que ocurre con el factor de contaminación, los ciclistas no consideran el ruido un factor que repercuta en el uso de la bicicleta, mientras que los no usuarios de la bicicleta si le otorgan una mayor importancia. Los adultos y mujeres son

los usuarios que perciben el ruido como un factor disuasorio de la movilidad ciclista.

9. Robo: la percepción sobre el miedo al robo o vandalismo es un factor muy importante a la hora de elegir la bicicleta como modo de transporte. El nivel de influencia percibido en los encuestados es alto. Se destaca en los no usuarios de la bicicleta con una valoración de muy importante el miedo al robo. Pero son los ciclistas los que valoran con una mayor influencia negativa el miedo al robo, respondiendo más del 60% de los encuestados con una percepción entre muy importante y fundamental. Esto es debido a un uso de la bicicleta particular por parte de cada uno de los usuarios. Tal y como se puede observar en la figura 5.38, las mujeres otorgan una mayor importancia a esta variable como factor disuasorio.

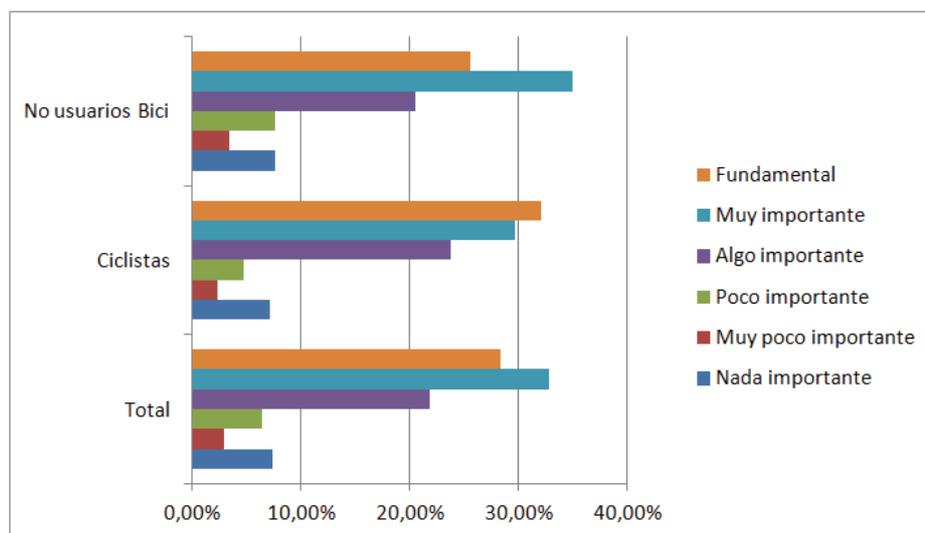


Figura 5.38: Factor disuasorio: robo.

10. Falta de aparcamientos: la falta de instalaciones para dejar la bicicleta, en unas condiciones óptimas, condicionan la elección de la bicicleta como modo de transporte, en especial de la bicicleta privada. Diferenciando entre ciclistas y no usuarios de la bicicleta, son éstos últimos los que otorgan mayor importancia, como efecto disuasorio, a la falta de instalaciones para aparcar la bicicleta.

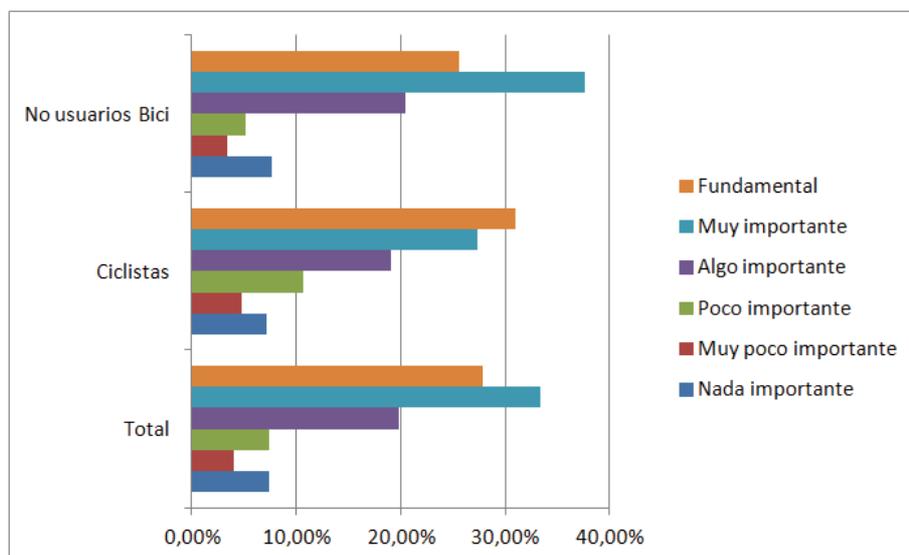


Figura 5.39: Factor disuasorio: aparcamiento.

11. Falta de instalaciones complementarias: en la revisión científica se detectó diferentes patrones que afectaban a un aumento del uso de la bicicleta, favorecido por la existencia de diferente tipos de instalaciones: duchas en el trabajo, taquillas para cambio de vestuario, etc. La percepción de los encuestados sobre este factor no es tan dominante como las anteriores (figura 5.40), existiendo un mayor reparto entre las diferentes sensaciones de los encuestados. Los usuarios de bicicleta no tienen en gran consideración este factor a la hora de elegirla como modo de transporte. Por el contrario, son los no usuarios los que perciben que la existencia de diferentes instalaciones (duchas, taquillas, etc.) favorecen un mayor uso de la bicicleta.

12. Factor social: hace unos años se asociaba el uso de la bicicleta con un estatus social más bajo. La resolución de esta pregunta valora el cambio de comportamiento y percepción social producido por los diferentes usuarios del municipio de Málaga. De manera general, hay una clara mayoría que opina como nada importante el factor social a la hora de disuadir sobre el uso de la bicicleta. Se confirma el cambio de mentalidad producido en los últimos años, más aún desde la puesta en marcha del servicio de bici pública en la ciudad (figura 5.41.)

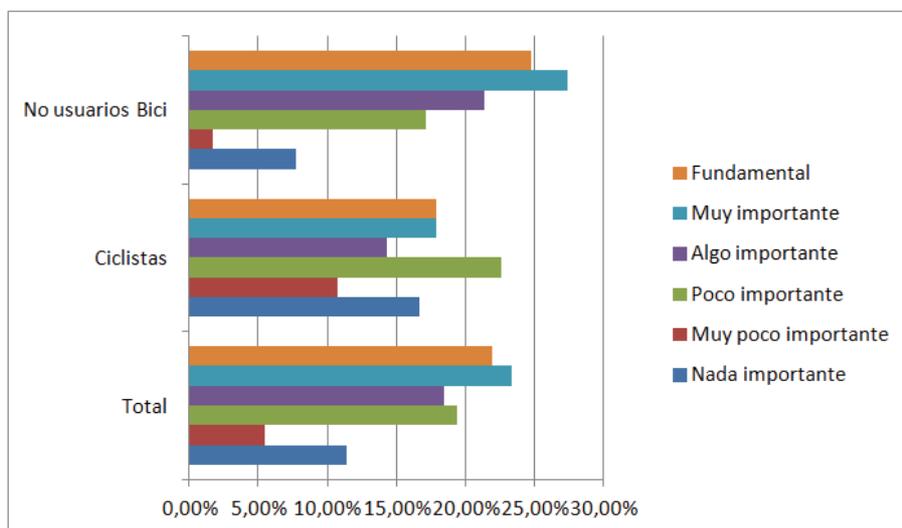


Figura 5.40: Factor disuasorio: instalaciones.

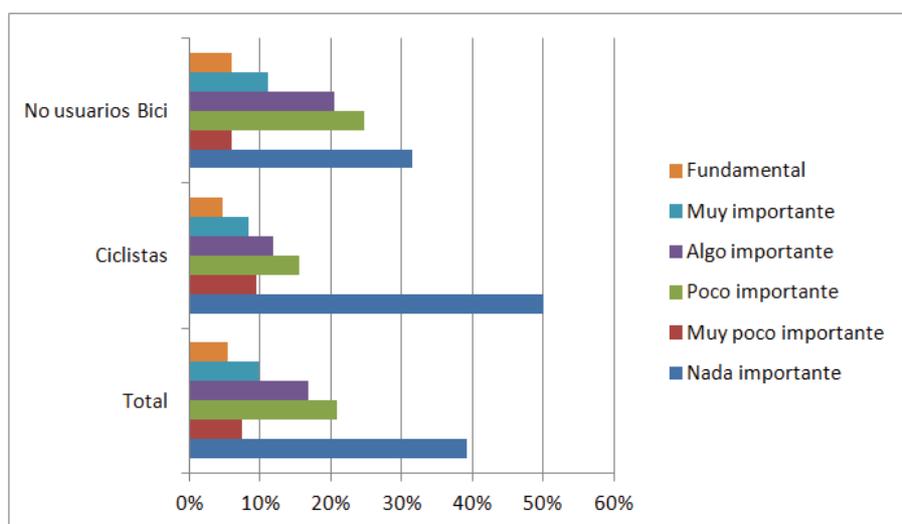


Figura 5.41: Factor disuasorio: social.

13. Continuidad del "carril bici": es considerado uno de los factores principales que afectan a la elección de la bicicleta como modo de transporte. Estudios como los realizados por Dill³⁴ y Rondinella¹¹⁰, demuestran la relación entre la existencia

y continuidad de las infraestructuras para la bicicleta y su aumento del reparto modal. Los ciclistas perciben este factor como fundamental a la hora de disuadir el uso de la movilidad ciclistas. Son los no usuarios de la bicicleta los que perciben la continuidad de los carriles bici como un factor fundamental y muy importante (cerca del 80 % de los encuestados) a la hora de no elegir la bicicleta como medio de transporte, como se puede observar en la figura 5.42. Las mujeres dan mayor importancia a este factor.

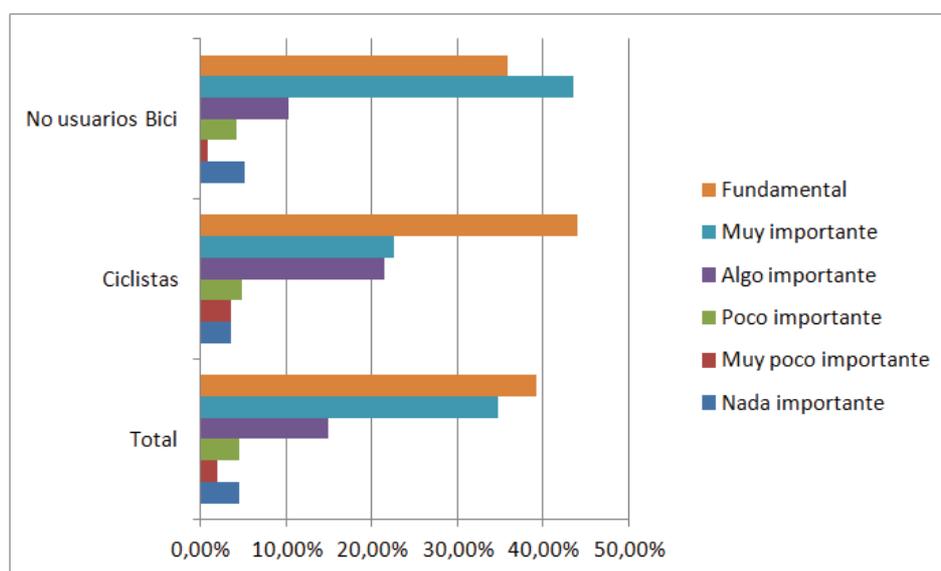


Figura 5.42: Factor disuasorio: continuidad carriles bici.

14. Señalización vial: la configuración de la ciudad es un factor director sobre el uso de la bicicleta. Una correcta señalización, capaz de informar a los diferentes usuarios de la vía pública, influye en la variación de seguridad de los usuarios, tal y como está representado en la figura 5.43. En el caso del municipio de Málaga, hay una rotundidad en la importancia que adquiere esta variable como factor disuasorio de la movilidad ciclista.

En la literatura existente hay partidarios de incorporar el estudio de este tipo de variables como parte de la modelización ciclista. Por el contrario, hay investigadores y

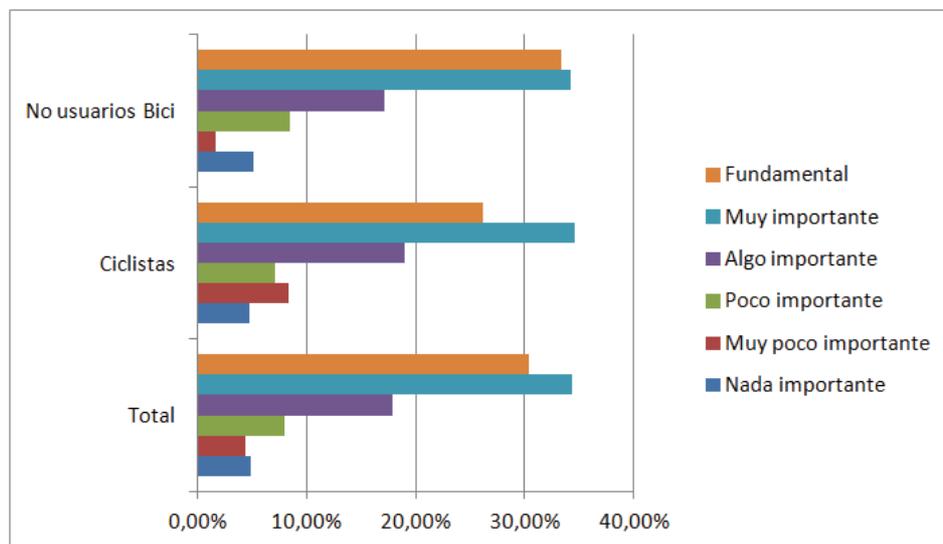


Figura 5.43: Factor disuasorio: señalización.

científicos que no consideran importante la utilización de las percepciones de los usuarios a la hora de aplicar las diferentes políticas de movilidad. En esta investigación, sabiendo de las dificultades del tratamiento de datos procedentes de la subjetividad de los encuestados, se toman en consideración dichas variables para el análisis de diferentes calibraciones sobre los posibles perfiles de usuarios y así desarrollar una optimización de las infraestructura de carriles bici.

Al igual que en el apartado relacionado con los factores que favorecen el uso de la bicicleta, las respuestas miden la percepción de los encuestados ante los diferentes factores. Como conclusión inicial se destaca como, en la mayoría de los factores disuasorios de la movilidad ciclista, se obtiene una valoración de *algo importante*. Una de las variables que destaca al no considerarse como disuasoria es *el factor social*. Se ha producido un cambio de mentalidad en los diferentes usuarios reconociendo a la bicicleta como partidario de la movilidad habitual de la ciudad. El factor del ruido no ha sido considerado de forma general como una limitación para el uso de la bicicleta. Aunque la contaminación si ha tenido un importancia para los encuestados como factor limitante del uso de la bicicleta.

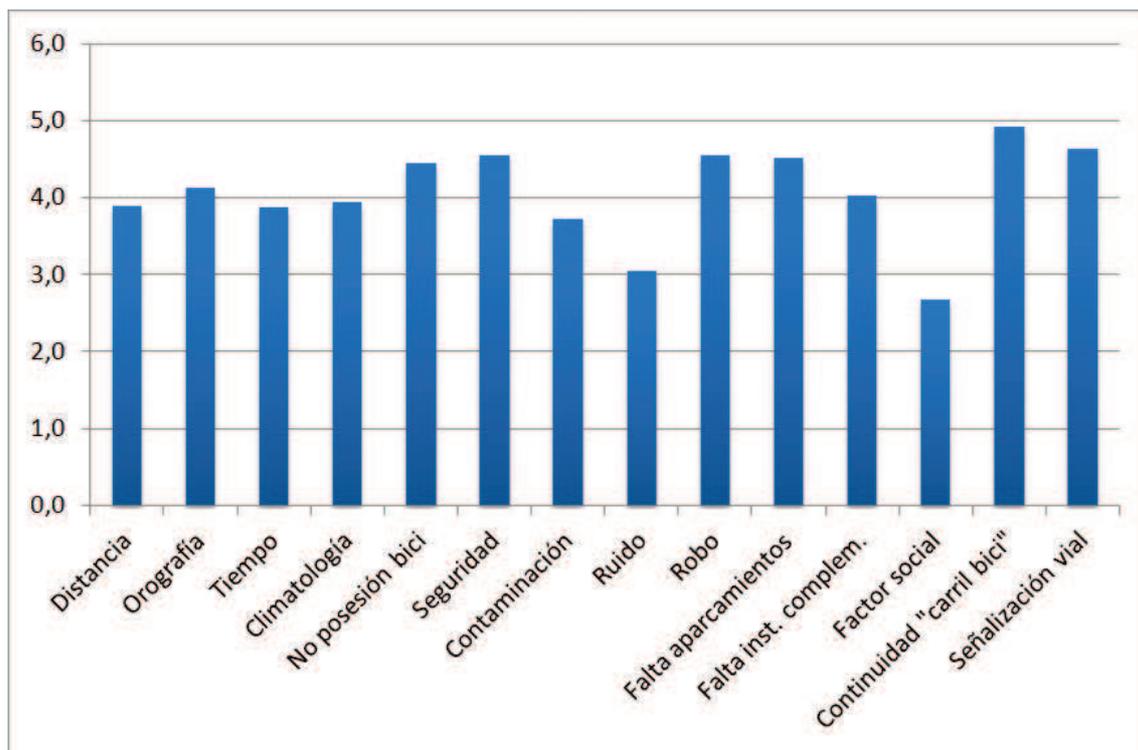


Figura 5.44: Valoración media Factores Disuasorios.

Se agrupan el resto de factores en la valoración de *algo importante*, con una especial acentuación en la distancia de viaje, orografía, tiempo de viaje, climatología y falta de instalaciones complementarias. Los encuestados dan una mayor importancia a los factores: no posesión de bici, robo, falta de aparcamientos y señalización vial. Éstas variables obstaculizan para mucho usuarios el uso de la bicicleta como modo de transporte. Una confirmación sobre las conclusiones previas realizadas en la revisión de la literatura investigada, se aprecia en la percepción de los usuarios frente a los factores de seguridad y continuidad del "carril bici".

Tendencia de uso de la bicicleta. En este apartado se analizan las percepciones de las preguntas relacionadas con el uso de la bicicleta. Se proponen algunos escenarios ficticios que representan situaciones y casos hipotéticos. Los encuestados valoran la percepción ante los diferentes escenarios señalando si usarían la bicicleta como modo de

transporte.

Una vez analizados y descritos los valores disuasorios e incentivadores del uso de la bicicleta como modo de transporte en el municipio de Málaga, se lleva a cabo la relación con los diferentes escenarios propuestos. En primer lugar, se trata de valorar la percepción de los diferentes usuarios sobre la intermodalidad de la bicicleta y si harían uso de ella en la última etapa de sus viajes. La pregunta en concreto era: *¿Realizaría en bici la última etapa de su viaje hasta el lugar de destino?*

De forma global para los diferentes encuestados, más del 33% afirman que usaría la bicicleta *diariamente* como modo de transporte para la última etapa de su viaje, tal y como se puede apreciar en la figura 5.45. Los usuarios cuyas respuestas fueron *varias veces por semana* se corresponden al 29% de los encuestados. Convirtiéndose en una mayoría los usuarios que tendrían la bicicleta como actor final de sus viajes. A la hora de distinguir la movilidad obligada, aquella formada por los viajes con motivos de trabajo y estudio, se aprecia una alta respuesta positiva de los usuarios capaces de incorporar la bicicleta en su modo de transporte con un uso habitual de la bicicleta.

Al diferenciar a los usuarios habituales de la bicicleta, se observa la alta aceptación de éstos hacia el uso de la bicicleta en la última etapa de sus viajes. El resultado positivo está condicionado a un uso habitual de la bicicleta como modo único de transporte para los ciclistas. Se presta atención a los no usuarios de la bicicleta debido a la disparidad en la apreciación de ésta como modo de transporte respecto a los ciclistas. Entre estos no usuarios de la bicicleta, domina la respuesta *nunca* realizaría en bici la última etapa del viaje (figura 5.45). Como se comprobó en los factores disuasorios de la bicicleta, el factor de las distancias largas es un condicionante más importante para este grupo, lo que implicaría un mayor esfuerzo a la hora de cambiar los hábitos de movilidad y facilitar la incorporación de la bicicleta en la última etapa de viaje.

Un análisis de los resultados de los diferentes grupos (edad y sexo) avalan las conclusiones obtenidas en los apartados anteriores relacionados con los factores disuasorios y favorables con la movilidad ciclista y el uso de la bici en el municipio de Málaga. Los usuarios con una mayor posibilidad de uso de la bicicleta como última etapa de viajes

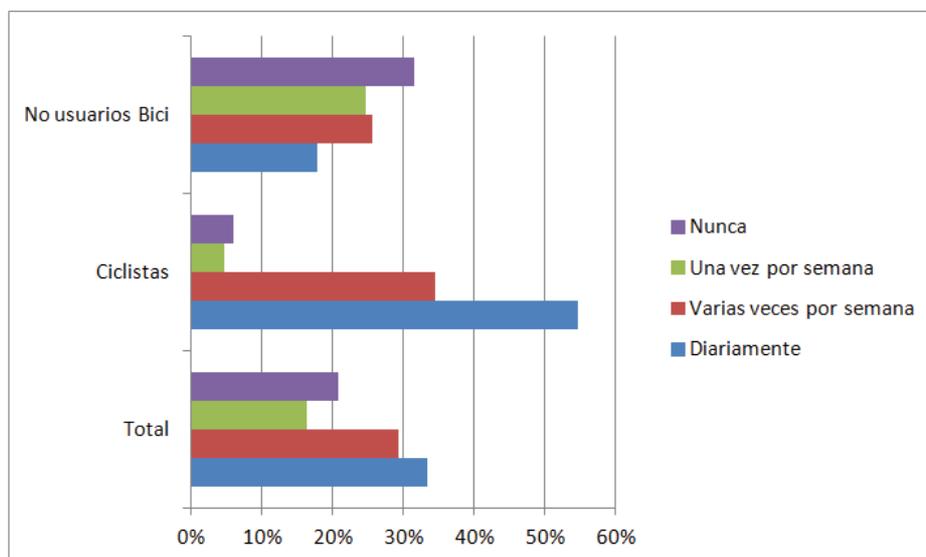


Figura 5.45: Valoración media de los Factores Disuasorios.

son los hombres, ya que poseen una percepción del riesgo menor a la hora de elegir la bicicleta en sus desplazamientos de movilidad obligada. En sentido contrario, las mujeres tienen una mayor percepción del riesgo y de las distancias a recorrer, encontrando en la bicicleta mayores obstáculos a la hora de elegirla en la última etapa de sus viajes.

En primer lugar, se propone como escenario ficticio para los diferentes usuarios la *existencia de una red completa de carriles para bicicletas*. Los encuestados valoran la frecuencia de uso que harían de la bicicleta como modo de transporte en sus desplazamientos habituales. La percepción de los diferentes usuarios está condicionada por las características socio-económicas, descripción del itinerario de sus viajes y, en especial, por la frecuencia de hábito en el uso de la bicicleta.

La propuesta del primer escenario, se llevó a cabo tras el análisis realizado por Liñán⁸⁰. La presencia de las infraestructuras para la bicicleta fue la causa más importante esgrimida por los diferentes usuarios dentro los factores a mejorar en la ciudad de Málaga, relacionados con la movilidad ciclista.

En la valoración sobre la **existencia de una red de carriles bici completa** para

el municipio de Málaga afecta especialmente la predisposición al uso de la bicicleta del encuestado. Se caracteriza por un 40 % de los usuarios con una posible frecuencia de uso *diaria* y con un 30 % cuyo uso de la bicicleta sería de *varias veces por semana* (figura 5.46). Los resultados presentados resaltan la importancia de ofrecer una infraestructura para la bicicleta en el municipio de Málaga.

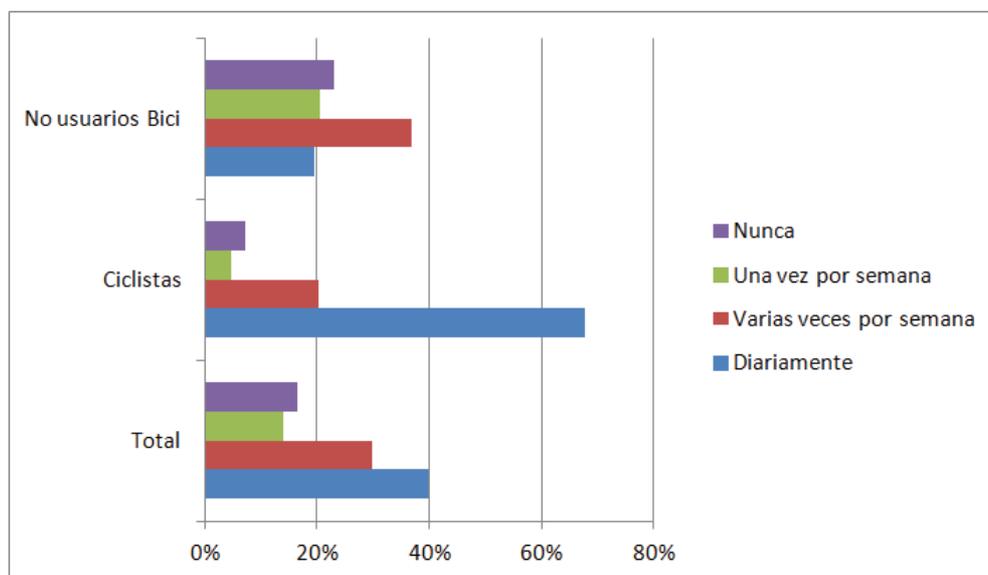


Figura 5.46: Escenario 1: Presencia de la red de carriles bici.

Especial atención merecen las conclusiones procedentes de los no usuarios de la bici. Un 20 % de los encuestados estarían dispuestos a usar la bicicleta diariamente si fuese disponibles realizar su desplazamiento habitual sobre una infraestructura específica para la bicicleta. Con un porcentaje cercano al 37 %, los usuarios utilizarían, con una frecuencia de varias veces por semana, la bicicleta como modo de transporte. Se establece por tanto una relación de su uso con el desplazamiento por motivos obligados, con lo que se produciría un aumento del reparto modal de la bicicleta en la ciudad. El alcance de estos resultados justifica la realización y el estudio presentados con posterioridad en este proyecto.

El porcentaje de usuarios que usaría la bicicleta con una frecuencia alta como modo

de transporte (considerando frecuencia alta un uso diario o varias veces por semana) permanece constante entre los diferentes grupos por edad y sexo.

En el caso de la **limitación del volumen y velocidad del tráfico**, se plantea como segundo escenario propuesto una situación a la hora de circular con la bicicleta por vías donde exista un control sobre la velocidad y el volumen de tráfico. La percepción de la seguridad por los diferentes usuarios está formada por factores de diversa índole. El volumen de tráfico afecta de una manera directa a la disminución de la seguridad y protección por parte de los usuarios¹²¹.

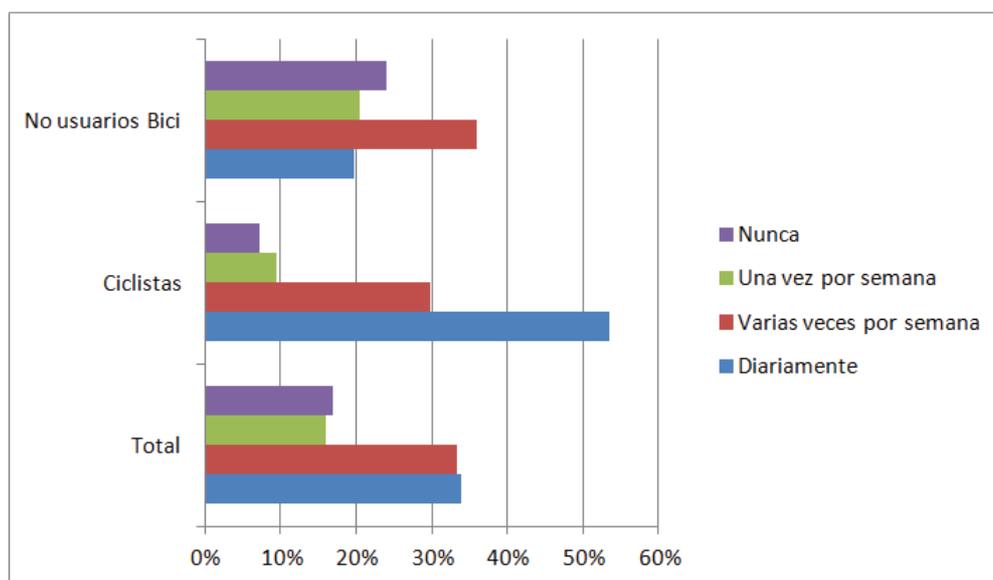


Figura 5.47: Escenario 2: Limitación del tráfico y la velocidad.

Los datos iniciales para este escenario propuesto ofrecen un mayor reparto en la percepción de los usuarios. En comparación con el escenario propuesto 1, existe un mayor porcentaje de usuarios que no elegirían la bicicleta como modo de transporte y cerca del 16% que usarían la bicicleta *una vez por semana*. Se entiende con un motivo de uso no obligatorio, es decir, con motivo deportivo, ocio o compras (figura 5.47). Sin embargo, para los viajes obligados existe una mayoría de usuarios que elegirían la bicicleta como modo de transporte durante su última etapa, o como modo de transporte principal. Se

obtienen resultados cercanos al 67%, con un 34% de encuestados que usarían la bicicleta *diariamente* y un 33% considerarían un uso de la bicicleta de *varias veces por semana*.

Las respuestas ofrecidas por el grupo de usuarios habituales de la bicicleta ofrecen una percepción tendente hacia este escenario particular. El hábito de uso de este grupo puede condicionar la valoración dada por este colectivo a la importancia de la limitación del volumen y velocidad de las vías, sobre la frecuencia de uso de la bicicleta. Una relación de las respuestas de los ciclistas para este escenario resalta la importancia que tiene el volumen de tráfico respecto a la seguridad a la hora de escoger la bicicleta como transporte. En el caso de los no usuarios de la bicicleta, la predisposición de usarla *diariamente* está compuesta por cerca de un 20% de los usuarios, seguido por un 36% que la usarían *varias veces por semana*. Se refleja una alta intención del uso de la bicicleta ante la posible limitación del volumen de tráfico y la velocidad para determinadas vías. Todo ello condicionado por el diseño de la infraestructura óptima de red ciclista adaptada a vías con un menor tráfico rodado de vehículos a motor.

Existe en la actualidad multitud de recorridos de la red ciclista que discurren por las aceras de las ciudades, donde los ciclistas y peatones deben de participar en el mismo espacio. La mayoría de usuarios consideran la seguridad un factor fundamental o muy importante a la hora de elegir la bicicleta para los desplazamientos. Dicha seguridad está condicionada con la posibilidad de compartir espacios con los diferentes actores de la vía pública.

El análisis de este factor se centra en la importancia dada por la totalidad de los encuestados frente al escenario propuesto de **aceras compartidas para peatones y ciclistas**. Los resultados son claros para este escenario. Hay una mayoría de usuarios que *nunca* escogerían la bicicleta para el caso en cuestión. Se le otorga a la seguridad y comodidad una importancia fundamental a la hora de elegir el modo de transporte.

Se comprueba un cambio en la percepción general de los ciclistas representado por la disminución de la frecuencia de uso. Un 20% de los ciclistas *nunca* elegirían la bicicleta como modo de transporte al circular por las aceras compartiendo espacio con los peatones. La valoración de este escenario por parte de los no usuarios de la bicicleta no

deja dudas de la importancia otorgada a las seguridad y comodidad a la hora de escoger el modo de transporte, como se puede observar en la figura 5.48. Existe una mayoría, alrededor del 60 % de los usuarios de este colectivo, cuya frecuencia de uso de la bicicleta sería *nunca* o *una vez por semana*. Se concluyen que sólo un mínimo de usuarios votarían por la bicicleta como modo de transporte habitual con el escenario propuesto.

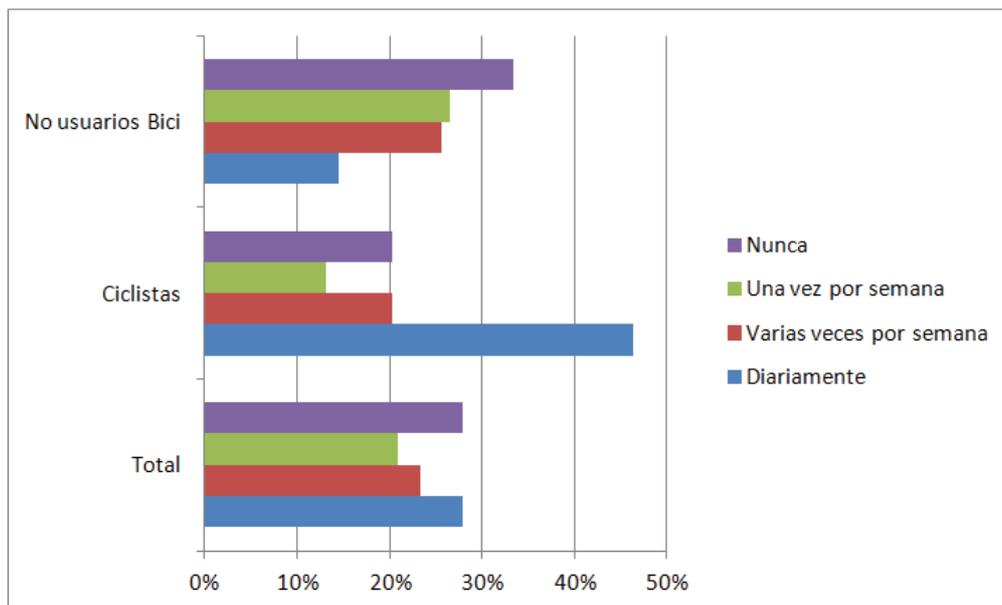


Figura 5.48: Escenario 3: Acera compartida.

Los jóvenes ofrecen una respuesta más contundente a la hora de negarse a usar la bicicleta como motivo de los viajes obligados, con cerca del 60% de los usuarios. Las mujeres dan un alto valor a la seguridad y por ello asignan a la frecuencia de uso de la bicicleta bajo este escenario la valoración de *nunca*. Se ratifica la relación entre mujeres y seguridad expuesta en los capítulos anteriores.

En relación con el escenario anterior, se propone un caso hipotético similar en cuanto al uso de la **acera para peatones y ciclistas, pero con la diferencia de división de espacios** entre los usuarios. En el trabajo presentado por Liñán⁸⁰ se propone cómo en la sección óptima de acera bici debe existir una diferenciación visual y física de los espacios de cada usuario. Dicha separación se caracteriza por la incorporación de

una hilera de árboles entre el espacio de los peatones y ciclistas. Este tipo de sección, además de lograr una mayor percepción de seguridad, ofrece a los diferentes usuarios un aumento de la comodidad en la circulación, proporcionando sombra a ambos,. Se mejora la comodidad de los usuarios de la acera frente al factor disuasorio de la climatología.

En la valoración de este escenario, figura 5.49, se muestra como existe una tendencia de los usuarios a usar la bicicleta *diariamente* con cerca del 40% de los encuestados. Un 32% del total prefieren el uso de la bicicleta *varias veces por semana*. Se produce un incremento de la frecuencia de usuarios para motivos obligados hasta un 72% de los encuestados. Los datos relacionados con el grupo de ciclistas habituales destaca el aumento de la frecuencia de uso de la bicicleta, obteniéndose cerca del 60% con una elección *diaria* de la bicicleta como modo de transporte. Para los no usuarios de la bicicleta predomina como frecuencia de uso de *varias veces por semana* con un 40% de los usuarios, seguido por el 25% cuya frecuencia sería *diariamente*.

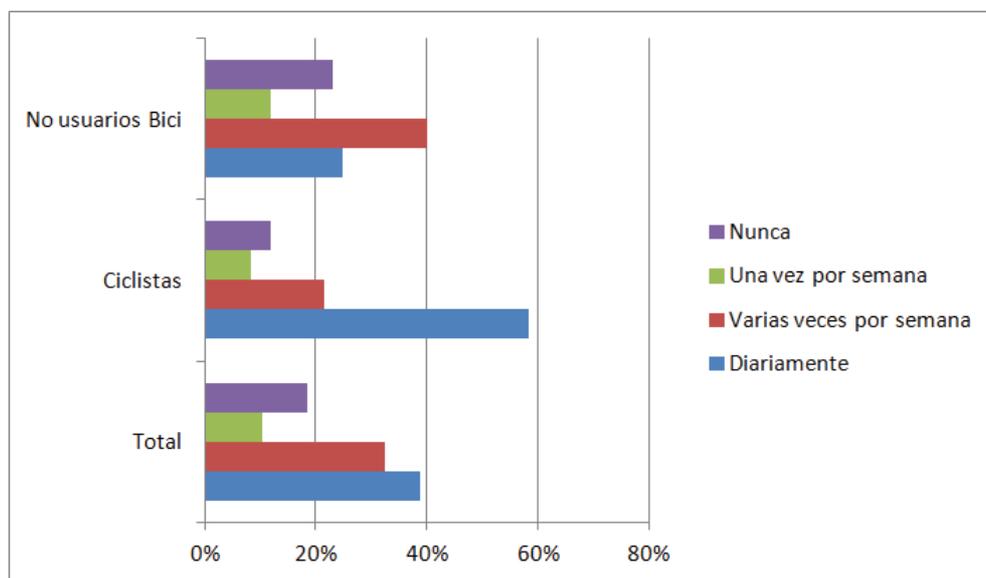


Figura 5.49: Escenario 4: Acera con separación física.

Queda patente la importancia de los resultados procedentes de las percepciones ante la situación hipotética del escenario propuesto. Se obtiene una tendencia ascendente

del número de usuarios de la bicicleta si existe una infraestructura segura, cómoda y atractiva dentro del municipio de Málaga.

Dentro del análisis de los diferentes escenarios de hipótesis, se propone a los encuestados que señalen la frecuencia con la que usarían la bicicleta como modo de transporte para el caso de **calzadas compartidas entre los diferentes vehículos a motor y la bicicleta**. Este escenario corresponde a una realidad presente dentro del itinerario de los usuarios que se plantean el uso de la bicicleta en el municipio de Málaga.

En ocasiones el empleo de la bicicleta como modo de transporte se hace imposible debido a la falta de infraestructuras para bicicletas o a una planificación no acertada. Se pretende distinguir las preferencias, en el caso particular de Málaga, hacia el uso compartido de la calzada entre bicicletas y vehículos a motor. Hay una mayor preferencia de los usuarios para la variable de *nunca* usaría la bicicleta en el escenario propuesto, con cerca del 37% de los encuestados.

Diferenciando el grupo de no usuarios de la bicicleta, los resultados son adversos. Sobresale con un 53% una preferencia de *nunca* elegiría la bicicleta para realizar el trayecto en calzadas compartidas. Para el grupo de ciclistas habituales, se observa la relación directa existente entre la posibilidad de circular en calzadas compartiendo espacios y la disminución del número de usuarios, incluidos ciclistas habituales, donde la existencia del hábito de uso se ve afectada por la falta de seguridad.

Los resultados para el escenario propuesto (figura 5.50) diferencian entre grupos de sexo y edad. Según el sexo de los usuarios, se distinguen con más del 50% las mujeres que no usarían *nunca* la bicicleta en el caso de calzadas compartidas, dando nuevamente muestra de la relación directa que posee la seguridad en la elección y hábito del uso de la bicicleta en ellas. De este modo se argumenta la importancia de la seguridad en la planificación de la red ciclista para el municipio de Málaga. También, los jóvenes otorgan gran importancia a la seguridad, destacando con un hábito de uso de la bicicleta menor. Como resultado de este escenario propuesto se observa una preferencia en la elección del modo de transporte de la seguridad¹¹³.

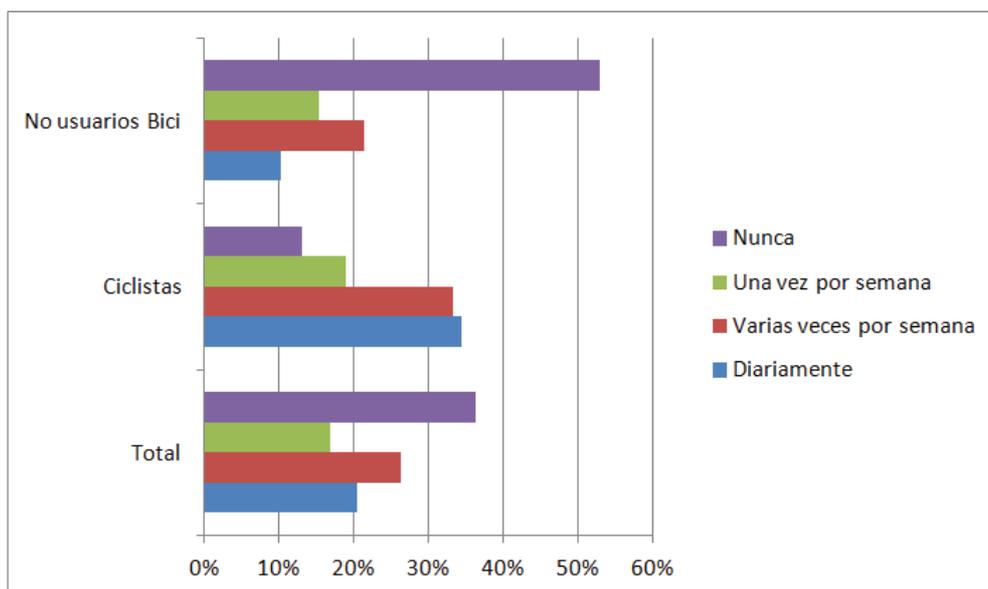


Figura 5.50: Escenario 5: Calzada compartida.

Como último escenario propuesto, y relacionado con el anterior, se realiza el análisis de la frecuencia de uso de la bicicleta como modo de transporte para el caso en concreto de circular en **calzadas con espacios separados para vehículos a motor y bicicletas**.

Del total de usuarios encuestados se deduce que algo más del 42 % usarían *diariamente* la bicicleta como modo de transporte en el municipio de Málaga. Consiste en un alto porcentaje de los usuarios que realizarían su viaje si existiese un carril bici segregado del tráfico rodado. En comparación con el ejemplo anterior de calzada compartida, se reduciría la negativa a usar la bicicleta en un 20 %. Estos resultados afianzan la importancia de la planificación y diseño de las diferentes tipologías en la red ciclista del municipio. La valoración de los resultados del grupo de los ciclistas es positiva, produciéndose un aumento en la frecuencia de uso de la bicicleta, asociados a los viajes con motivos obligados, con un 74 % de los usuarios (figura 5.51).

Respecto a resultados clasificados por sexo, la frecuencia de uso de la bicicleta para las mujeres pasaría a ser el doble. Se produce un aumento del 28 % sobre el uso de

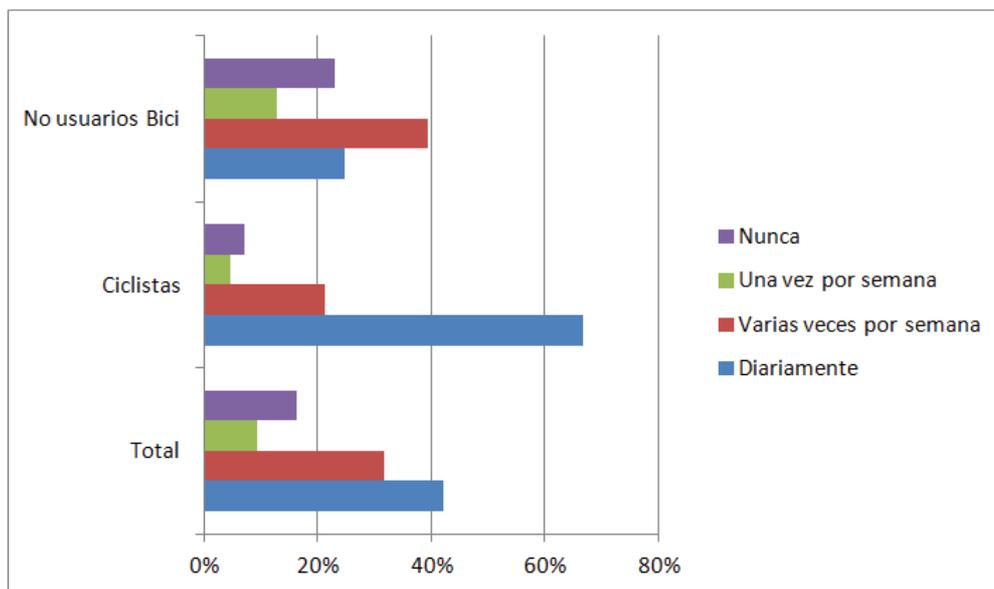


Figura 5.51: Escenario 6: Calzada separada.

calzadas compartidas, pasando a un 69 % para el uso de carriles bici por la calzada con segregación del tráfico rodado. Mención especial merecen los datos del grupo de jóvenes que pasarían a ser el colectivo con mayor número de usuarios con cerca del 76 %.

Como valoración del análisis sobre la frecuencia de uso de la bicicleta, ante los diferentes escenarios propuestos y la relación con los factores disuasorios ante la movilidad ciclistas y los factores que favorecen el uso de la bicicleta, se exponen algunas conclusiones a tener en cuenta para las futuras aplicaciones de las políticas de movilidad urbana para el municipio de Málaga. Las valoraciones concluidas reforzarán una mejor calibración de los resultados de optimización en la planificación y diseño de la red de bicicleta propuestas. con relación entre la infraestructura viaria disponible, la percepción de seguridad de los diferentes usuarios y el aumento del reparto modal de la bicicleta.

Se aprecia, en la figura 5.52, una mayor frecuencia de uso por parte de los usuarios en los escenarios con una infraestructuras para la bicicleta segregada del resto de los demandantes de la vía pública. La disponibilidad de una red continua en el municipio de Málaga es una de las preferencias del total de usuarios. Como consecuencia se observa

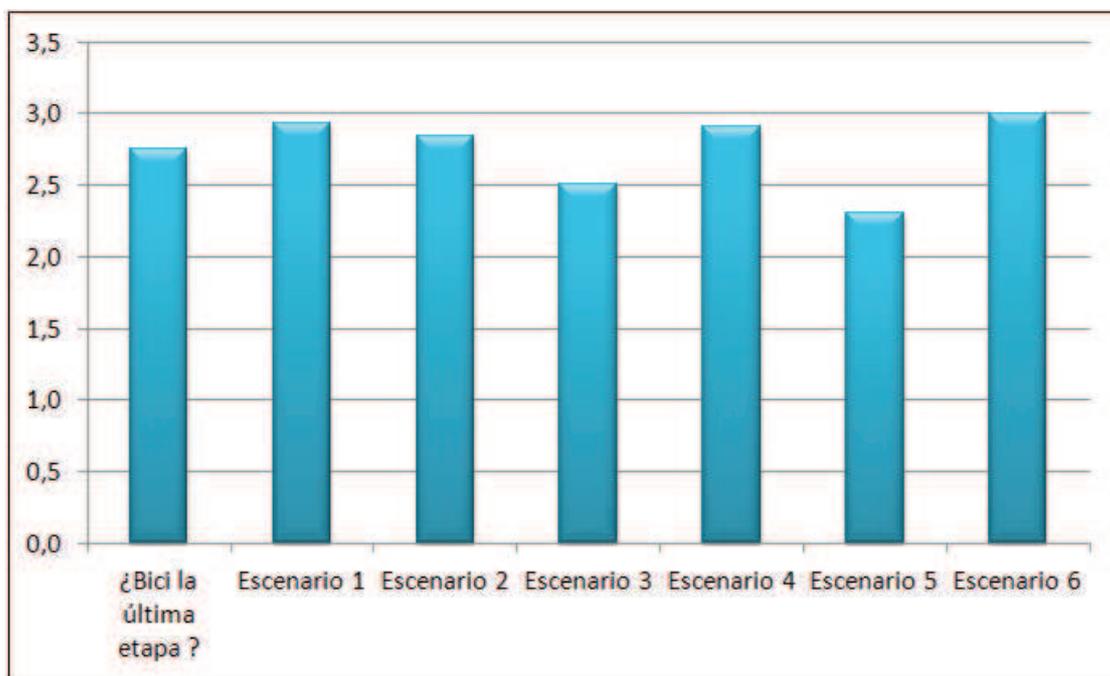


Figura 5.52: Valoración media Escenarios propuestos.

el aumento de la voluntad de elección de la bicicleta como modo de transporte en la ciudad. La planificación de la red para bicicletas deberá por tanto estar condicionada por el vial en el que transcurre junto con el volumen de tráfico y las velocidades de las correspondientes vías. Éste factor condicionará la percepción de seguridad de los usuarios.

Ante la posibilidad de elegir entre carril bici segregado por la calzada, o acera bici con espacios separados para peatones y ciclistas, se exponen algunas conclusiones de elección de los usuarios. En términos generales existe una mayor frecuencia de uso de la bicicleta para carriles bici segregados por la calzada, siendo los ciclistas los mayores usuarios de este tipo de vías. El hábito de uso condiciona su elección con respecto a la velocidad de desplazamiento y seguridad. Con respecto a los no usuarios de la bicicleta, no existe una diferencia notable de elección entre estas dos tipologías. Sí se destaca un aumento en el número de usuarios que usarían la bicicleta si dispusiera de esta infraestructura a la hora de realizar el viaje correspondiente.

Los hombres tienen una mayor frecuencia de uso de los carriles para bicicletas segregados por la calzada, a diferencia de las mujeres que prefieren las aceras bici con separación de espacios con los peatones. Esto confirma la diferencia en la percepción de la seguridad por sexos dentro del municipio de Málaga. Respecto a los grupos por edad, no se aprecia especial preferencia por alguna de las dos tipologías. Es importante señalar cómo la frecuencia de uso de la bicicleta para los jóvenes aumenta con el diseño de una red ciclistas con cualquiera de estas dos tipologías de carril bici. La frecuencia de uso de la bicicleta, para el grupo de adultos, aumenta a la hora de proponer escenarios con infraestructuras segregadas al tráfico rodado o a los peatones, teniendo una mayor frecuencia de uso los carriles para bicicletas segregados que discurren por la calzada.

Los factores a destacar de los resultados obtenidos de la encuesta *Movilidad en Málaga y preferencias de uso de la bicicleta* son los siguientes:

- El hábito de movilidad condiciona la percepción de los usuarios frente a los diversos factores propuestos.
- La percepción de la seguridad está directamente relacionada con la experiencia de uso de la bicicleta. Los usuarios con una mayor experiencia se sienten más seguros en los desplazamientos en bicicletas frente a situaciones de estrés. Caso contrario les ocurre a los usuarios no habituales de la bicicleta.
- Las mujeres tienen una percepción diferente a los hombres, posiblemente debido a una falta de hábito de uso de la bicicleta. Prefieren tipologías de infraestructura para la bicicleta segregadas del tráfico rodado y peatonal.
- Los usuarios no habituales de la bicicleta muestran una mayor importancia a variables relacionadas con las distancias de desplazamientos, el tiempo de viaje y la orografía del terreno. Todas han sido relacionadas de diferente manera entre los no usuarios y los habituales de la bicicleta.
- El miedo al robo es mayor en los usuarios de la bicicleta al estar centrado en un uso de la bicicleta privada. Los no usuarios de la bicicleta le dan una mayor importancia a las instalaciones para aparcarlas.

- La percepción sobre la contaminación en los desplazamientos tiene una importancia mayor en los ciclistas, al ser mayores conocedores de la situación de las vías públicas desde un punto de vista medioambiental.
- Se aprecia una mayor disposición al cambio en el modo de desplazamiento habitual a favor de la bicicleta en los jóvenes.
- Los usuarios con motivos de uso deportivo tiene una alta percepción de la seguridad y del robo. Se relaciona a una falta de hábito en movilidad urbana ciclista.
- La continuidad de los carriles bici es un handicap para los usuarios no habituales de la bicicleta siendo una de las grandes limitaciones a la hora de no elegir la bicicleta como modo de transporte.
- La disponibilidad de bicicleta es un valor fundamental a la hora de facilitar su uso como modo de transporte, por tanto el servicio de préstamo de bicicleta pública de Málaga puede ayudar a facilitar al aumento de uso de la misma.
- La percepción global de la bicicleta como modo de transportes es muy positiva. Obtiene una gran valoración para los factores de flexibilidad, al no tener límite de horarios y el ser un medio económico.

Como conclusiones a tener en cuenta, existe diferencias entre las percepciones de los usuarios desde el punto de vista de los hábitos de uso de la bicicleta. Los no usuarios poseen percepciones negativas respecto a la distancia, la orografía y el tiempo de desplazamiento. Se confirma pues, tras el estudio realizado de la literatura científica existente, la relación real entre las percepciones de la seguridad y el hábito de uso en el caso particular del municipio de Málaga.

6

Modelo de optimización propuesto

6.1. Introducción

La metodología empleada en la realización del modelo de optimización propuesto, en aras del diseño y planificación de las infraestructuras para la bicicleta, se describe en el presente capítulo. La formulación esta basada en modelos que proponen minimizar un objetivo principal condicionados por sus respectivas restricciones y sus coeficientes de ponderación. Se establece cada una de las restricciones como elementos que afectan, directa o indirectamente, al diseño óptimo de la red ciclista.

6.2. Formulación

El modelo propuesto se formula como:

$$\min Z = \sum_{o,d \in [1, \dots, M]} d_{o,d} \quad (6.1)$$

sujeto a

$$ca_{i,j} \geq CA_{i,j}^{min} \quad \in [1, \dots, N] \quad (6.2)$$

$$ac_{i,j} \geq AC_{i,j}^{min} \quad \in [1, \dots, N] \quad (6.3)$$

$$ap_{i,j} \geq AP_{i,j}^{min} \quad \in [1, \dots, N] \quad (6.4)$$

$$Sv_{i,j} = \sum_{i,j \in [1, \dots, N]} (Saw_{1(i,j)} + \dots + Saw_{n(i,j)}) \quad \forall r_k \in R \quad (6.5)$$

$$St_{i,j} = Sv_{i,j} + Scb_{i,j} \quad \forall r_k \in R \quad (6.6)$$

$$Su = Pu \delta_z \quad (6.7)$$

$$St_{i,j} \geq Su \quad \forall r_k \in R \quad (6.8)$$

$$R \subseteq \Omega$$

donde:

- Z : es la función objetivo a calcular. En el caso propuesto, se refiere a la mínima distancia de recorrido $d_{o,d}$ para cada corredor.

- o, d : determina el origen y destino de los centroides. Cada una de las zonas de transporte está representada por un centroide que simbolizan la unión de los futuros corredores de la red ciclista.
- M : número total de corredores. El sumatorio de todas las conexiones posibles de los centroides de la zonificación planteada.
- N : se corresponde con el total de nodos que forman la red urbana.
- $ca_{i,j}$: es la anchura existente en *calzada* para cada uno de los arcos que componen la red vial. Se establece un mínimo de anchura en la calzada ($CA_{i,j}^{min}$) que satisfaga la posibilidad de implantar el carril bici en este espacio de la vía pública.
- $ac_{i,j}$: describe la anchura de la *acera* que componen cada uno de los arcos existentes en la red vial. Se establece un mínimo de anchura para la acera ($AC_{i,j}^{min}$) que satisfaga la posibilidad de implantar el carril bici en esta coexistencia con el peatón.
- $ap_{i,j}$: es la anchura disponible de *aparcamiento* para cada par de arcos que componen la red vial. Se establece un mínimo de anchura ($AP_{i,j}^{min}$) capaz de soportar la implantación del carril bici en la superficie ocupada por los aparcamientos.
- $Sv_{i,j}$: es el sumatorio de la seguridad que representa un arco. Está determinado por la proporción dada para cada una de las características de la infraestructura de la red vial.
- Saw : representa cada uno de los pesos relativos a la seguridad asociada a cada arco $a_{i,j}$ para cada una de las variables en consideración.
- $Scb_{i,j}$: es la seguridad asignada para cada tipología de infraestructura destinada al uso exclusivo de la bicicleta.
- $St_{i,j}$: es la seguridad total que posee cada uno de los arcos, dependiendo de las características físicas propias y de la posible infraestructura para la bicicleta que se pueda incluir en el arco.
- Su : es la seguridad del usuario y está definida por los diferentes perfiles de usuarios Pu de la red ciclista. Dichos perfiles están configurados a partir de la encuesta de

movilidad y preferencias de uso de la bicicleta, condicionando la mínima seguridad que debe superar un arco para su uso.

- δ_z : representa la importancia dada a los datos, agregados por zonas de transporte, en referencia a las características socioeconómicas, de viviendas y de usos del suelo, con respecto a la percepción de seguridad de los posibles perfiles de usuario.
- R : el total de arcos que forman la red vial modelada.
- Ω : el conjunto de arcos que forman el entramado urbano existente.

A continuación se describen los dos componentes principales del modelo formulado:

Función objetivo. Basado en el cálculo de distancias mínimas entre los nodos principales de las zonas de transporte, denominados centroides. La función objetivo (6.1) representa la distancia mínima para la que debe estar diseñada la red ciclista. Se busca, por tanto, minimizar los tiempos de desplazamientos de los diferentes usuarios. Posteriormente, la distancia mínima estará condicionada por las diferentes variables que afectan a la seguridad, directamente a partir de las características propias de la red vial e indirectamente a través de los perfiles de seguridad estimados.

Restricciones. Las restricciones 6.2, 6.3 y 6.4 establecen la anchura mínima permitida que debe tener cada uno de los elementos de la red urbana (calzadas, aceras y aparcamientos) para poder disponer de la infraestructura para la bicicleta. Se diferencian dos condicionantes de seguridad. El primero (6.5 y 6.6), basado en las características propias de la red $Sv_{i,j}$. Dónde cada una de las características propias de los arcos marcan el nivel de seguridad establecido. También se tiene en consideración una seguridad relativa a la posibilidad de carril bici que se pueda implantar en cada uno de los arcos, definida por $Scb_{i,j}$. El segundo elemento de la seguridad (6.7), se corresponde con el trabajo realizado en la encuesta de movilidad y preferencias de uso de la bicicleta. Obteniendo como resultado de las variables latentes (psicológicas) estudiadas que afectan a la percepción de la seguridad de los usuarios encuestados. Concluyendo con los diferentes perfiles de usuarios Pu .

6.3. Modelo de optimización

La resolución de un modelo para un único objetivo implica hallar la solución de dicho objetivo. Para el caso de los modelos de optimización multiobjetivos, es necesario desarrollar el cálculo de todas las soluciones no dominadas, pertenecientes al frente de Pareto óptimo, tal y como se ha desarrollado en el capítulo sobre *Optimización de recorridos*. La finalidad de este tipo de modelos es la obtención de una única solución, la "deseable". Por tanto, dicha solución final estará, generalmente, condicionada por la información complementaria y cualitativa, basada en algunos casos en la experiencia, donde se distinguen dos formas del proceso de decisión³⁰.

Se parte de un proceso denominado ideal de optimización multiobjetivo. En la primera fase se pretende obtener como resultado un frente Pareto, constituido por las soluciones no dominadas. Todos los objetivos tienen un valor de importancia idéntico que afecta a la solución del método. En su segunda fase, se dispone de la información proporcionada por los técnicos responsables de las tomas de decisiones, relacionada con las preferencias de elección. Se realiza, por tanto, la elección del resultado factible que corresponderá con una de las soluciones halladas en el frente de Pareto.

Otra metodología para la resolución del modelo está basada en las preferencias de la optimización multiobjetivo. El fundamento de este procedimiento se centra en el conocimiento previo del peso o importancia de cada uno de los objetivos del estudio. Gracias a ello se produce la transformación del problema inicial de optimización multiobjetivo en otro de objetivo único. La función objetivo del problema inicial pasa a estar ponderada por sus pesos, pertenecientes a cada una de las variables que afectan a la función objetivo. Se constituye, de este modo, una función objetivo nueva.

En el trabajo presentado por Deb y Kalyanmoy³⁰ se definen las diferentes a tener en cuenta a la hora de elegir un procedimiento para la resolución del método de optimización. Se destacan las siguientes:

- *Sensibilidad al vector de pesos*. Existe una notable diferencia entre los dos modelos respecto a la influencia del vector de pesos. A la hora de formar la función objetivo compuesta, en los procedimientos basados en preferencias se puede observar una

mayor influencia del vector de pesos aplicado.

- *Dificultad de hallar el vector de pesos.* El cometido de encontrar un vector de pesos, capaz de reflejar la representatividad de los diferentes objetivos, se concibe a priori como subjetiva y no inmediata. En este apartado, adquiere gran importancia la elaboración de la encuesta de movilidad expuesta en el capítulo anterior de la presente investigación, dónde se ven reflejadas las diferentes percepciones de los usuario para el municipio de Málaga.

En resumen, la disponibilidad de un vector de pesos que refleje las prioridades entre los diferentes objetivos determinará el uso del procedimiento ideal, a partir de la información facilitada por el problema. En este sentido, el procedimiento ideal, al no estar expuesto a un vector de pesos, se puede considerar como un método más práctico y con una menor influencia de subjetividad.

En lo relacionado con *Transit Network Design Problem (TNDP)*, existe una mayoría de modelos de optimización que emplean como método de resolución los procedimientos basados en preferencias⁶. La importancia de los diversos coeficientes o vectores de peso se refleja en la magnitud correspondiente a los diferentes objetivos. La dificultad se centra a la hora de determinar el conjunto de coeficientes que sean solución para el problema de objetivo único compuesto y, que a su vez, no sea una solución dominada del problema multiobjetivo original.

6.3.1. Fuentes de dificultad del problema

A partir de los trabajos realizados por Chakroborty¹⁶ y Baaj⁶, se describen algunas de las dificultades que presentan los problemas de optimización debido a las características propias, reflejado en su complicada representación matemática y su resolución exacta.

La definición de las variables de decisión en la formulación condicionan el modelo de resolución. En la mayoría de las formulaciones revisadas, las funciones objetivos están descritas en base a los recorridos de los diferentes usuarios r_k , al igual que las restricciones. Este tipo de problemas pueden ser de naturaleza combinatoria. El disponer

de un trazado formado por los posibles recorridos (r_k) actúa como una de las variables de decisión. La suma de posibles soluciones, a la hora de aplicar una formulación de programación matemática a dicho problema, implica unos tiempos de ejecución inaccesibles para casos de magnitudes reales. Por este motivo, es preferible el empleo de variables mixtas.

Para finalizar, debido a la importancia de los valores de las funciones objetivos, se incorpora al modelo de optimización el criterio de los técnicos responsables de la toma de decisiones. En el caso que se presenta en dicha investigación, el vector de pesos está definido por los valores extraídos de la encuesta de movilidad y preferencias de uso de la bicicleta que se ha llevado a cabo para el municipio de Málaga.

6.3.2. Modelo propuesto de optimización

En esta sección se presenta la estructura principal del modelo de optimización desarrollado en la elaboración de esta tesis doctoral. Tal y como se ha señalado en secciones anteriores, el problema de diseño óptimo de recorridos ha sido estudiado comúnmente en la literatura. Existen diferentes variantes dependiendo de las aplicaciones y objetivos a los que se pretenda dar solución. El objetivo principal, marcado por el algoritmo de resolución, se centra en la búsqueda de la distancia mínima a recorrer para el diseño e implantación de una infraestructura de carriles para bicicletas. Este diseño debe cumplir los requisitos de comodidad, seguridad y diversión óptimas para obtener un mayor número de usuarios.

A grandes rasgos, la resolución del algoritmo tiene como objetivo único el cálculo del recorrido mínimo entre cada par origen y destino de la matriz OD ($D = d_{od}$). Dicho recorrido está condicionado por diversas restricciones agrupadas en diferentes secciones: *infraestructura, seguridad y perfiles de usuarios*.

Infraestructura

Esta sección se corresponde con la caracterización de la red vial existen. La red vial, constituida por el grafo no dirigido $G = (N, A)$, tal y como se desarrollo en el apartado de *Infraestructura de Red vial* (capítulo de *Tratamiento de datos*). La totalidad de los arcos que caracterizan la red vial elaborada conforman el entramado urbano del municipio de Málaga. Dichos arcos poseen una información de partida explicada en los apartados anteriores. Un pequeño recordatorio de todas las características que guardan cada uno de los arcos de la red vial diseñada sería:

- Nodo de origen y de destino
- Tipo de vía
- Modo de transporte disponible
- Longitud
- Número de carriles
- Anchura de carril
- Capacidad
- Velocidad
- Aparcamiento
- Anchura de aparcamiento
- Acera
- Anchura de acera
- Carril bici
- Tipología del carril bici
- IMD
- Zona

El punto de partida de la mayoría de los Estudios o Manuales de diseño para el tráfico de bicicletas consiste en analizar las consideraciones referentes a la planificación para dar facilidades al uso de la bicicleta. Se estructuran a partir de un breve análisis de los antecedentes y evolución del rol de la misma, seguido de una relación de las múltiples ventajas y razones para usar la bicicleta como modo de transporte urbano habitual. El objetivo de estos estudios reside en la creación de una infraestructura “cicloamistosa”¹. Esto se consigue cuando la planificación y el diseño tienen éxito, creando un medio ambiente amistoso a los distintos tipos de ciclistas.

En este sentido, los manuales de ingeniería de transporte aplicados a la movilidad sostenible carecen de ejemplos o modelos de aplicación. Con el objetivo de formar una herramienta útil para los técnicos urbanos de las administraciones correspondientes, se presenta la aplicación del modelo a un caso práctico real, capaz de lograr el establecimiento de los diferentes modos de transporte sin la oportuna problemática en las etapas de diseño.

Para un diseño óptimo dedicado a la infraestructura de la bicicleta y su relación con la movilidad urbana es necesario basarse en la programación matemática. Con un diseño adecuado es posible realizar un acercamiento integral a la hora de resolver los posibles problemas de tráfico y circulación que se puedan derivar de la planificación y diseño de las infraestructuras para bicicletas. En relación con lo descrito, hay infraestructuras existentes dónde el comportamiento de los ciclistas ha derivado en unos usos diferentes de la planificación impuesta por los diseñadores. En el caso particular de la presente investigación, este problema se evita a partir de las consideraciones de las preferencias del usuario a la hora de diseñar la red ciclista urbana.

El considerar a los ciclistas y futuros usuarios potenciales de la bicicleta como clientes del sistema de tráfico y transporte conlleva el reflexionar sobre los requisitos que se deben cumplir para ofrecer una infraestructura de calidad. Tal y como se ha visto con anterioridad, algunos de esos requisitos se centran en asegurar un espacio suficiente en la sección vial. Por ello se recomienda un diseño que minimice resistencias del resto de

¹Se produce cuando la planificación y el diseño de la ciudad y el sistema de transporte, tienen en cuenta las necesidades de la movilidad sostenible (peatones y ciclistas).

usuarios y sea capaz de considerar las diferentes percepciones de los ciclistas, asegurando una infraestructura completa y comprensiva.

1. Características del espacio físico. En este apartado se ha estructurado la programación matemática en dos agrupaciones diferenciadas. La primera agrupación está basada en las características del espacio físico y en ella se produce el análisis y comprobación de las diferentes características físicas que conforman la base de datos de la red vial. Dentro de estas comprobaciones, se toma como primer punto de partida el verificar la disponibilidad de espacio físico para la posible implantación de la infraestructura de carril bici. Por otro lado, y como segunda agrupación, se tienen en consideración las características propias de la tipología de vía, que están basadas en el efecto producido por el tráfico motorizado, la intensidad y la velocidad de la propia vía.

A partir de la revisión y consulta del estado del arte, se han tomado algunas medidas como punto de partida para la planificación y diseño de las infraestructuras de carriles para bicicletas. Dichas consideraciones, podrán ser modificadas dependiendo de la normativa existente para cada uno de los casos aplicados. El cambio de configuración permite una rápida adaptación por parte de los técnicos o planificadores correspondientes. Las medidas mínimas para la implantación de los "carriles bici" (CB) en la red vial corresponde a:

Tipología	Anchura mínima
Acera bici	4.5 metros
Acera bici protegida	5 metros
Calzada bici	3.5 metros
Calzada bici segregada	3.5 metros
Ciclovía	3.5 metros
Carril bici por Aparcamiento	2.5 / 5 metros

Tabla 6.1: Anchura mínima para implantación de CB.

Las características analizadas en este bloque consisten en:

- Acera: se analiza la disponibilidad de acera y su anchura tal y como aparece señalado en la tabla 6.1 (*Anchura para implantación de CB*). La referencia tomada en la planificación matemática de espacios mínimos para acera bici y acera bici protegida son de 4.5 y 5 metros respectivamente. La diferencia existente entre las dos secciones disponibles de implantación sobre la acera se establece en el uso compartido del espacio público con o sin separación física entre peatones y ciclistas. Existen por ello las aceras bici sin separación de dicho espacio entre la infraestructura para la bicicleta y el lugar destinado para el uso de los peatones y, por otra parte, las aceras bici protegidas, que contemplan una separación física entre los diferentes usuarios, mediante el uso del mobiliario urbano, implantación de hilera de árboles, etc.

La anchura mínima se corresponde con el espacio disponible para la implantación de las diferentes secciones de carriles bici, siendo en este caso particular por la acera. En el caso de los arcos que posean aceras con una anchura superior a la mínima establecida, se podrán incluir las secciones de acera bici para dicho arco. Se realizará, pues, una infraestructura de acera bici a partir de los 4.5 metros de anchura y una acera bici protegida con una anchura superior a los 5 metros.

Naturalmente, pueden existir casos dónde el arco no disponga de acera. En éstos el resultado de la posible implantación de la infraestructura para la bicicleta sería nulo. Con ello se limita la posible colocación de la sección tipo para el arco en concreto. Ocurre lo mismo para los arcos dónde no se cumplan las restricciones de anchura mínima.

- Calzada: se realiza una comprobación del número de carriles que existen por sentido del arco (a_{ij}) y la anchura disponible en cada uno de los carriles. En esta sección, por tanto, se realiza la verificación del espacio mínimo disponible en la calzada. Se han diferenciado 3 tipologías posibles de carril bici:
 - Calzada bici: la anchura mínima para esta tipología se establece en 3.5 metros. Esta sección tipo se ejecuta por la calzada con separación del tráfico rodado mediante una banda de pintura.

- Calzada bici segregada: muy similar a la anterior. Se diferencia al estar ejecutado por la calzada con separación física del tráfico rodado a partir de bolardos o pivotes.
- Ciclovía: es un tipo de carril bici ejecutado en la calzada con una infraestructura completamente aislada al tráfico rodado.

La comprobación de calzada tiene como resultado el listado de arcos disponibles que cumplen con las anchuras mínimas para la posible implantación de las diferentes tipologías de carriles bici en calzada del total de arcos que conforman la red.

Las limitaciones respecto a la anchura mínima para estas tres tipologías de carriles bici por la calzada han sido establecidas a partir de la información recopilada en la elaboración de esta tesis doctoral. Posteriormente, dicha anchura mínima podrá ser definida por los técnicos correspondientes para cada uno de los casos de aplicación.

- Aparcamiento: la posibilidad de incluir la red ciclista urbana es los espacios reservados para los aparcamientos es muy atractiva, dependiendo de la configuración urbana propia de cada ciudad. El algoritmo está diseñado para realizar dos comprobaciones relacionadas con la disponibilidad de aparcamiento y el tipo de aparcamiento de cada arco. Un primer control está basado en la verificación de la existencia del aparcamiento dentro del arco. El segundo, que se realiza siempre y cuando el arco disponga de aparcamiento, se basa en examinar el tipo de aparcamiento, diferenciando entre aparcamientos en línea y batería.

Como punto de partida para los diseñadores, se establece un mínimo de anchura de 2.5 metros en los aparcamientos en línea para la posible implantación de la infraestructura de carril bici. Cuando se disponga de aparcamiento donde no sean superadas dichas distancias mínimas, el algoritmo no contempla la posibilidad de diseñar el carril bici por el aparcamiento. Para el caso de los aparcamientos en batería, se dispone de un ancho mínimo de 5 metros para la posible implantación del carril bici por el aparcamiento.

La posible implantación del carril bici en el espacio ocupado por los aparcamientos tiene, en principio, un rechazo directo de las diferentes administraciones. El diseño del algoritmo contempla los casos dónde existe aparcamientos tipo batería con una anchura mínima de 5 metros. En ellos existe la posibilidad de diseñar tanto el espacio físico ocupado formado por un carril bici por la calzada como una hilera de aparcamientos en línea. Esta admisión logra reducir un mínimo de plazas de aparcamientos en el entramado urbano a la vez que permite planificar y diseñar una infraestructura para la bicicleta por la calzada.

En definitiva, esta primera sección del capítulo sobre *Infraestructura* deduce el total de arcos disponibles, desde la perspectiva del espacio físico, para la posible implantación de las diferentes tipologías de "carriles bici" que se pueden implantar en la red vial.

2. Características de la tipología de vía. Dentro de las zonas urbanas la relación entre las secciones viales para el tráfico motorizado y las bicicletas trata de cumplir el papel de distribución del total de usuarios en sus respectivos desplazamientos, con el objetivo de facilitar una movilidad segura. Para realizar una planificación, diseño y gestión óptimos de las infraestructuras para bicicletas se ha incorporado en el desarrollo del algoritmo un análisis del tipo de vía existente para cada $a_{i,j}$. Dentro de este apartado, se ha realizado un perfil básico que se tomará como ejemplo de aplicación a la hora de realizar el diseño de "carriles bici" para el municipio de Málaga.

Se define el perfil de restricciones por tipología de vía desglosado en 3 niveles. Una comprobación inicial del número de carriles. El segundo nivel consta del estudio sobre el sentido de los carriles que forman cada arco analizado. Por último, se basa en una comparación con el IMD² y la velocidad de cada $a_{i,j}$. De este modo, se presenta las restricciones como:

- Arcos con un carril: en la base de datos elaborada sobre la red vial del municipio de Málaga, se diferencian el número de carriles y sentidos disponibles por cada

²IMD: clasificación realizada a partir de datos de aforo municipales sobre la intensidad media de vehículos. Este índice, también depende de la tipología de la vía y las características físicas propias del arco, así como de los datos de aforo peatonales.

arco. Por ello el algoritmo restringe la posibilidad de integrarlos en función del número y sentido de los carriles disponibles. Para arcos (a_{ij}) con³ $IMD_{ij} = 1$, $Vo_{ij} \leq 30$, se posibilita la implantación de una infraestructura para la bicicleta, dada las características de un arco que tiene poca intensidad de tráfico.

- Arcos con dos carriles: en el caso de arcos con dos carriles, se diferencia entre un único o doble sentido.
 - Un sentido: cuando acontece un arco con doble carril para un mismo sentido, se podrá implantar siempre una infraestructura para la bicicleta. El diseño se realizará por la calzada, ocupando el espacio disponible de un carril.
 - Doble sentido: en los supuestos dónde el arco tiene doble sentido, si $IMD_{ij} = 1$ y la velocidad del arco es menor o igual a 30 km/h ($Vo_{ij} \leq 30$), el algoritmo tendrá en cuenta la posibilidad de implantar el "carril bici" por la calzada al ser un arco poco transitado.
- Arcos con tres carriles: situación similar al supuesto de arcos con dos carriles. Es necesario diferenciar entre los arcos de único y doble sentido.
 - Un sentido: en los arcos cuyos tres carriles tengan un mismo sentido y un $IMD_{ij} \leq 3$, se puede planificar la infraestructura para la bicicleta en el arco.
 - Doble sentido: cuando en los arcos con 3 carriles tiene doble sentido, se puede implantar el "carril bici" en la calzada cuando el IMD del arco sea $IMD_{ij} \leq 2$. El algoritmo define por defecto la infraestructura en uno de los dos carriles que poseen el mismo sentido, teniendo como resultado 1 carril para cada sentido de la circulación más un carril bici diseñado en la calzada. También, se considera la posibilidad de ejecutar el carril bici por la calzada en los arcos con $IMD_{ij} = 3$ y cuya velocidad sea $Vo_{ij} \leq 40$.
- Arcos con cuatro carriles: igualmente, el diseño del algoritmo incluye una sección para los arcos de 4 o más carriles. En este apartado también se diferencian entre un único y doble sentido.

³Para los valores del IMD hay una clasificación detallada en el Capítulo: *Tratamiento de Datos*, siendo el valor actual el mínimo estipulado en la clasificación, con una velocidad del arco menor o igual a 30 km/h

- Un sentido: en los casos que existan arcos con 4 carriles para un mismo sentido, se plantea un diseño de la infraestructura para la bicicleta cuando la tipología de vía y la cantidad de tráfico diario lo permitan. En este sentido, se establece un factor de control de $IMD_{ij} \leq 3$ para aceptar la posibilidad de implantar el “carril bici” por este tipo de arco.
- Doble sentido: el proceso es similar al ocurrido en los arcos con tres carriles y doble sentido. Dentro de la posibilidad de 3 carriles para el mismo sentido $(3+1)$, si el arco (a_{ij}) tiene un $IMD_{ij} \leq 2$ se acepta la oportunidad de implantar la infraestructura para la bicicleta en uno de los carriles. En este caso, el carril bici se implantará siempre en el carril más seguro en relación con el sentido de circulación. Por defecto, se considera el carril de la derecha de la circulación. En los casos con 2 carriles para cada sentido $(2+2)$, el algoritmo contempla como arco válido cuando el $IMD_{ij} = 2$.

La configuración del perfil elaborado se ha llevado a cabo tras realizar un estudio y análisis de la revisión bibliográfica de los diferentes planes de movilidad, proyectos y artículos consultados en el desarrollo de la presente investigación.

Tal y como está planteado en el diseño matemático del algoritmo, las diferentes restricciones asociadas a las características del espacio físico y de la tipología de la red vial caracterizarán las diversas soluciones que se podrán llevar a cabo como infraestructura para la bicicleta en los diferentes casos de aplicación. Los valores que perfilan las restricciones podrán ser modificados tal y como se explicará en los siguientes capítulos.

Seguridad

Dentro de las preferencias que se describen para la obtención de una red ciclista óptima para el uso de los diferentes usuarios, existen cinco requisitos principales a cumplir para lograr una infraestructura cicloamistosa: ser directa, atractiva, coherente, cómoda y *segura*. Es, en ésta última, donde se desarrolla gran parte de la innovación científica de esta tesis doctoral.

En el Capítulo 2 sobre el *Estado del arte*, ya se realizó un desglose de la importancia

que tiene el factor seguridad para el cálculo de la elección en el modo de transporte. La percepción de la seguridad y la comodidad, como segundo objetivo principal, de los diferentes usuarios y no usuarios de la bicicleta se ven directamente afectadas por factores como el volumen de tráfico y la disponibilidad de infraestructuras para la bicicleta, como aparece en Tilahun¹¹⁶ y Akar⁴. Se interrelacionan la disminución de la seguridad y la comodidad del ciclista al haber un mayor flujo en el tráfico de vehículos.

La planificación matemática está diseñada diferenciando dos partes representativas que influyen en la seguridad. Por un lado, el primer punto a tratar está formado por la seguridad asociada a las características propias de la red vial. El segundo ámbito de actuación está relacionado con las diferentes tipologías de “carriles bici” que tienen un papel fundamental en el efecto que produce la seguridad a la hora de realizar los posibles desplazamientos de los usuarios de la bicicleta.

1. Seguridad asociada a las Características de la Red Vial. Los elementos principales que caracterizan la red vial elaborada, al igual que en los grafos, son los nodos y arcos. A continuación, se describe la influencia expuesta de cada uno de los elementos que conforman la red vial en relación con la seguridad. Estos elementos están explicados en la sección de *Infraestructura de la Red vial*, dentro del Capítulo de *Tratamiento de datos* de la presente tesis.

- IMD: este parámetro está formado por la información recopilada de la red de carreteras municipal sobre el número de vehículos que circulan por las calles. La clasificación elaborada es el resultado de la unión de los datos de aforo, las intensidades media de vehículos y una toma de datos sobre el aforo peatonal. El índice final de IMD tiene en consideración los datos de la tipología de vía y las características físicas propias del arco.

Partiendo del análisis que relaciona la seguridad y su influencia directa a la hora de elegir un modo de transporte y/o una ruta para los desplazamientos, se realiza una asignación de los coeficientes de seguridad según la categoría del arco con su respectivo IMD. El valor de seguridad asignado a cada arco, dependiendo de su

IMD, se define como $SaIMD_{i,j}$, siendo la clasificación de los diferentes valores la siguiente:

IMD	Seguridad
1	5
2	4
3	3
4	1
5	0

Tabla 6.2: Seguridad asociada al IMD de la red vial. Elaboración propia.

- Velocidad: en la base de datos sobre *Infraestructura de Red vial*, se puede observar la relación directa entre la tipología de la vía y la velocidad. Se establecen las 5 categorías de vía y sus correspondientes velocidades: V_o (velocidad a flujo libre de la vía) y V_{max} (velocidad máxima permitida).

A la hora de realizar una modelización, es necesario contar con la mayor información posible y veraz. En este sentido, la base de datos de los arcos que conforman la red vial del municipio de Málaga cuenta con un parámetro de Velocidad que puede diferir de la velocidad de la tipología de la vía. Ésto es debido a la posibilidad que tienen algunas calles de modificar la velocidad para favorecer o perjudicar la movilidad, con el aumento o disminución de la velocidad correspondiente en algunos tramos en concreto.

El índice de seguridad asignado a la velocidad para cada uno de los arcos de la base de datos, $SaVel_{i,j}$, es el siguiente:

- Capacidad: al igual que ocurre con el parámetro de velocidad, la capacidad está asociada directamente con la tipología de la vía. Tras la revisión de la literatura consultada, se observó la importancia que tenía determinados factores en el uso de la bicicleta, destacando para este caso en particular el volumen del tráfico¹¹². Basado en el análisis de la interrelación entre el parámetro de la capacidad de los arcos y la seguridad, se deduce que existe una mayor seguridad para los diferentes usuarios

Velocidad	Seguridad
0 - 29.9 <i>km/h</i>	5
30 - 39.9 <i>km/h</i>	4
40 - 49.9 <i>km/h</i>	3
50 - 59.9 <i>km/h</i>	2
Más de 60 <i>km/h</i>	1

Tabla 6.3: Seguridad asociada a la Velocidad de la red vial. Elaboración propia.

(reales y potenciales) en los arcos cuya capacidad sea menor. La valoración de la seguridad en relación con la capacidad de los arcos ($SaCap_{i,j}$) es:

Capacidad	Seguridad
500	5
700	4
800	3
1000	2
1100	1

Tabla 6.4: Seguridad asociada a la Capacidad de la red vial. Elaboración propia.

- Tipo de Vía: el tipo de vía tiene asociado intrínsecamente parte de información sobre las características de la movilidad. Aunque los tres puntos desarrollados con anterioridad son características que conforman la tipología de las vías o arcos, se establece una relación entre el tipo de vía y la seguridad aplicable en combinación con los parámetros de IMD, Velocidad y Capacidad. Se puede calcular la seguridad asociada a la infraestructura únicamente teniendo presente el parámetro de tipología de vía. Dicha asignación de seguridad, $SaVia_{i,j}$, para cada tipología de arco se corresponde con:

Dentro del total de la red vial del municipio de Málaga se han encontrado diferentes casos para la posible aplicación de un coeficiente de seguridad. Esto afectará a la hora de planificar y diseñar una infraestructura para la bicicleta que cumpla con todos los requisitos de comodidad y seguridad para el mayor número de usuarios.

Tipo de Vía	Seguridad
Semipeatonal	2
Urbana	1
Arterial	0.5
Nacional	0
Autovía / Autopista	0

Tabla 6.5: Seguridad asociada al Tipo de Vía de la red vial. Elaboración propia.

Posteriormente al análisis realizado en el caso práctico del municipio de Málaga, se plantea una relación entre el número de carriles disponible en los arcos y la seguridad percibida por los usuarios, tal y como se describe en Hyodo⁶⁷ y Sener¹¹². Los valores de seguridad asignados al número de carriles en los arcos ($SaCarr_{i,j}$) son:

Número de carriles	Sentidos	Seguridad
1 carril	único sentido	0
2 carriles	único sentido	1
	doble sentido	0.2
3 carriles	único sentido	2
	doble sentido	0.5
4 carriles	único sentido	3
	doble sentido (3+1)	1.2
	doble sentido (2+2)	0.8

Tabla 6.6: Seguridad asociada al número de carriles. Elaboración propia.

Para facilitar las labores de planificación y diseño de las futuras infraestructuras para la bicicleta, el algoritmo agrupa las diferentes características de las infraestructuras que afectan a la seguridad. Se obtiene el valor $Sv_{i,j}$, resultado de la suma de la seguridad contenida en un arco. Se determina a partir del valor de seguridad asignado para cada una de las características de la infraestructura de la red vial.

$$Sv_{i,j} = \sum_{i,j \in [1, \dots, N]} (Saw_{1(i,j)} + \dots + Saw_{n(i,j)}) \quad (6.9)$$

El valor $Sv_{i,j}$ sería pues un sumatorio de las seguridades de cada una de las características analizadas de la infraestructura de los arcos: IMD, velocidad, capacidad, tipo de vía y número de carriles. Se resume la formulación aplicada como:

$$Sv_{i,j} = \sum (SaIMD_{i,j} + SaVel_{i,j} + SaCap_{i,j} + SaVia_{i,j} + SaCarr_{i,j}) \quad (6.10)$$

siendo:

- $SaIMD_{i,j}$: Seguridad asociada al IMD de cada $a_{i,j}$
- $SaVel_{i,j}$: Seguridad asociada a la Velocidad de $a_{i,j}$
- $SaCap_{i,j}$: Seguridad asociada a la Capacidad del arco $a_{i,j}$
- $SaVia_{i,j}$: Seguridad asociada a la Tipología de vía del $a_{i,j}$
- $SaCarr_{i,j}$: Seguridad asociada al N^o de carriles de cada $a_{i,j}$

2. Seguridad asociada a la Tipología de “Carril Bici”. La influencia que atesoran las diferentes tipologías de carriles bici en cuanto a la elección de ruta de los usuarios se exponen en el trabajo presentado por Tilahun y Nebiyou¹¹⁶. La publicación expone una evaluación de las cinco tipologías de infraestructuras frente al tiempo de viaje. La clasificación de las infraestructuras es: carril bici separado de la vía, carril bici en el lateral de la calzada (sin estar permitido el estacionamiento de vehículos), carril bici en el lateral de la calzada (con estacionamiento permitido de vehículos), sin carril bici y sin estacionamiento de vehículos permitido en el lateral de la calzada y sin carril bici y con estacionamiento permitido de vehículos en el lateral de la calzada. Sus resultados fueron una preferencia estimada de los usuarios que aumentaba su tiempo de viaje en hasta 20 minutos en caso de cambiar la elección del tipo de infraestructura. Produciéndose un cambio de elección desde el peor escenario (sin carril bici estando permitido el estacionamiento de vehículos en el lateral de la calzada) al mejor escenario posible (carril bici separado de la vía).

Se recuerda las diferentes conclusiones del estudio presentado por Dill y Carr³⁴. La relación existente entre un mayor número de infraestructuras para la bicicleta con el

número de ciclistas. Esto es debido a la posibilidad del aumento de la percepción de seguridad de los ciclistas. En España, en el año 2010, Sanz¹ presentó un análisis de las publicaciones de los manuales de diseño y/o recomendaciones específicas realizadas en España para este tipo de infraestructuras. Concluyendo el estudio en la existencia de 8 tipologías diferentes en función de sus características geométricas.

En el estudio presentado por Sorton¹¹³ se realizó uno de los primeros intentos de medir el nivel de servicio percibido por los usuarios de la bicicleta en una carretera. Basado en un método simple y teniendo en cuenta la anchura del carril, el volumen de tráfico de la vía de circulación y la velocidad de los vehículos a motor. No sería hasta algunos años después cuando Jensen⁷², en sus diferentes estudios, aporta algunos modelos sobre el nivel de satisfacción de los ciclistas, con la presencia y la anchura de los carriles bici como principales variables.

Tras el análisis de los diferentes estudios consultados, se procedió a programar el algoritmo con una sección que tuviese en cuenta un coeficiente de seguridad asociado a las diferentes tipologías de infraestructuras para la bicicleta. Este coeficiente de seguridad sería:

- $Scb_{i,j}$: es la seguridad asignada para cada tipología de infraestructura destinada al uso exclusivo de la bicicleta.

En capítulos anteriores se definió las diferentes clases o tipologías de infraestructura para la bicicleta que se iban a tener en cuenta a la hora de planificar y diseñar una infraestructura óptima y adecuada para los diferentes usuarios dentro del caso aplicado al municipio de Málaga. Se recogen los coeficientes de seguridad asignados a las 5 tipologías que se consideran básicas en la programación matemática del algoritmo, estos coeficientes de seguridad corresponderían a:

El valor de seguridad corresponde a cada una de las cinco tipologías planteadas en el diseño del algoritmo. Tal y como se podrá comprobar en las secciones posteriores, se permite cambiar fácilmente el valor de seguridad de cada tipología según los estudios previos o encuesta de preferencias de movilidad realizada para cada uno de los casos en cuestión.

Tipología de Carril Bici	Seguridad
Acera Bici	1
Acera Bici Segregada	2
Calzada Bici	3
Calzada Bici Protegida	4
Ciclovía	5

Tabla 6.7: Seguridad asociada a la Tipología de Carril Bici. Elaboración propia.

3. Seguridad total del arco. Se destaca la seguridad como tema relevante en la planificación y diseño de las infraestructuras para la bicicleta dentro del entramado urbano de la ciudad. Se presta especial atención a la hora de minimizar los posibles tramos de viajes que se puedan realizar en arcos relativamente peligrosos, asegurando rutas seguras y evitando posibles conflictos con el tráfico rodado y peatonal, con una correcta definición de espacios para cada miembro de la vía pública.

Para optimizar la seguridad de los tramos, se ha realizado la configuración capaz de obtener el sumatorio total de la seguridad disponible en cada uno de los arcos que conforman la red vial. Dicha suma está compuesta por la seguridad disponible en cada $a_{i,j}$. Se determina a partir de las características propias de la red y la seguridad asociada por las diferentes tipologías de infraestructura para la bicicleta que se puedan implantar en cada uno de los recorridos. El resultado es la Seguridad Total del arco ($St_{i,j}$), definido como:

$$St_{i,j} = Sv_{i,j} + Scb_{i,j} \quad (6.11)$$

El resultado de $St_{i,j}$ facilita la información sobre la seguridad total que tiene cada arco con las diferentes infraestructuras de “carriles bici” que se pueden implantar para dicho arco.

La primera comprobación llevada a cabo por el algoritmo está basada en la verificación del espacio disponible en las diferentes secciones que conforman el arco del entramado vial (calzada, acera y aparcamiento). Dicha comprobación, puede dar

como resultado la posible implantación de más de una tipología de "carril bici" en un arco determinado. Es decir, para un arco, $a_{i,j}$, con unas características de espacio físico óptimas en cuanto a anchura se refiere, se puede diseñar diferentes tipologías para el uso de la bicicleta.

En este sentido, se ha diseñado una optimización en el código del algoritmo para obtener el resultado máximo, en cuanto a la seguridad total en un arco. Cuando en un mismo arco exista la posibilidad de implantar diferentes secciones de "carriles bici" la programación matemática planteada elegirá la opción que maximice la seguridad.

$$\text{máx } St_{i,j} = Sv_{i,j} + Scb_{i,j} \geq Sv_{i,j-1} + Scb_{i,j-1} \quad (6.12)$$

La compilación planteada facilita garantizar el recorrido más seguro por cada uno de los arcos ($a_{i,j}$). Esta codificación está condicionada directamente con la posibilidad de implantación de los diferente tipo de "carril bici", teniendo como resultado la opción más segura en el arco. Por tanto, se produce una disminución del riesgo de accidentes por la planificación segura, y, sobre todo, se puede obtener un aumento de la percepción de seguridad de los posibles usuarios de la bicicleta.

Perfiles de Seguridad

El modelo de ciudad y las pautas de comportamiento asociados a los usuarios de la bicicleta están directamente relacionados y por ello se debe constituir un planteamiento adecuado de modelo urbano. Según Cervero¹⁴, se observan que en comunidades donde los servicios para el transporte a pie o bicicleta están bien equipadas, los usuarios realizan un 49 % de sus viajes al trabajo y un 15 % de otros viajes en estos modos.

La inclusión de los peatones y las bicicletas como parte del sistema de transporte urbano ha provocado un cambio de mentalidad en la planificación y diseño del transporte⁷⁵. Este proceso de cambio está convirtiendo a la bicicleta en un modo de transporte atractivo al conjunto de la sociedad, ocupando la bicicleta un lugar importante dentro de la oferta del transporte. Como consecuencia de este cambio de pautas y mentalidad

se encuentra el sistema de bicicleta pública y la continua apuesta de las diferentes administraciones por la implantación de infraestructuras para el uso de la bicicleta como modo de transporte.

La implantación de estos sistemas, junto con otras medidas llevadas a cabo por las diferentes instituciones públicas, han dado lugar a un cambio en el reparto modal de las ciudades, aumentando la demanda ciclista donde el número de usuarios de la bicicleta eran bajos⁸⁶. La seguridad está condicionada por la percepción de cada uno de los usuarios⁵⁶ y por ello los ciclistas más experimentados suelen sentirse más cómodo a la hora de circular en bicicleta que los ciclistas menos experimentados, teniendo una calificación del confort mayor⁵⁶. Todo ello induce a pensar que el aumento del número de usuarios ciclistas habituales modificará la percepción global de la seguridad y, por tanto, las pautas a seguir para el futuro diseño de las infraestructuras para la bicicleta.

En este sentido, se desglosa los perfiles de seguridad en dos apartados claramente diferenciados. El primero de ellos, basados en perfiles de usuario genéricos con una percepción de seguridad asignada para las diferentes tipologías de usuarios. Como segundo bloque, se presta atención los datos zonales. Se analizan las diferentes características socioeconómicas de cada zona de transporte que marcarán las variables que condicionan la percepción de seguridad global por zonas a la hora de diseñar y planificar la infraestructura ciclista.

1. Perfiles de usuarios. Tras la realización encuesta realizada sobre la movilidad y preferencias de uso de la bicicleta se definen los perfiles de seguridad asociados al caso particular de la ciudad de Málaga. Se ha desarrollado varios perfiles que definen la seguridad del usuario de la red ciclista, Su . Ésta seguridad del usuario se define como la mínima seguridad permitida que debe superar cada uno de los arcos para que se tengan en cuenta un arco $(a_{i,j})$ en el diseño y planificación de las infraestructuras para la bicicleta.

Con el trabajo llevado a cabo por Sorton¹¹³ se analizaron el nivel de estrés sufrido por los ciclistas, tanto experimentados como ocasionales. El estudio se basó en las características propias de la calle por la que se disponen los viajes, como: el ancho de

carril, el volumen de tráfico y la velocidad de circulación adyacentes. Se distingue una influencia en la seguridad a partir de la percepción de cada uno de los usuarios, como refleja el trabajo de Harkey⁵⁶, dónde se concluye que los ciclistas más experimentados suelen sentirse más cómodo a la hora de circular en bicicleta que los ciclistas menos experimentados, teniendo una calificación del confort mayor.

Como parte central de esta sección de la investigación, se acentúa el diseño del algoritmo con respecto al perfil genérico de usuario. Los diferentes tipo de perfiles de usuarios han sido contemplados para garantizar una planificación de la infraestructura para las bicicletas que sean capaces de cumplir los requisitos mínimos de seguridad, comodidad y atractivo. De este modo, se asegura una respuesta positiva por parte de los usuarios de la vía pública plasmándose en un mayor número de viajes realizados con este modo de transporte.

Para un correcto diseño de los "carriles bici", se muestran los diferentes tipo de perfiles de usuario genérico (Pu) con el factor de seguridad mínima asignado a cada uno de ellos. En la tabla 6.8 se manifiestan dichas tipologías:

Perfil de Usuario	Descripción	Seguridad Mínima
Tipo 1	Experto	1
Tipo 2	Usual	2
Tipo 3	Ocasional	3
Tipo 4	Inexperto	4

Tabla 6.8: Seguridad asociada al Perfil del usuario genérico. Elaboración propia.

Una especificación de los diferentes perfiles de usuarios detallados en el algoritmo se corresponderían con:

1. Experto: se incluyen como expertos a los usuarios habituales de la bicicleta. La percepción de la seguridad está diferenciada para aquellos usuarios cuyo modo de transporte diario es la bicicleta⁵⁶. Los usuarios poseen una disposición del confort mayor. Por este motivo, se define la tipología Experto con un coeficiente de seguridad mínima asociada de 1.

2. Usual: se especifica como usuales a aquellos usuarios con un uso moderado de la bicicleta, como por ejemplo los usuarios con fines deportivos o de ocio. Existe una habilidad alta en el manejo a la hora de montar en bicicleta, lo que produce una mayor sensación a la hora de circular que los usuarios menos experimentados.
3. Ocasional: esta tipología recoge a todos los usuarios que tienen conocimientos para montar en bicicleta pero no tienen experiencia a la hora de circular en la vía pública. La percepción de seguridad, a diferencia de las otras dos tipologías de usuarios, es considerablemente menor⁵⁶.
4. Inexperto: cuando exista una mayoría de usuarios con poco manejo o no sepan montar en bicicleta, se designará dicha tipología. El coeficiente de seguridad a superar es significativamente mayor que en el resto de tipologías, debido a una necesidad de diseñar las infraestructuras que produzca la mayor sensación de seguridad vial para los usuarios de la bici.

Además, el algoritmo está diseñado para modificar los parámetros de seguridad de cada uno de los perfiles. Ésta opción proporciona grandes ventajas debido a la editabilidad de los parámetros de seguridad mínimos para cada uno de dichos perfiles. Se proporciona una capacidad de adaptabilidad a cada uno de los diferentes casos de estudios en el que se vayan a diseñar y planificar las infraestructuras para la bicicleta con la presente metodología.

Una vez establecido el perfil de usuario genérico para el caso de estudio, la manera de operar consiste en realizar la comprobación de la seguridad asociada en cada uno de los arcos ($St_{i,j}$). Ésta comprobación de seguridad mínima será la que debe cumplir un arco para que sea óptimo a la hora de plantearse en el diseño y/o planificación de la infraestructura para la bicicleta. Está basada en el sumatorio de seguridad total del arco, explicado en la sección anterior de este capítulo.

Se define un arco ($a_{i,j}$) como seguro para el perfil de usuario genérico establecido cuando la seguridad total del arco sea mayor a la mínima establecida por el perfil de usuario genérico (Pu). Se aceptará un arco, con la infraestructura correspondiente, como seguro cuando se cumpla:

$$St_{i,j} \geq Su \quad (6.13)$$

Siendo la seguridad total del arco como $St_{i,j} = Sv_{i,j} + Scb_{i,j}$ y, estando el factor de seguridad del usuario Su condicionada por la tipología de perfil del usuario Pu .

2. Perfiles zonales. Existe una relación de semejanza con respecto a la sección anterior a la hora de comprobar la seguridad mínima que debe cumplir un arco para que sea tratado como apto a la hora de considerarlo en la planificación de la posible futura red de carriles bici.

En este apartado, se han definido diferentes coeficientes de peso sobre la seguridad para cada una de las zonas de transporte en las que se encuentra distribuida la ciudad de Málaga. En el capítulo de *Tratamiento de Datos*, se hacía referencia a cómo estaba diseñada la infraestructura de la red vial y todas y cada una de las características que conformar la base de datos asociados a los arcos que componen el entramado urbano del municipio. Una de las variables que definen a los arcos es el área de transporte al que pertenecen. De este modo, se asocia al área de transporte la información correspondiente sobre datos socioeconómicos, de vivienda, los diferentes equipamientos, etc.

La primera comprobación a realizar por la programación matemática está relacionada con la zona a la que pertenece el $a_{i,j}$ de la red. Cada arco estará definido por características propias zonales. Para el desarrollo de este estudio se han tenido en cuenta como factores de peso sobre la seguridad zonal las características de: sexo, edad, número de hogares, tamaño medio del hogar, número de vehículos, número de hogares con posesión de vehículos, estudiantes, trabajadores, equipamientos y número de viajes. Todas estas variables se describen individualmente.

- **Sexo.** Una vez revisada la documentación científica relacionada con la caracterización del usuario de la bicicleta, no hay estudios sobre la variable de género. Si es cierto que se destacan algunos artículos y estudios como los elaborados por Pucher¹⁰². Se señala que en ciudades dónde la bicicleta está asentada como

Para estudiar la importancia del sexo a la hora de diseñar y planificar las futuras infraestructuras para la bicicleta, el algoritmo se ha configurado con unos coeficientes de peso de la variable sexo. Por tanto, se produce un aumento o disminución de la seguridad total que deberá superar una tipología de "carril bici" que transcurre por un arco para que sea óptima, a la hora de estar disponible por el algoritmo para el futuro diseño de la infraestructura. Esta configuración de variables se diseña de la siguiente manera:

$$Z_{hombre_i} \geq Z_{mujer_i} = \beta_{hombre} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.14)$$

$$Z_{mujer_i} \geq Z_{hombre_i} = \beta_{mujer} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.15)$$

La estructura del algoritmo busca el número de usuarios que predomina por sexo. A partir de la asignación del valor correspondiente para cada coeficiente de β_{hombre} y β_{mujer} se producirá el aumento o disminución de la seguridad mínima que debe de tener un arco en función de la influencia que definida en la planificación, obteniéndose como resultado de las preferencias en las encuesta de movilidad y preferencias del usuario.

- **Edad.** La relación entre la edad y el uso de la bicicleta como modo de transporte tiene una dificultad añadida. Según Rierveld¹⁰⁶, existen algunas discrepancias, aunque se puede definir como sector de edad más proclive entre los 18 y los 45 años³⁴. El factor de la edad se vincula directamente con el estado físico de las personas, lo que condiciona a tener una mayor o menor capacidad de usar la bicicleta como modo de transporte.

En este sentido, se ha representado la importancia que puede tener la variable edad a la hora de usar tomar la decisión de usar la bicicleta y la diferente percepción de seguridad para cada tipología de usuario. El desarrollo llevado a cabo por el algoritmo se centra en el rango de edad predominante en cada una de las zona. De este modo, se favorece un diseño óptimo para el mayor número de usuarios habituales y potenciales de la bicicleta en cada una de las diferentes infraestructuras

para la bicicleta.

$$Z_{edad1_i} \geq Z_{edadn_i} = \beta_{edad1} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.16)$$

$$Z_{edad2_i} \geq Z_{edadn_i} = \beta_{edad2} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.17)$$

$$Z_{edad3_i} \geq Z_{edadn_i} = \beta_{edad3} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.18)$$

$$Z_{edad4_i} \geq Z_{edadn_i} = \beta_{edad4} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.19)$$

Para la variable edad, se han distribuido los datos demográficos en 4 tipologías. Cada una con su correspondiente valor en torno a la seguridad asignada para cada grupo (β_{edadn}). La formulación planteada en el algoritmo asigna el peso de seguridad correspondiente al máximo valor de edad en cada una de las zonas Z_i . El factor de seguridad resultante estará proyectado para maximizar el mayor número de usuarios de la bicicleta, a partir del correcto diseño y planificación a la hora de ejecutar una infraestructura para la bicicleta acorde a las necesidades de la población.

- Número de hogares.** La importancia en la variable de número de hogares se recoge tras el análisis realizado de la documentación científica consultada²⁰. En la distribución municipal es importante tener en cuenta las zonas con una mayor densidad demográfica y, por tanto, con un mayor número de hogares²¹. por lo que se ha considerado este mayor número a la hora de planificar y diseñar las posibles infraestructuras de la bicicleta. De esto modo, para cada una de las Z_i , se ha asignado un valor diferente a la seguridad mínima que deben de poseer cada uno de los posibles arcos $a_{i,j}$.

$$Z_{hogar1_i} \geq Z_{hogarn_i} = \beta_{hogar1} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.20)$$

$$Z_{hogar2_i} \geq Z_{hogarn_i} = \beta_{hogar2} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.21)$$

$$Z_{hogar3_i} \geq Z_{hogarn_i} = \beta_{hogar3} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.22)$$

Se llega a la conclusión que, en zonas con una población media, es necesario aumentar la seguridad para fomentar el uso de la bicicleta a partir de una infraestructura más segura para el mayor número de usuarios posible. Este diseño matemático está basado en el desglose sobre 3 categorías para el número de hogares, tal y como

se verá en el siguiente capítulo,. Cada uno de los valores podrán ser editados de una manera rápida y cómoda que facilite una mejor práctica en el diseño urbano de la movilidad.

- **Tamaño medio del hogar.** Directamente relacionada con la variable anterior, el tamaño de hogar tiene una fuerte influencia en la elaboración de los modelos de transporte y es una variable primordial a la hora de realizar la generación y distribución de la totalidad de viajes en las ciudades²⁰. Existe una correlación directa entre el tamaño de hogar y la elección de modo de viaje. Un ejemplo sucede en núcleos familiares elevados en el que no todos los miembros pueden tener acceso a vehículos privados, por lo que cualquier otro modo de transporte se convierte en posible.

$$Z_{TMH1_i} \geq Z_{TMHn_i} = \beta_{TMH1} \quad \forall a_{i,j} \in Z_i \quad (6.23)$$

$$Z_{TMH2_i} \geq Z_{TMHn_i} = \beta_{TMH2} \quad \forall a_{i,j} \in Z_i \quad (6.24)$$

$$Z_{TMH3_i} \geq Z_{TMHn_i} = \beta_{TMH3} \quad \forall a_{i,j} \in Z_i \quad (6.25)$$

Debido al vínculo entre el tamaño medio del hogar y el número de viajes generados, se diseña una línea de códigos para tener en cuenta las zonas (Z_i). Las zonas con mayor índice y valor para el TMH (tamaño medio del hogar) poseen un peso mayor de seguridad mínima que ha de tener un arco ($a_{i,j}$) para que se considere óptimo en la planificación de la infraestructura de “carriles bici”.

- **Número de vehículos.** Existe un uso mayor de la bicicleta en hogares con poca posesión de coches. Esta relación inversamente proporcional está definida en el estudio de estimación de la demanda ciclista de Ortuzar y Iacobelli²¹, y por ello se incluye el número totales de coches que existen como suma en cada una de las zonas en las que se distribuye la ciudad de Málaga.

Aunque el valor de cada uno de los pesos puede variar, dependiendo de las diferentes características del municipio de estudio, se desarrolla una relación directa entre el número de vehículos por zona y un aumento de la seguridad mínima que ha de tener los diferentes $a_{i,j}$, para que sean tratados como aptos por el algoritmo. El

peso nvh (número de vehículo medio) por Z_i queda definido de la siguiente manera:

$$Z_{nvm1_i} \geq Z_{nvmn_i} = \beta_{nvm1} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.26)$$

$$Z_{nvm2_i} \geq Z_{nvmn_i} = \beta_{nvm2} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.27)$$

$$Z_{nvm3_i} \geq Z_{nvmn_i} = \beta_{nvm3} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.28)$$

$$Z_{nvm4_i} \geq Z_{nvmn_i} = \beta_{nvm4} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.29)$$

La parte correspondiente al número de vehículos medio para cada una de las zonas está distribuida en cuatro intervalos diferentes. Dichos intervalos están planificados para obtener el resultado más representativo respecto a la afinidad existente entre en número de vehículos y el valor de la seguridad mínima que debe soportar un arco.

- **Número de hogares con vehículos.** En diferentes estudios, el número de hogares con vehículos se representa como el nexo entre la intensidad de motorización y posibles niveles de renta por tipología de hogar. Es cierto la gran similitud existente con la variable definida anteriormente de número de vehículos.

La intención de uso de dicha variable, se centra en el estudio de las zonas con un menor número de hogares cuya disponibilidad de vehículo sea nula y es debido a la mayor facilidad de los diferentes usuarios al cambio en la elección del modo de transporte. Con la finalidad de aumentar el reparto modal de la bicicleta a partir de un diseño más seguro de los diferentes posibilidad de red ciclista, el algoritmo define los pesos de los intervalos para $novh$ (número de vehículos por hogar) para cada Z_i , como:

$$Z_{novh1_i} \geq Z_{novhn_i} = \beta_{novh1} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.30)$$

$$Z_{novh2_i} \geq Z_{novhn_i} = \beta_{novh2} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.31)$$

$$Z_{novh3_i} \geq Z_{novhn_i} = \beta_{novh3} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.32)$$

$$Z_{novh4_i} \geq Z_{novhn_i} = \beta_{novh4} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.33)$$

El número de intervalos se definen para cada uno de los casos de estudio. En la

presente investigación, se han realizado 4 agrupaciones de intervalos para el análisis del factor de seguridad asociado a la variables de número de hogares con vehículos (*novh*).

- **Estudiantes.** El estudio de la variables "estudiantes" está asociada a la relación que poseen éstos con el nivel de ingresos y la edad. Existe una clara evidencia de la facilidad que tiene este tipo de usuario del cambio de modo de transporte⁹⁹. Se justifica la importancia de esta variable a la hora de calcular la seguridad mínima de diseño que debe de tener cada uno de los $a_{i,j}$.

Una parte de la literatura del transporte destaca la dificultad existente en el cambio modal de las personas con una edad avanzada o trabajadores. Se acentúa, la importancia del diseño del algoritmo para aumentar la seguridad en las zonas dónde exista un predominio de usuarios que sean estudiantes. La formulación sería:

$$Z_{estu1_i} \geq Z_{estun_i} = \beta_{estu1} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.34)$$

$$Z_{estu2_i} \geq Z_{estun_i} = \beta_{estu2} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.35)$$

$$Z_{estu3_i} \geq Z_{estun_i} = \beta_{estu3} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.36)$$

$$Z_{estu4_i} \geq Z_{estun_i} = \beta_{estu4} \quad \forall a_{i,j} \in Zi \quad (6.37)$$

El dilema producido por el cambio del reparto modal hacia modos de transportes más sostenibles tiene su corrección sugiriendo un aumento en la sensación de seguridad en las diferentes infraestructuras de carriles para la bicicleta. Una infraestructura diseñada con los coeficientes de seguridad mínimo para cada $a_{i,j}$ aportará un mayor número de usuarios de la bicicleta. En el caso particular de los estudiantes, este apartado está encargado de optimizar una infraestructura más segura, capaz de aumentar la percepción de dicho colectivo potenciando el uso de la bicicleta como modo de transporte habitual.

- **Trabajadores.** La variable sobre el número de trabajadores es similar a la anterior. La importancia dada al peso de la seguridad asociado al número de ocupados

(trabajadores) para cada zona está representado en la siguiente formulación:

$$Z_{ocu1_i} \geq Z_{ocun_i} = \beta_{ocu1} \quad \forall a_{i,j} \in Z_i \quad (6.38)$$

$$Z_{ocu2_i} \geq Z_{ocun_i} = \beta_{ocu2} \quad \forall a_{i,j} \in Z_i \quad (6.39)$$

$$Z_{ocu3_i} \geq Z_{ocun_i} = \beta_{ocu3} \quad \forall a_{i,j} \in Z_i \quad (6.40)$$

$$Z_{ocu4_i} \geq Z_{ocun_i} = \beta_{ocu4} \quad \forall a_{i,j} \in Z_i \quad (6.41)$$

El valor de seguridad mínimo establecido para cada uno de los valores, según el intervalo correspondiente, se representa como β_{ocu} , que tendrá un valor diferente para cada uno de los casos de estudio. Dicho valor tiene como objetivo aumentar la percepción de seguridad de los ocupados (trabajadores) para cada caso, con la finalidad de añadir nuevos usuarios para el modo de transporte bici.

- **Equipamientos.** La variable equipamientos depende del número de infraestructuras y servicios que dispongan cada una de las zonas de estudio. Entre estos servicios se han tenido en cuenta los diferentes equipamientos educativos (colegios, institutos, universidades, etc.), los equipamientos sanitarios y sociales (centros de salud, centros de la tercera edad, etc.). Además de los equipamientos deportivos disponibles, el número de tiendas y centros comerciales existentes por zona y el número de oficinas e industria que representan a un global de las empresas. El coeficiente de seguridad mínima para los equipamientos (β_{equi}) en cada zona se define como:

$$\beta_{equi} = (a < Z_{equi_i} \leq b) \quad \forall (a, b)_i \in Z_i \quad (6.42)$$

Todos y cada uno de los equipamientos disponibles en cada zona forman parte del entramado urbano y condicionan cada uno de los viajes caracterizándolos en tanto origen y destino, como en modo y motivo. El resultado del β_{equi} dependerá del intervalo definido para el número de equipamientos totales sobre cada zona Z_i .

- **Número de viajes.** La descripción de la variable número de viajes está condicionada por el número de equipamientos disponibles en cada una de las Z_i . El objetivo es obtener el coeficiente de seguridad mínimo de un arco (β_{viajes}), relacionado con el número de viajes. Con esta finalidad, el algoritmo tiene presente los equipamientos entendidos como generadores y atractores de viajes obligados. En definitiva,

aquellos equipamientos que produzcan un flujo de viajes habitual para cada uno de los usuarios al cabo de un día. En este sentido, se entienden como equipamientos generadores y atractores de viajes los equipamientos educativos, los equipamientos comerciales y los equipamientos industriales y oficinas. La elección de este tipo de equipamientos corresponde con la definición de viajes obligados, que se producen como consecuencia dichos equipamientos²⁰.

$$\beta_{viajes} = (a < Z_{viajes_i} \leq b) \quad \forall (a, b)_i \in Z_i \quad (6.43)$$

El estudio de la variable de viajes se centra en la revisión de las zonas más importantes a analizar en cuanto al número de viajes. Tiene especial interés el análisis de las M_{OD} y en la seguridad mínima β_{viajes} que debe tener cada uno de los arcos para que sea dado como óptimo en la posible planificación y diseño de la infraestructura destinada al uso de la bicicleta para trazar la red que una cada una de las Z_i .

■ Agrupaciones.

Una manera de optimizar la influencia de todas las variables que intervienen en el peso de la seguridad zonal se basa en la agrupación de las variables por temáticas. Todas las variables incluidas en la programación matemática presentada se clasifican en una de estas categorías:

- Población. En este grupo se han introducido las variables sobre edad, sexo, número de estudiantes y trabajadores. Cada una de estas variables condiciona el comportamiento de movilidad de la población, tal y como se ha señalado con anterioridad por la influencia notable de estas variables sobre las pautas viajes y percepciones de seguridad. Se define la variable de agrupación de la población como $\alpha_{poblacion}$.
- Vivienda. Para caracterizar el conjunto de variables de Vivienda, se han tenido en cuenta algunos parámetros que son representativos en la generación y tipología de viajes²⁰. El valor de $\alpha_{vivienda}$ está formado por la seguridad mínima asociada a las variables del número de hogares por zona, el tamaño de

hogar medio, el número de vehículos totales disponible por zona y el número de hogares que disponen de vehículos.

- Usos del suelo. La agrupación de los diferentes usos de suelo está representada por α_{usuelo} . Se caracteriza por las variables de los diferentes equipamientos disponibles en cada una de las zonas y por el número de viajes.

Tras lo descrito en este capítulo, el concepto de perfiles zonales facilita un correcto y óptimo cálculo para los coeficientes de seguridad mínimos adoptados por el conjunto de $a_{i,j}$. De este modo se garantiza que el total de arcos que componen la red se tengan en consideración en cada una de las zonas de transportes en las que se divide la zona de estudio. La utilización de las diferentes agrupaciones posibilita, de una manera cómoda, atribuir a cada conjunto el peso asignado correspondiente, siempre respetando la condición impuesta por el algoritmo respecto al sumatorio de las agrupaciones. Esta restricción tiene como objetivo la relación de control entre los tres conjuntos y se define como:

$$\alpha = \sum (\alpha_{poblacion} + \alpha_{vivienda} + \alpha_{usuelo}) \quad \forall \alpha = 1 \quad (6.44)$$

Para garantizar una mejor planificación y diseño de las futuras infraestructuras para la bicicleta, se ha clasificado las diferentes variables en 3 categorías. Cada una de estas categorías posee un peso específico de importancia relacionado con el factor de seguridad mínimo que deben de tener cada uno de los arcos ($a_{i,j}$). Cada uno de los valores o pesos de las 3 categorías condicionan la mayor o menor importancia que se le otorgan a cada conjunto de variables. Dependerá siempre de las características propias del caso de estudio en cuestión o de las preferencias asignadas por los técnicos responsables.

Se concluye con el apartado de las agrupaciones de las tres variables descritas. Una manera de obtener el mayor número de usuarios, tal y como se ha apreciado tras el análisis de la documentación científica consultada, consiste en obtener la mayor sensación de seguridad para los diferentes usuarios de la vía pública. De este modo, cada uno de los arcos ($a_{i,j}$) pertenecientes a las diferentes Z_i llevan consigo unas seguridades mínimas para cada una de las variables agrupadas

(población, vivienda y usos del suelo). El resultado impuesto por el algoritmo recae en garantizar la máxima seguridad para el total de los usuarios. Por esta condición el $a_{i,j}$ elegido corresponderá con la tipología de infraestructura de carril bici más segura para la Z_i pertinente. Todo ello se derivará a partir de las diferentes percepciones de seguridad de la población de la zona de estudio.

El diseño presentado posibilita tres combinaciones para el cálculo de los *Perfiles de Seguridad* presentados en el presente capítulo. La primera opción expuesta por el algoritmo se resume en la creación de diferentes perfiles de seguridad-tipo proyectado a partir de los datos sobre movilidad y preferencias de uso que se obtienen como conclusión de las encuestas de movilidad. Este primer perfil de seguridad se adapta a la totalidad de los arcos ($a_{i,j}$) que forman la red vial del caso de estudio, dónde cada uno de los arcos debe cumplir una seguridad mínima común para que el algoritmo trate a dicho $a_{i,j}$ como favorable.

Por otro lado, se opta por la agrupación de datos zonales. De este modo se comprueba la seguridad mínima que deben de cumplir los arcos para que sean tratados como aptos a la hora de considerarlos en la planificación de la futura red de carriles bici. Las diferentes variables estudiadas están relacionadas con la información de la base de datos de la red vial dónde se definen los diferentes coeficientes de seguridad mínima de cada variable β . Una primera comprobación del algoritmo se basa en verificar la zona a la que pertenece cada arco, donde éste adquiere las diferentes características propias de la zona a la que corresponde. El total de las β de cada variable será el encargado de capacitar la seguridad mínima que debe soportar cada $a_{i,j}$.

En la investigación llevada a cabo se han diferenciado que variables afectan a la percepción de seguridad y protección de los diferentes usuarios. Un esfuerzo para aumentar el número de usuarios de la bicicleta se basa en mejorar el diseño de las futuras infraestructuras destinadas a dicho uso. En este sentido se destaca la tercera parte de los Perfiles de Seguridad basadas en las agrupaciones de las diferentes variables zonales. La división en datos de población, vivienda y usos del suelo, tienen un doble objetivo. El primero es complementar y darle un valor de representación mayor a las

diferentes variables agrupadas, realizando estudios de percepciones de seguridad con una doble profundidad y exactitud.

Desde otro punto de vista, tiene como objetivo poder simplificar la labor de los diferentes técnicos encargados en planificar y diseñar las infraestructuras destinadas al uso de la bicicleta. El proceder de dicha tarea se basa en la sola implantación del cálculo de los coeficientes de seguridad mínima α de las diferentes agrupaciones de datos, donde cada peso de las variables individualmente β tendrían el mismo valor. Se destaca un perfil de seguridad zonal con datos agregados, con un cálculo muy rápido para cualquier estudio sobre la implantación y diseño de carriles bici.

Optimización de la Seguridad

La posibilidad de implantar el carril bici en el espacio de la vía pública ha sido uno de los principales objetivos planteados en la presente investigación. El procedimiento explicado durante el desarrollo de este capítulo, resume una nueva forma de tener en cuenta el entramado urbano desde el punto de vista de la infraestructura, y desde la relación que posee con cada uno de los diferentes usuarios de la vía pública y las preferencias en cuanto a movilidad a la hora de realizar el número total de desplazamientos dentro de un municipio.

Con el fin de obtener la mejor infraestructura posible se ha estructurado la configuración del algoritmo para proporcionar la solución más segura dependiendo de las variables seleccionadas que tomarán partido en la caracterización de cada uno de los arcos, $a_{i,j}$, de la red vial. Para garantizar la seguridad máxima, se realiza la comprobación de cada uno de los $a_{i,j}$, con la seguridad intrínseca que poseen por sus características físicas ($Sv_{i,j}$), la seguridad asociada a la tipología de “carril bici” que puede implantarse en el arco ($Scb_{i,j}$), obteniéndose una seguridad total que posee cada $a_{i,j}$ como suma de $Sv_{i,j}$ y $Scb_{i,j}$.

Para la aceptación de validez de cada uno de los arcos como “aptos” a tener en cuenta para la posible red de infraestructura de la bicicleta, se ha establecido a partir de la seguridad del usuario Su . Dicho coeficiente marcará la seguridad mínima que debe disponer cada $a_{i,j}$ que conforma la red vial para que sea declarado como idóneo a la

hora de poder implantar la infraestructura para la bicicleta.

En este sentido, se ha desglosado con anterioridad los dos perfiles de seguridad configurados en el algoritmo, el perfil de usuario y perfil zonal. En el primer caso, para el perfil de usuario genérico es necesario definir los diferentes tipos de usuario según su hábito de uso de la bicicleta. Y, por tanto, una seguridad mínima relacionada para dicho usuario ⁴. El resultado de la optimización de seguridad se obtiene con la totalidad de arcos que forman la red vial, con una seguridad mayor que la mínima definida por Pu . Éstos arcos definen las diferentes posibilidades de la infraestructura de carriles bici a partir de la optimización de la seguridad.

El procedimiento llevado a cabo para el segundo caso es similar. Se diferencia en el uso de perfiles de seguridad zonales. La seguridad mínima que debe de obtener cada $a_{i,j}$ está condicionada por la zona en la que se encuentre. Los datos revisados para cada una de las zonas son: sexo, rango de edad, tamaño medio del hogar, número de vehículos, número de hogares con disponibilidad de vehículos, número de personas que estudian, número de personas trabajadoras, número de equipamientos y número de viajes.

Cada una de las variables limitan el aumento o la disminución de la seguridad de cada uno de los arcos revisados $a_{i,j}$. Se procede a buscar la mejor opción de carril bici en función de la posible implantación de las diferentes tipologías de infraestructuras para la bicicleta.

Es importante no descartar ninguna de las posibles soluciones que pueden existir en la implantación de una infraestructura en los arcos que componen el entramado urbano de cualquier ciudad. Se realiza una comprobación de todas las opciones capaces de ajustar el carril bici en el arco. En un mismo arco $a_{i,j}$ se pueden implantar diferentes tipologías de carril bici. La seguridad asociada al arco es siempre la misma ($Sv_{i,j}$) y la seguridad total ($St_{i,j}$) depende del tipo de carril bici que se puede realizar en el $a_{i,j}$. Por lo tanto, la posibilidad del arco con mayor seguridad será el óptimo a tener en cuenta para la planificación de la red ciclista final.

⁴En la tabla 6.8 se exponen los diferentes perfiles de usuario genérico junto a la seguridad mínima de cada uno de ellos.

Cálculo de Rutas Mínimas

Se procede a explicar el cálculo de las rutas mínimas con las diferentes tipologías de infraestructura para la bicicleta entre los orígenes y destinos destacado en el caso aplicado del municipio de Málaga. La metodología se basa en la búsqueda de todos los recorridos determinados por la red caracterizados por todos los elementos que la componen.

La relación de los diferentes elementos del modelo de red está representados con un grafo $G = (N;A)$, donde N es el conjunto de nodos y A es el conjunto de arcos que conectan pares de nodos. En el caso particular del modelo de red de la ciudad de Málaga, se ha construido el digrafo ponderado⁵ con todas las características, a nivel de arco, que forman parte de las restricciones a tener en cuenta en el cálculo del camino más corto entre pares de nodos principales. Se describe, pues, como:

$$\min Z = \sum_{o,d \in [1, \dots, M]} d_{o,d} \quad (6.45)$$

En este sentido, se ha desarrollado el problema de la ruta más corta entre los centroides de la zonificación correspondiente para la ciudad de Málaga. Está basado en el Algoritmo de Dijkstra³² y su objetivo es encontrar el camino más corto o distancia entre todos los pares de nodos (x e y) del grafo diseñado para la red vial.

La basa de datos usada es el resultado obtenido con el análisis de las diferentes restricciones formuladas por el algoritmo en el modelo de optimización. Dicho proceso está planteado para, después del análisis de las restricciones, tener una simplificación del modelo de red vial de la ciudad de Málaga. Se obtiene de este modo una red simplificada con los arcos $(a_{i,j})$ capaces de ser considerados para la futura infraestructura de "carriles bici" de la ciudad.

⁵Un grafo es etiquetado o ponderado cuando dispone de aristas con asignación de peso (p), siendo éste un número real positivo.

Aplicación del algoritmo de Dijkstra El empleo del Algoritmo de Dijkstra³² se ha llevado a la práctica con el objetivo de calcular rutas específicas para una red ciclista, con conocimiento del origen y el destino de la ruta en cuestión.

Para un nodo X de origen y un nodo Y final, $d_k(x)$ corresponderá a la etiqueta del nodo x que será el indicativo de la distancia del nodo inicial al x en la iteración k -enésima. Como primer paso, se debe etiquetar al nodo inicial como $d_0(X) = 0$, puesto que la distancia del nodo con respecto a él mismo es nula. Para el resto de nodos de la red se formula como $d_0(x) = \infty$. Con la variables p , como indicador del último nodo etiquetado de forma permanente, correspondiente para el primer caso $p = X$.

En el caso que todos los nodos y estén conectados con el nodo p , es decir, existe el arco conector (p, y) , calculando su correspondiente etiqueta temporal para la iteración k -enésima, como: $d_k(y) = \min[d_{k-1}(y), d_{k-1}(p) + a(p, j)]$. Existe la peculiaridad de conservar la etiqueta de la iteración anterior: $d_k(x) = d_{k-1}(x)$ para todos los nodos x no conectados con p .

Para los nodos y que no poseen su etiqueta fija, se realiza la labor de buscar la de menor etiqueta. Una vez localizada, pasará a ser permanente y, por tanto, el nodo se considerará un nodo p , es decir: $d_k(p) = \min[d_k(y)]$. Una vez realizada esta comprobación, se vuelve a revisar el cálculos de los diferentes nodos y conectados con el nodo p . De esta forma, todos los nodos que dispongan de etiquetas permanentes pasarán a formar parte de la distancia del nodo inicial X .

En el caso particular del caso de estudio del municipio de Málaga se ha presentado un listado de corredores que enlaza las diferentes zonas de transporte existentes en las que se divide la ciudad. El algoritmo se basa en calcular la ruta mínima entre cada par de centroides que serán el resultado de la red urbana ciclista.

7

Modelos de simulación propuesto

7.1. Introducción

En este capítulo se describe la metodología llevada a cabo para la simulación de la planificación y diseño de la red ciclista urbana del municipio de Málaga. Se va a desarrollar los pasos seguidos para construir el modelo de simulación basado en la programación con Java.

Se diferencian 2 etapas seguidas para llegar a construir el modelo de simulación final. El primer apartado del modelo está basado en la lectura, por parte de Java, de la programación matemática del algoritmo en Matlab y su correspondientes resolución. El segundo apartado, se centra en la visualización de la red ciclista final para el caso particular de Málaga. Se concibe los diferentes mapas a partir de sistemas de información geográfica, como ArcGIS¹.

7.2. Planificación del diseño de simulación

La primera dificultad encontrada a la hora de conseguir una simulación eficaz y rápida, en el tiempo de procesado, ha sido superar la dificultad de lenguajes usado en la creación del algoritmo con la aplicación del software. En definitiva, conseguir que Java permitiese interactuar con la programación de Matlab. Posteriormente, se desarrolló la posibilidad de mostrar los resultados visualmente sobre un mapa georeferenciado. De manera que el potencial del software creado fuese total a la hora de utilizarlo como una herramienta para la planificación y gestión de redes de infraestructuras para la bicicleta.

El software empleado para el desarrollo de la aplicación ha sido Java con la versión 1.8.45. El uso de Java se ha debido a su facilidad para desarrollar aplicaciones y su facilidad de ejecución. Se ha necesitado de la librería de componentes para interfaces gráficas *Java Swing*². En cuanto a Matlab, se ha usado la versión 2012a. Además de la herramienta MatlabControl(4.1.0) que permite la comunicación directa entre Java

¹ArcGIS es un producto de la compañía ESRI. Un software diseñado para el uso y tratamiento de los sistemas de información geográfica.

²Java Swing es una biblioteca gráfica para Java que incluye widgets para integrar gráficas de usuario como pueden ser cajas de texto, pulsadores o botones, desplegables y tablas.

y Matlab a través de sus librerías. Finalmente, para la visualización de los resultados en mapas se ha usado SDK ArcGIS for Java³ que consiste en un kit de desarrollo para mostrar los resultados visualmente sobre un mapa.

El procedimiento llevado a cabo por Java se inicia a partir de generar el código de Matlab, en el que está basado el algoritmo. Para comunicarse con Matlab, se obtiene el objeto de configuración para formatos xml:

```
ConfigurationParameter config = ConfigXml.of(xml);
```

El proceso realizado por Java para Matlab está basado en 3 pasos:

- Generar el código.

Matlab

```
CodeMatlabGenerator cmg = new CodeMatlabGenerator(config, filePath);  
cmg.generate();
```

- Generar las opciones de conexión a Matlab.

Matlab

```
MatlabProxyFactoryOptions options = new MatlabProxyFactoryOptions.Builder()  
    .setHidden(true)  
    .setProxyTimeout(60000L)  
    .build();
```

- Ejecutar el código generado.

Matlab

```
MatlabProxyFactory factory = new MatlabProxyFactory(options);  
    MatlabProxy proxy = factory.getProxy();  
proxy.eval(code);
```

La aplicación Java genera el código Matlab a partir del algoritmo base y del fichero de configuración de variables. Es en éste segundo, dónde se define una amplia cantidad de parámetros y condiciones que permiten modificar el comportamiento del algoritmo de un modo muy flexible.

³La versión empleada para ArcGIS Runtime SDK para Java ha sido la 10.2.4. Actualizada para octubre de 2014.

Una vez el código Matlab ha sido generado, es enviado a Matlab para su procesamiento. A continuación, se ejecuta el código y se obtiene la resolución. El código usado para obtener los resultados procedentes de Matlab, se corresponde con:

Matlab

```
Object returnArguments = proxy.getVariable("dr");  
Object tiposCarril = proxy.getVariable("Tipcb");
```

Para finalizar la primera parte de lectura, la programación de Java está configurada para cerrar la conexión existente con el algoritmo en Matlab. De este modo, se ha obtenido como resultado la optimización de los diferentes arcos capaces de ser aptos para formar parte de la red urbana ciclista para el municipio de Málaga. Además, de su correspondiente optimización de recorridos gracias a las variables que condicionan los parámetros de seguridad. Se obtiene como resultado la tipología de “carril bici” más adecuada para cada uno de los casos estudiados.

El hecho de usar Matlab, como servicio para ejecutar el código, responde a la siguiente razón: el código generado por nuestra aplicación Java puede ser ejecutado directamente sobre Matlab independientemente. Sin necesidad de hacer uso de dicha aplicación, permitiendo así la posibilidad de trabajar de un modo independiente sobre Matlab. Si sólo se desea trabajar con los resultados generados por Matlab, se puede usar la aplicación Java de una manera independiente. Capaz de generar el código Matlab a partir del fichero de configuración creado de un modo más fácil y seguro, en comparación con modificar directamente el código Matlab. Cuando se dispone del código generado ya es posible trabajar con él sobre Matlab.

Cuando se desee hacer uso de todas las capacidades de la aplicación Java, el software generará el código Matlab y se comunicará de un modo transparente con Matlab, a partir de la lectura de los resultados. Haciendo uso de ellos automáticamente para ofrecer una visualización más comprensiva de los resultados del problema.

El resultado de la ejecución de Matlab, es leído dinámicamente por el software desarrollado en Java que emplea el resultado para mostrarlos de una manera visual. Para ello, muestra una tabla de resultados dónde se observa cada una de las ruta calculadas para los

54 corredores en los que se ha distribuido la red ciclista. Los datos facilitados en la tabla de resultados corresponden al origen y destino de cada uno de los corredores, su distancia total de recorrido y la ruta a seguir entre el conjunto de nodos que forman el corredor.

Para cada ruta, la aplicación es capaz de indicar qué tipo de “carril‘bici” es el más indicado para cada arco del camino, tras el cálculo de la optimización de seguridad realizado. Además, el software es capaz de interpretar y dibujar cada una de las rutas sobre un mapa. A través de una ejecución con el software de ArcGis. Lo que facilita la lectura de los resultados obtenidos. Y, por tanto, sirve como una herramienta rápida e intuitiva para facilitar el análisis y planificación de las infraestructuras para la bicicleta.

Se expone el código usado en la aplicación desarrollada en Java para la lectura con el software de ArcGIS a partir del kit para desarrollo de *SDK ArcGIS for Java*.

- Para dibujar una ruta en el mapa.

```
MAPA
```

```
Color color = generateRandomColor();
```

- Línea a dibujar en el mapa.

```
mapa
```

```
SimpleLineSymbol symLine = new SimpleLineSymbol(color, 4);
```

- Representación del objeto de línea.

```
ruta
```

```
Polyline polyline = new Polyline();
```

- Obtención de los nodos de ruta.

```
Point
```

```
pointGeometry = getPointFromNodeUTM(currentNode);
```

- Para añadir el nodo a la ruta.

```
ruta
```

```
polyline.lineTo(pointGeometry);
```

- Se crea un símbolo gráfico para representar en pantalla.

```
pantalla
SimpleMarkerSymbol nodeMarker = new SimpleMarkerSymbol
    SimpleMarkerSymbol(color , 13, Style.CIRCLE);
```

- Se asocia el punto geográfico (nodo) con el símbolo gráfico.

```
gráfico
Graphic pointGraphic = new Graphic(pointGeometry , nodeMarker);
```

- Para añadir el punto al mapa.

```
mapa
myGraphicsLayer.addGraphic(pointGraphic);
```

- Se asocia la ruta con la línea a dibujar.

```
dibujar
Graphic polylineGraphic = new Graphic(polyline , symLine);
```

- Se añade el gráfico de línea al mapa.

```
mapa
myGraphicsLayer.addGraphic(polylineGraphic);
```


8

Aplicación del caso práctico

8.1. Introducción

En capítulos anteriores, se ha desarrollado los procedimientos y métodos seguidos para el tratamiento de datos y la metodología llevada a cabo en la elaboración de la infraestructura de la red vial del municipio. Esta será la base de aplicación para el caso de estudio en cuestión.

En este capítulo se va a exponer uno de los principales objetivos en la elaboración de este trabajo: la aplicación de un método de optimización de recorridos de una red completa destinada al uso de la bicicleta para un caso de estudio real. Así, como del propio diseño de la infraestructura planificada.

El empleo de esta metodología en redes simples ha ayudado a definir posibles errores de aplicación y mejorar el algoritmo. Para, finalmente, ponerlo en servicio de un caso con dimensiones que permitan el tratamiento de un gran número de datos en un tiempo razonable para el alcance de la solución óptima de trabajo. La presente aplicación del trabajo a un caso real permitirá realizar una comparativa de las diferentes soluciones obtenidas por el algoritmo. Todo ello caracterizado por el entramado urbano real del caso de estudio.

8.2. Descripción del caso de estudio

El caso de estudio elegido, es la ciudad de Málaga y el sistema de carriles bici que opera en la actualidad. El término municipal de Málaga se encuentra situado en el sur de la península ibérica, en el extremo oeste del mar Mediterráneo. Con una extensión, aproximada, de 398 km^2 , la ciudad se sitúa en el centro de la bahía. Rodeada de sistemas montañosos y dos ríos, el Guadalhorce y el Guadalmedina, que traspasan la ciudad hasta desembocar en el Mediterráneo.

A continuación, se van a exponer los datos que se han tenido en cuenta para la realización del caso práctico en la ciudad de Málaga. Algunos de estos datos, se han presentado con anterioridad en este trabajo, recopiladas en el capítulo 4. *Tratamientos de datos.*

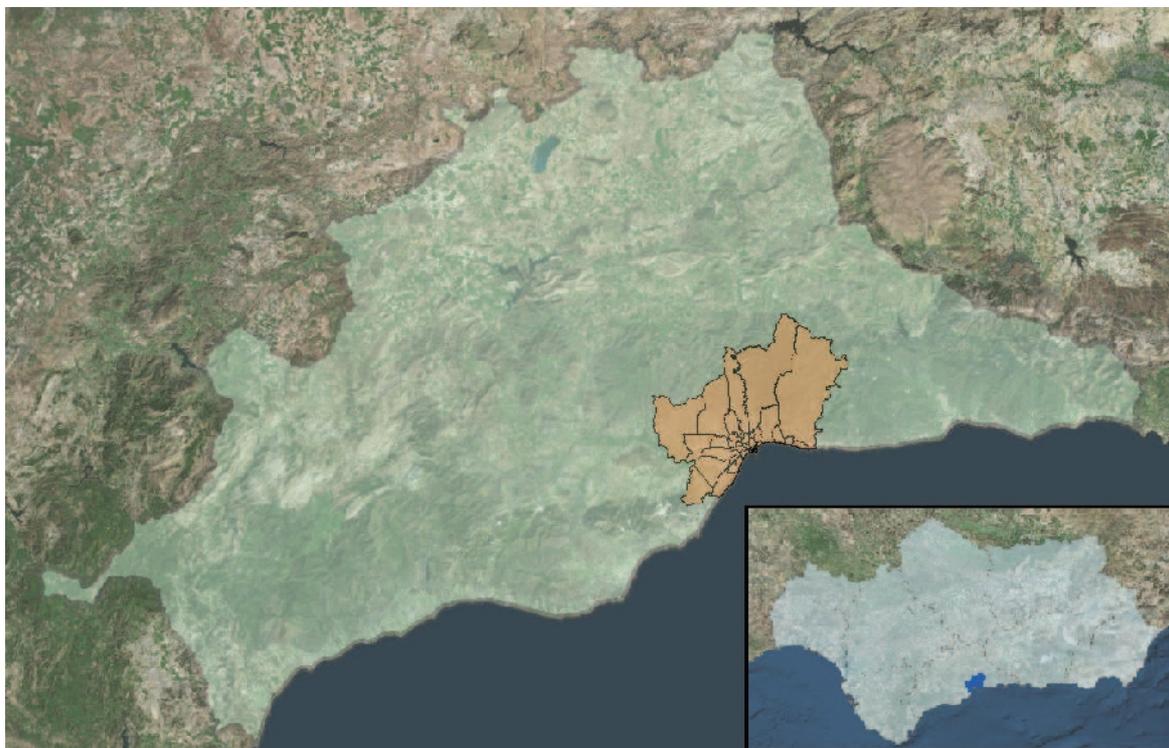


Figura 8.1: Situación Término Municipal de Málaga

Datos de Población

La población del municipio de Málaga, a comienzos de 2013, era de 568.479 habitantes¹. El crecimiento demográfico mantenido en la ciudad ha sido ascendente desde los años 60, cuando se contabilizaban algo más de 300.000 habitantes. Con un aumento de la población superando el umbral de los 500.000 habitantes en la década de los ochenta. Ocasionando un impacto característico demográfica y socialmente sobre la estructura física de la ciudad.

La distribución de la población, existente a tal fecha, es heterogénea en el término municipal de Málaga. Esto es debido a su considerable extensión y la gran dispersión territorial de su entramado urbano. No obstante, la mayor parte se concentra en los barrios que constituyen el frente litoral de la ciudad. Destacando la zona de la Carretera

¹Datos procedentes de estadísticas del padrón municipal y de las variaciones intercensales del INEbase (Instituto Nacional de Estadística).

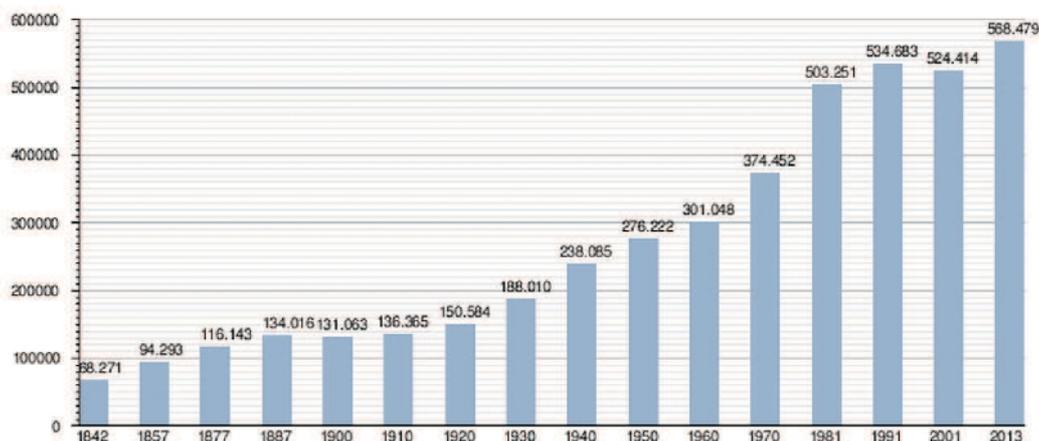


Figura 8.2: Evolución población Málaga

de Cádiz, el Centro Histórico y el Este, con una participación del 20%, el 15,2% y el 11,7%, respectivamente, en relación a la población total de Málaga². El resto de la concentración poblacional se localiza en su parte oeste. Concretamente en los barrios de Bailén-Miraflores, con un 11,2%, pero sobre todo en la zona del Cruz del Humilladero, donde habita el 16,9% de la población malagueña³.

La distribución poblacional, en el municipio, se caracteriza por la pérdida de población del Centro Histórico de Málaga. Aunque sigue siendo el encargado de gran parte de la actividad administrativa, comercial y de servicios del área metropolitana, caracterizando de este modo el nuevo diseño de la movilidad urbana.

No obstante, las zonas que poseen una mayor concentración de efectivos poblacionales de la ciudad son la Carretera de Cádiz, El Perchel y Cruz de Humilladero. Dónde habitan aproximadamente la mitad de la población urbana total. Es debido a esto, se convierten en las zonas con más alta tasa de generación de viajes de la ciudad hacia el Centro Histórico. Que, a su vez, está determinado por ser el mayor centro atractor de viajes, junto con la zona industrial del Guadalhorce.

Realmente la población, en la ciudad de Málaga, está singularmente distribuida de

²Distribución poblacional extraídas del PMMS (Plan Municipal de Movilidad Sostenible) de Málaga.

³Distribución poblacional extraídas del PMMS (Plan Municipal de Movilidad Sostenible) de Málaga.

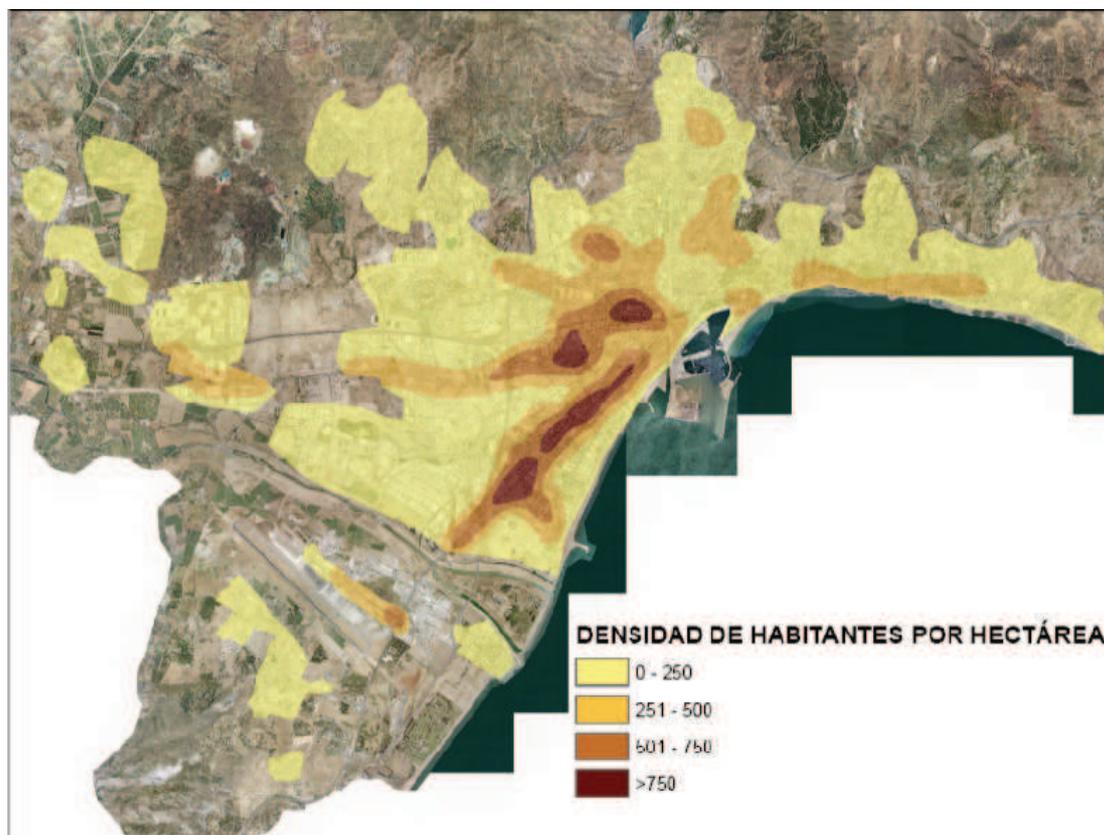


Figura 8.3: Densidad población Málaga

forma predominante en la mitad oeste del municipio, en detrimento del litoral este. Los barrios más poblados son todos aquellos situados entre la Ronda Oeste y el río Guadalmedina, junto con Teatinos, Olletas y el frente litoral. En relación a los núcleos más alejados del centro urbano, su importancia poblacional no es representativa. Los núcleos de Campanillas y Churriana sólo concentran el 2,9 % y 3,2 % de la población total respectivamente. En una comparativa con el resto de aglomeraciones urbanas andaluzas, la densidad del municipio de Málaga se estima, aproximadamente, en $1.423,5 \text{ hab./km}^2$.

Datos de Motorización

El factor de la motorización constituye uno de los principales condicionantes de la proporción del reparto modal del automóvil del municipio. En comparación con otras

⁴Datos extraídos del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, de la Consejería de Economía y Conocimiento de la Junta de Andalucía, para el núcleo poblacional de Málaga en el 2015.

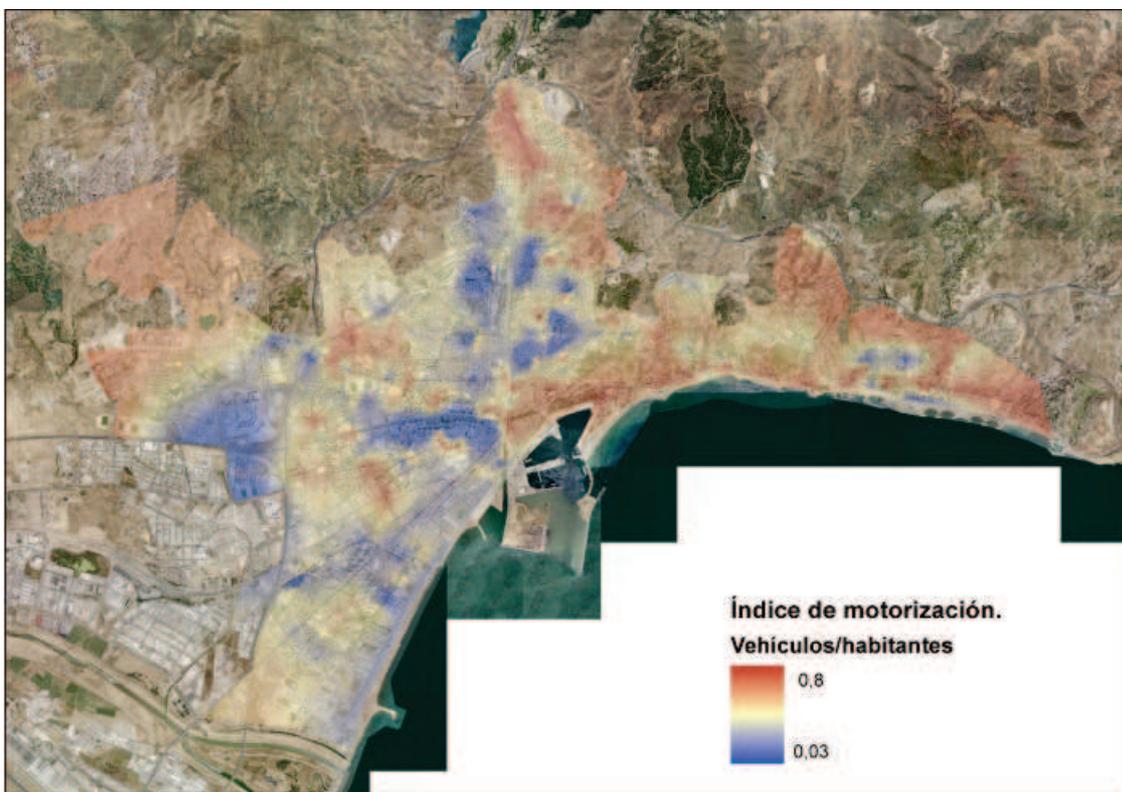


Figura 8.4: Índice motorización Málaga

ciudades andaluzas, el índice de motorización en Málaga se considera muy elevado. Aproximadamente con un total de 475 vehículos por habitante⁵.

La heterogeneidad de la motorización se hace presente en toda la aglomeración. Los valores de motorización del centro del municipio están entre la media española y europea de 400 vehículos para cada 1000 habitantes⁶. Mientras que en la corona exterior este índice aumenta al máximo de la ciudad de Málaga. Es un hecho constatado como existe una diferencia entre la motorización de los diferentes barrios.

En este sentido, tal y como se puede observar en el mapa de Índice de Motorización del

⁵Datos extraídos del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, de la Consejería de Economía y Conocimiento de la Junta de Andalucía, para el año 2006.

⁶Libro Verde: Hacia una nueva cultura de la movilidad urbana. Elaborado por la Comisión de las Comunidades Europeas, Bruselas (2007).

municipio de Málaga ⁷ los barrios de Cruz de Humilladero, El Perchel Sur, Capuchinos, Olletas y Teatinos muestran los índices de motorización más elevados. Datos ajustados a la caracterización de zonas con mayor población. Hay que tener en cuenta como los usos del suelo puede ser un determinante en el nivel de motorización de cada una de las zonas,. De este modo, tal y como se explicó en el apartado de *Perfiles Zonales de seguridad*, se expone la relación del número de equipamientos respecto al factor de seguridad asociado a los arcos posibles para implantar la infraestructura de carriles bici en cada una de las zonas determinadas.

Datos de Movilidad y Transportes

Para obtener una evaluación de las pautas de movilidad urbana sufridas en el municipio de Málaga, ha sido necesario realizar una comprobación y análisis de los resultados sacados en los estudios de movilidad realizados con anterioridad^{27 28 29}.

A partir del Estudio de Demanda de Movilidad en la ciudad de Málaga (2014)²⁹, se obtienen gran parte de los datos básicos de movilidad del municipio. El flujo de viajes resultantes que se producen en un día laborable es de 1.380.984 desplazamientos. Repartidos en un 50.1% como viajes mecanizados y, el 49.9% de los viajes como no mecanizados. En comparación con datos del 2008, se produce un aumento de la movilidad no motorizada en el municipio de Málaga.

En relación a la intensidad de la red vial, la distribución del tráfico motorizado en la ciudad sigue unos patrones característicos. Se basa en la localización de las diferentes actividades profesionales (industrial, comercial y servicios) de Málaga. Estos patrones se repiten en el principal viario de entrada y salida, con especial atención a las horas punta de la mañana para los viajes destinados en su mayoría al acceso del centro urbano. Y, en sentido contrario, existe una hora punta de regreso de viajes asentado en las horas de mediodía y la franja horaria de 6 a 7 de la tarde²⁴.

En la figura 8.5, se puede observar un mapa de las principales vías canalizadoras del tráfico motorizado para el municipio de Málaga²⁴. Se establece una clasificación de

⁷Mapa de Índice de Motorización del municipio de Málaga, extraído del PMMS (Plan Municipal de Movilidad Sostenible) de Málaga.



Figura 8.5: Principales vías canalizadoras de Málaga

la estructura de ejes viarios. Existe una distribución muy concreta de las actividades económicas en la ciudad y la relación proporcional con el índice de motorización y la densidad poblacional.

Uno de los objetivos prioritarios en toda gran ciudad, como el caso de Málaga, es garantizar un servicio de transporte público eficiente, cercano y accesible a todas las personas. Con el objetivo de disuadir al mayor número de usuarios estimulando un uso de los modos de transportes sostenibles en favor al uso masivo del vehículo privado. La proximidad del transporte público es uno de los factores más importantes a la hora de incentivar un mayor uso de la población. Se interrelaciona con la continua mejora sufrida, en los últimos años, en las infraestructuras destinadas para uso exclusivo de los diferentes sistemas de transporte público, estimulando la progresión de la intermodalidad en los desplazamientos de los usuarios.



Figura 8.6: Plazas aparcamiento bicicleta en Málaga

Datos de Movilidad en Bicicleta

La actual apuesta, por parte del Ayuntamiento de Málaga, para la implantación de una infraestructura destinadas al uso de la bicicleta ⁸ empieza a ver sus frutos. Se percibe el aumento del reparto modal del 0.4% para el año 2008, hasta obtener un 1.7%²⁹ en la actualidad. El crecimiento sufrido en la ciudad en el número de usuarios que eligen la bicicleta como modo de transporte, también está condicionado por la puesta en marcha del servicio de bicicleta pública, *malagabici*. A día de hoy, cuenta con un total de 23 estaciones repartidas por el centro histórico de la ciudad y principales ubicaciones estratégicas para la movilidad del municipio. Y más de 400 bicicletas disponibles para los usuarios. También, se hace mención a los nuevos aparcabicicletas instalados en la actualidad, constituyendo un total de 900 plazas para el estacionamiento de bicicletas privadas.

Datos de Zonificación

Partiendo de la documentación desarrollada en el capítulo sobre *Tratamiento de Datos* de la presente investigación, se va a proceder a explicar la zonificación empleada para el caso de estudio del municipio de Málaga²⁴.

El modelo se encuentra representado por una zonificación elaborada en el desarrollo

⁸Actualización de las previsiones de movilidad en la ciudad de Málaga, llevadas a cabo por el Plan Especial de Movilidad Urbana Sostenible de Málaga, con la actualización para el año 2015. Elaborado por el Área de Movilidad del Ayuntamiento de Málaga.



Figura 8.7: Infraestructura del carril bici en Málaga

de la presente tesis doctoral. Esta zonificación está basada en *Macrozonas*. Dichas macrozonas, son el resultado de la división de transporte realizada por la EMTSAM⁹ para el Área de Tráfico y Movilidad del Excmo. Ayto. Málaga. No obstante, para poder interrelacionar estos estudios, se han asociado las distintas macrozonas a las Áreas Histórico-Tipológicas que se presentan en el PGOU de la ciudad^{27 28}.

La adaptación de las nuevas macrozonas surge para suplir la falta de información existente en los diferentes trabajos revisados asociados a la movilidad del municipio. Se toma como base la distribución administrativa del municipio de Málaga de secciones censales facilitadas en el Instituto Nacional de Estadística¹⁰. Se disponiendo de cifras de

⁹Empresa Malagueña de Transportes, Sociedad Anónima Municipal. Empresa del Excelentísimo Ayuntamiento de Málaga, responsable de la gestión del transporte urbano en la ciudad de Málaga.

¹⁰La riqueza de la base de datos del Censo de Población y Vivienda permite conocer las características de las personas relacionadas con: sexo, edad, nacionalidad, niveles de estudios, situación laboral, movilidad, etc. Se disponen, a su vez, de datos sobre el tamaño, composición y núcleos de los hogares, describiendo diferentes categorías de viviendas, dependiendo de la superficie, habitaciones e incluso régimen de tenencia. Otros de los datos más importantes, usados en la elaboración de este proyecto, han



Figura 8.8: Clasificación zonal de Málaga. Elaboracion propia.

población y censo demográfico con datos actualizados para el año 2011.

Como resultado, se dispone de una nueva zonificación en 32 macrozonas, basadas en las presentadas por la EMTSAM. Todas adaptadas a la distribución del censo facilitado por el INE con las secciones censales. El conjunto de la base de datos por secciones censales actualizadas hace alusión a la zonificación resultante de 32 macrozonas elaborada en la presente investigación.

sido los vinculados a los diferentes equipamientos, donde se detallan el número y las diferentes tipologías (culturales, educativos, sociales, deportivos, industriales, etc.) existentes para cada una de las secciones censales analizadas.

Datos de Infraestructura de Red Vial

Uno de los ejes centrales de la investigación es la elaboración del modelo de red vial de la ciudad de Málaga. Para conseguir la optimización y diseño las diferentes infraestructuras para la bicicleta se dispone de la base de datos elaborada a partir de un modelo de red. Dicha modelización se llevó a cabo con el uso de PTV Visum ¹¹, adquiriendo una modelización consistente capaz de incluir a todos los usuarios de las vías públicas y sus interacciones con el entramado urbano.

Se formulan las variables que condicionan la red vial:

1. Nodo origen y destino: cada arco está definido por la conexión de nodos existente, representados por el inicio y final del propio arco.
2. Tipo de vía: para la modelización vial se han establecido 5 categorías de vías diferentes, con características genéricas propias para cada tipo. Las clases de vías se corresponden con: Semipeatonal, Urbana, Arterial, Carretera Nacional y Autovía.
3. Modo de transporte: para el caso particular de este estudio, se han incorporado 4 modos de transporte: B (bus), C (coche), W (a pie) y Bi (bicicleta). Cada uno de estos modos tiene sus características propias que condicionan la red vial del municipio.
4. Longitud: gracias al uso de herramientas basadas en sistemas de información geográficas, se dispone de la longitud de cada uno de los tramos de calles en los que se divide la red diseñada.
5. Número de carriles: cada uno de los arcos dispone de información sobre el número de carriles que conforman la calzada. El número de carriles puede variar dependiendo del tipo de vía o, en su caso, de tramos especiales del vial.
6. Anchura de carriles: una información muy valiosa para este estudio es el poder disponer de una descripción del ancho de cada uno de los carriles que conforman la infraestructura de la red vial de Málaga. Esta información repercute directamente

¹¹PTV Visum es uno de los software de modelización del transporte de PTV Group, perteneciente a Vision Traffic Suite es el estándar mundial en planificación de transporte, ingeniería de tránsito y simulación de tráfico basada en software y en gestión de datos SIG.

en la posibilidad de incorporar el carril bici en calzada o en su detrimento buscar otra alternativa viable para su ejecución.

7. Sentido de los carriles: la base de datos de la red vial dispone de información sobre los sentidos disponibles para cada uno de los arcos. De este modo se facilita posibles modificaciones de la circulación para la totalidad de modos que usan la vía pública.
8. Aceras: es el espacio público usado por los peatones. Dependiendo de la tipología de carril bici, es posible su implantación en la acera respetando un espacio de coexistencia entre peatones y ciclistas. Se dispone, en la base de datos, de la existencia de las aceras.
9. Anchura de aceras: además de contar con la posibilidad de existencia de acera en la base de datos de la red diseñada, se posee información de las anchuras de las aceras para los diferentes tramos del entramado urbano del municipio de Málaga.
10. Aparcamientos: la existencia de aparcamientos puede condicionar la planificación y diseño de las diferentes infraestructuras de los carriles bici. Se dispone de datos relacionados con los aparcamientos existentes en la red vial.
11. Anchura de aparcamientos: los datos relacionados con la anchura de los aparcamientos facilitan información sobre la tipología de aparcamiento existente y la posibilidad de implantar el carril bici en el lugar que ocupan en la vía pública.
12. “Carriles bici”: este apartado está relacionado con la infraestructura destinada al uso exclusivo de la bicicleta existente en el municipio de Málaga. Los datos están vinculados a los arcos dónde existe este tipo de infraestructura, facilitando información sobre la tipología de carril bici y su lugar de ejecución dentro del espacio público.
13. IMD: consiste en una clasificación basada en la intensidad media de los vehículos, porcentaje de ocupación y velocidades del conjunto de arcos.
14. Área de transporte: cada uno de los arcos tiene asignado el área de transporte a la que pertenece. Este apartado está directamente enlazado con la base de datos realizadas por secciones censales. Y, por tanto, con las diferentes áreas de transportes en las que se ha clasificado el municipio. Cada uno de los arcos tiene asociado la

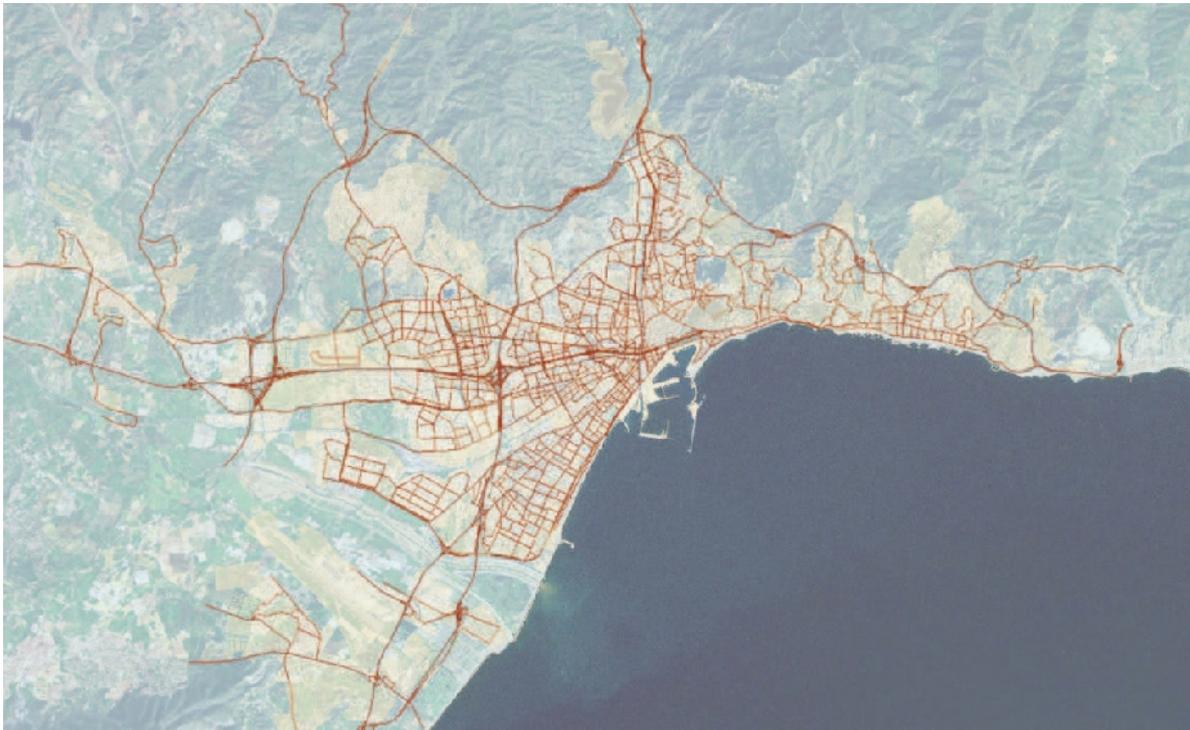


Figura 8.9: Modelo de Red Vial de Málaga

información correspondiente de su área de transporte sobre datos socioeconómicos, de vivienda, los diferentes equipamientos, etc.

8.3. Aplicación del modelo de optimización

La metodología desarrollada en el capítulo 6, sobre *Modelo de Optimización Propuesto*, se aplica a la ciudad de Málaga. Tal y como se describió, la formulación está basada en un modelo que propone minimizar la distancia a recorrer por cada uno de los corredores. La función objetivo se basará en el mínimo recorrido de dichos corredores. Condicionado, a su vez, por las respectivas restricciones y sus coeficientes de ponderaciones para el caso particular de los usuarios del caso práctico en cuestión.

La búsqueda de la distancia mínima a recorrer para el diseño e implantación de este tipo de infraestructuras reside en la creación de una infraestructura “cicloamistosa”.

A partir de la creación de una red de carriles para bicicletas capaces de ofrecer comodidad, seguridad y diversión durante el uso de la bicicleta como modo de transporte. Persiguiendo el ideal de obtener un mayor número de usuarios. Esto se consigue cuando la planificación y el diseño tienen éxito, a partir de la creación de un medio ambiente amistoso a los distintos tipos de ciclistas. Por lo tanto, se debe considerar a los ciclistas y futuros usuarios potenciales de la bicicleta, como clientes del sistema de tráfico y transporte ofreciendo una infraestructura de calidad. Tal y como se ha visto con anterioridad, algunos de esos requisitos se centran en asegurar un espacio suficiente en la sección a través de un diseño que minimice resistencias del resto de usuarios. Y considerar las diferentes percepciones de los ciclistas asegurando una infraestructura completa y comprensiva.

Infraestructura

El primer paso a realizar por el algoritmo consiste en la comprobación, de la base de datos de toda la red vial, con respecto a la posibilidad de implantar las diferentes tipologías de carriles para bicicletas. Esto se realiza a partir del análisis de las características de espacio físico disponible en cada arco y de la tipología propia del arco en relación al tráfico rodado que circula por dicho arco.

El modelo de red vial realizado consta de un total de 4.918 arcos modelizados. El gran número de arcos proporciona un alto nivel de detalle. Lo que facilita obtener un buen resultado a la hora de optimizar la infraestructura de carriles para la bicicleta en el caso de la ciudad de Málaga.

1. Características del espacio físico. Desde el punto de vista de las características propias de cada uno de los arcos, el primer paso consiste en comprobar las dimensiones de cada una de las partes que conforman las secciones transversales de las calles. A partir de la revisión y consulta del estado del arte, se han establecido las anchuras mínimas que condicionan la ejecución y diseño de las diferentes tipologías a implementar. Estas medidas mínimas para la implantación de los "carriles bici" en la red vial corresponde a la tabla 8.1.

Tipología	Anchura mínima
Acera bici	4.5 metros
Acera bici protegida	5 metros
Calzada bici	3.5 metros
Calzada bici segregada	3.5 metros
Ciclovía	3.5 metros
Carril bici por Aparcamiento	2.5 / 5 metros

Tabla 8.1: Anchura para implantacion de CB.

Los arcos que no cumplan las restricciones de espacio físico serán descartados por el algoritmo para futuras iteraciones. De este modo, se minimiza el número de arcos disponibles consiguiendo una rapidez de modelización y cálculo de la optimización mayor.

2. Características de la tipología de vía. La segunda comprobación, dentro del bloque *Infraestructuras*, corresponde a las características de circulación de la vía. Representadas por la velocidad de recorrido y la capacidad máxima de diseño de cada tipo de vía. Para la modelización vial se han establecido 5 categorías de vías diferentes, con características genéricas propias para cada tipo. Las clases de vías se corresponden con:

Tipo de vía	V_0	V_{max}	Capacidad
Semipeatonal	30 <i>km/h</i>	50 <i>km/h</i>	500 <i>veh./h</i>
Urbana	50 <i>km/h</i>	60 <i>km/h</i>	700 <i>veh./h</i>
Arterial	60 <i>km/h</i>	90 <i>km/h</i>	800 <i>veh./h</i>
C. Nacional	100 <i>km/h</i>	160 <i>km/h</i>	1000 <i>veh./h</i>
Autovía	120 <i>km/h</i>	180 <i>km/h</i>	1100 <i>veh./h</i>

Tabla 8.2: Tipología de vías modelizadas.

En esta sección, se presta gran importancia a la posibilidad de implantar la infraestructura diseñada para la bicicleta con un diseño seguro y atractivo para los diferentes usuarios (habituales y potenciales). En este sentido, se han definido las restricciones correspondientes para la tipología de vía. Reflejados a partir de la disponibilidad de

número de carriles existentes en cada arco. Estas restricciones son las plasmadas en el *Modelo de Optimización Propuesto* de la presente tesis.

Una vez se ha comprobado la disponibilidad de los arcos óptimos¹², se obtiene un listado de arcos inter-conectados. Dicho listado posee los arcos capaces de asumir la implantación de la futura red de carriles para la bicicleta de la ciudad de Málaga.

El diseño del algoritmo permite utilizar de una manera individual cada uno de los tres grandes bloques en los que está esquematizado (infraestructura, seguridad y perfiles de seguridad.) Para un diseño básico, ya se puede realizar la validación del modelo únicamente teniendo en cuenta las restricciones asociadas a las características del espacio físico y la tipología de vía. Obteniéndose el listado de arcos por los que puede implantarse la red ciclista urbana de Málaga.

Con el resultado de la base de datos de arcos óptimas, se puede ejecutar directamente el cálculo de las rutas mínimas a recorrer entre los nodos principales dados para el caso en particular del municipio de Málaga. Los diferentes ejemplos se presentan en el siguiente apartado de *Validación del modelo de optimización*.

Seguridad

Con la metodología presentada en el anterior bloque, se obtiene el listado de arcos aptos para la planificación e implantación de las posibles infraestructuras de carriles para la bicicleta. A partir de este resultado, se realiza una asignación y análisis de la seguridad asociada a cada uno de los arcos que pueden disponer de la red ciclista.

Este bloque está formado por dos secciones. La primera trata sobre la seguridad asociada a las diferentes características que forman cada uno de los arcos de la red. Y la segunda parte, está basada en las diferentes tipologías de carriles bici existentes y la percepción de seguridad asociada a cada tipo. Con esto, se pretende obtener una red vial capaz de cumplir los cinco requisitos básicos de una infraestructura “cicloamistosa”:

¹²entendiendo por óptimo todos y cada uno de ellos que cumplan las restricciones de espacio físico y tipología de vías

ser directa, atractiva, coherente, cómoda y segura.

1. Seguridad asociada a las Características de la Red Vial. En este primer apartado, se describe la influencia descritas por las características de la red vial con respecto a la seguridad asociada a cada una de las características. La seguridad asociada viene dada para:

- **IMD:** este parámetro es el resultado de la unión de los datos de aforo, intensidades media de vehículos y una toma de datos sobre el aforo peatonal. El índice final de IMD tiene en consideración datos de la tipología de vía y las características físicas propias del arco.

IMD	Seguridad
1	5
2	4
3	3
4	1
5	0

Tabla 8.3: Seguridad asociada al IMD de la red vial.

- **Velocidad:** El índice de seguridad asignado a la velocidad de cada uno de los arcos de la base de datos ($SaVel_{i,j}$) es el siguiente:

Velocidad	Seguridad
0 - 29.9 <i>km/h</i>	5
30 - 39.9 <i>km/h</i>	4
40 - 49.9 <i>km/h</i>	3
50 - 59.9 <i>km/h</i>	2
Más de 60 <i>km/h</i>	1

Tabla 8.4: Seguridad asociada a la Velocidad de la red vial.

- Capacidad: tras el análisis para de la *Movilidad y Preferencias de Uso sobre la bicicleta de Málaga*, se puede afirmar que existe una mayor seguridad para los diferentes usuarios (reales y potenciales) en los arcos con capacidades menores. La valoración de la seguridad en relación con la capacidad de los arcos ($SaCap_{i,j}$) es:

Capacidad	Seguridad
500	5
700	4
800	3
1000	2
1100	1

Tabla 8.5: Seguridad asociada a la Capacidad de la red vial.

- Tipo de Vía: el tipo de vía o arco tiene intrínseca parte de información sobre las características de la movilidad. Y, en consecuencia, sobre la seguridad. Dicha asignación de seguridad, $SaVia_{i,j}$, para cada tipología de arco es:

Tipo de Vía	Seguridad
Semipeatonal	2
Urbana	1
Arterial	0.5
Nacional	0
Autovía / Autopista	0

Tabla 8.6: Seguridad asociada al Tipo de Vía de la red vial.

En base a la realización del modelo total de la red vial del municipio de Málaga, se ha percibido la existencia de diferentes casos de aplicación del coeficiente de seguridad en el entramado urbano modelado. Y los diferentes efectos que reportará a la hora de planificar y diseñar una infraestructura para la bicicleta que cumpla con todos los requisitos para el mayor número de usuarios del entramado urbano malagueño.

De este modo, se presenta el análisis aplicado en caso particular de la ciudad de Málaga. Los resultados que se adjuntan, resumen las conclusiones obtenidas sobre la relación existente entre el número de carriles disponible en los arcos y la seguridad percibida por los usuarios. Tal y como describen Sener¹¹² o Hyodo⁶⁷. Los valores de seguridad asignados al número de carriles en los arcos ($SaCarr_{i,j}$) que conforman el modelo de red del municipio de Málaga son:

Número de carriles	Sentidos	Seguridad
1 carril	único sentido	0
2 carriles	único sentido	1
	doble sentido	0.2
3 carriles	único sentido	2
	doble sentido	0.5
4 carriles	único sentido	3
	doble sentido (3+1)	1.2
	doble sentido (2+2)	0.8

Tabla 8.7: Seguridad asociada al número de carriles.

Para la comprobación posterior de seguridad mínima que debe cumplir cada uno de los arcos para ser admitido como óptimos, el algoritmo realiza una agrupación de las diferentes características de las infraestructuras que afectan a la seguridad. Se obtiene el valor $Sv_{i,j}$ que representa el sumatorio de la seguridad de cada una de las características de la infraestructura que toman el conjunto de arcos. El valor $Sv_{i,j}$ se representa de la siguiente manera:

$$Sv_{i,j} = \sum (SaIMD_{i,j} + SaVel_{i,j} + SaCap_{i,j} + SaVia_{i,j} + SaCarr_{i,j}) \quad (8.1)$$

2. Seguridad asociada a la Tipología de “Carril Bici”. En capítulos anteriores de esta tesis, ya se definió las diferentes clases o tipologías de infraestructura para la bicicleta. dicho conjunto se tendrá en consideración a la hora de planificar y diseñar una infraestructura óptima y adecuada para los diferentes usuarios dentro del caso aplicado

al municipio de Málaga. Se recogen los coeficientes de seguridad asignados para cada tipología de infraestructura destinada al uso de la bicicleta, definida como $Scb_{i,j}$. Se consideran 5 tipologías diferentes que se corresponden con:

Tipología de Carril Bici	Seguridad
Acera Bici	1
Acera Bici Segregada	2
Calzada Bici	3
Calzada Bici Protegida	4
Ciclovía	5

Tabla 8.8: Seguridad asociada a la Tipología de Carril Bici.

Para esta característica de tipología de carril bici, existe la posibilidad de implantar diferentes tipologías debido a la disponibilidad del espacio físico existente. En este sentido, se han propuesto todas y cada unas de las posibilidades de implantación que pueden ofrecer los diferentes arcos. Obteniéndose el listado de las diferentes tipologías de “carriles bici” a implantar en cada uno de los $a_{i,j}$, en función de su coeficiente de seguridad.

3. Seguridad total del arco. Para optimizar la seguridad de los tramos, se ha configurado el algoritmo para obtener el sumatorio total de la seguridad disponible en cada uno de los arcos que conforman la red vial. El resultado es la Seguridad Total del arco ($St_{i,j}$), compuesto por la seguridad disponible en un arco, está definido como:

$$St_{i,j} = Sv_{i,j} + Scb_{i,j} \quad (8.2)$$

El resultado de $St_{i,j}$ facilita información de la seguridad total de cada uno de los arcos. A partir, de las diferentes infraestructuras de “carriles bici” que se pueden implantar para dicho arco. En este sentido, cuando un arco disponga de más de una alternativa de implantación para la infraestructura de “carriles bici”, se obtiene la optimización de la seguridad total máxima en un arco.

$$\text{máx } St_{i,j} = Sv_{i,j} + Scb_{i,j} \geq Sv_{i,j-1} + Scb_{i,j-1} \quad (8.3)$$

La comprobación planteada facilita garantizar el recorrido más seguro por cada uno de los arcos $(a_{i,j})$. Esta codificación está condicionada directamente con la posibilidad de implantación de los diferente tipo de “carril bici”. Se obtiene como resultado la opción más segura en el arco. De este modo, se produce una disminución del riesgo de accidentes por la planificación segura. Y, sobre todo, obteniéndose un aumento de la percepción de seguridad de los posibles usuarios de la bicicleta.

Perfiles de Seguridad

En este apartado, se desglosa los perfiles de seguridad en dos secciones claramente diferenciados. La primera de ellas, se basa en perfiles de usuario genéricos creados, a partir de percepciones de seguridad asignada para las diferentes tipologías de usuarios. Como segunda sección, se presta atención los datos zonales. Dónde las características socioeconómicas de la zona de transporte marcará las variables que condicionan la percepción de seguridad global por zonas a la hora de diseñar y planificar la infraestructura ciclista.

El algoritmo está diseñado de manera que se pueda elegir cualquiera de las dos soluciones indistintamente. Se obtienen dos diseños de infraestructuras destinadas al uso de la bicicleta muy diferenciadas con respecto a los perfiles de seguridad. Se demuestran, por tanto, las dos posibilidades de diseño.

1. Perfiles de usuarios. Como parte central de esta sección, se destaca la creación de diferentes perfiles tipo de usuarios. De una manera directa y rápida, servirán para realizar las comprobaciones de seguridad del modelo de red de la ciudad de Málaga. El diseño del algoritmo, con respecto a los perfiles genéricos de usuarios, han sido comprendidos para garantizar una planificación de la infraestructura para las bicicletas capaz de cumplir los requisitos mínimos de seguridad, comodidad y atractivo. De manera que se asegure una respuesta positiva por parte de los usuarios de la vía pública, plasmándose en un mayor número de viajes realizados con este modo de transporte.

La metodología empleada tiene una manera de operar definida basada en la comprobación para cada uno de los arcos $a_{i,j}$ aptos para formar parte de la red ciclista de Málaga. La comprobación de seguridad mínima que debe cumplir un arco, está basada en el sumatorio de seguridad total del arco, explicado en la sección anterior de este capítulo. Se define un arco, $a_{i,j}$, como seguro para el perfil de usuario, cuando la seguridad total del arco sea mayor a la mínima establecida por el perfil de usuario genérico (Pu). Se aceptará un arco, con la infraestructura correspondiente, como seguro cuando se cumpla:

$$St_{i,j} \geq Su \quad (8.4)$$

Siendo la seguridad total del arco como $St_{i,j} = Sv_{i,j} + Scb_{i,j}$ y, estando el factor de seguridad del usuario Su condicionada por la tipología de perfil del usuario Pu .

Se exponen, a continuación, los diferentes perfiles creados y la aplicación para cada uno de los perfiles presentados en el algoritmo.

Perfil de Usuario	Descripción	Seguridad Mínima
Tipo 1	Experto	5
Tipo 2	Usual	8
Tipo 3	Ocasional	10
Tipo 4	Inexperto	15

Tabla 8.9: Seguridad asociada al Perfil del usuario genérico.

- Diseño de red para usuarios expertos:** este perfil tiene como objetivo la planificación y diseño para usuarios habituales de la bicicleta. En los estudios elaborados por Harkey⁵⁶ se concluye como la percepción de la seguridad está diferenciada para aquellos usuarios cuyo modo de transporte diario es la bicicleta con una disposición del confort mayor. Por este motivo, se define la tipología Experto con un coeficiente de seguridad mínima de 5.
- Diseño de red para usuarios usuales:** se considera como usuales aquellos usuarios con un uso moderado de la bicicleta. Como por ejemplo, los usuarios con fines

deportivos o de ocio. Existe una habilidad alta en el manejo a la hora de montar en bicicleta. Lo que produce una mayor sensación a la hora de circular que los usuarios menos experimentados. Debido a esto, para el coeficiente de seguridad para este usuario específico se toma el valor de 8. Se corresponde con un valor más seguro en comparación que los usuarios expertos.

- **Diseño de red para usuarios ocasionales:** se considera a este perfil como el principal a la hora de planificar y diseñar la nueva red de infraestructura ciclista de Málaga. Esta tipología recoge a todos los usuarios que tienen conocimientos para montar en bicicleta pero no tienen experiencia, o muy poca, a la hora de circular en la vía pública. La percepción de seguridad percibida es considerablemente menor a las dos anteriores. Por este motivo, se debe optimizar una red ciclista más segura para los diferentes usuarios. El coeficiente de seguridad establecido para este perfil de usuario se fija en 10.
- **Diseño de red para usuarios inexpertos:** en los casos que exista una mayoría de usuarios con poco manejo o no sepan montar en bicicleta, el coeficiente de seguridad deberá ser mayor. Se necesita diseñar unas infraestructuras capaces de obtener la mayor sensación de seguridad vial de los usuarios de la bici. Se constituye para este perfil un valor de seguridad de 15.

2. Perfiles zonales. Existe una relación de semejanza con respecto a la sección de perfiles únicos a la hora de comprobar la seguridad mínima que debe cumplir un arco $a_{i,j}$. En este sentido, se han definido diferentes coeficientes de peso sobre la seguridad para cada una de las zonas de transporte en las que se encuentra distribuida la ciudad de Málaga.

La primera comprobación a realizar por el algoritmo, está relacionada con las zonas de transporte ($Z_{i,j}$) a la que pertenece cada uno de los arcos $a_{i,j}$ considerados para formar la red ciclista. Cada uno de estos arcos, estará definido por características propias zonales. Para el desarrollo de este estudio se han tenido en cuenta como factores de peso que afecten a la seguridad zonal, las variables de: sexo, edad, número de hogares, tamaño medio del hogar, número de vehículos, número de hogares con posesión de vehículos, estudiantes, trabajadores, equipamientos y número de viajes.

Cada una de las variables afecta positiva o negativamente a la seguridad de perfil zonal básica establecida por el algoritmo. Se describen todas y cada una de las variables aplicadas en los perfiles zonales de seguridad que se ha desarrollado para el caso particular del diseño y planificación de la red ciclista para el municipio de Málaga.

- Sexo: para la variable sexo, el algoritmo traza unos coeficientes de peso que afectará, a favor o en contra, a la seguridad del arco $a_{i,j}$ para la zona $Z_{i,j}$ por la que transita. Para el caso particular de la ciudad de Málaga, se ha configurado las variables con el siguiente diseño:

Variable Sexo	Descripción	Valor de Seguridad
β_{hombre}	Mayor Población de hombres	-0.075
β_{mujer}	Mayor Población de mujeres	+0.1

Tabla 8.10: Seguridad zonal para la variable sexo.

La estructura del algoritmo busca el número de usuarios que predomina por sexo, asignando el valor correspondiente para cada coeficiente de β_{hombre} y β_{mujer} . Se aumentará o disminuirá la seguridad mínima que debe de tener un arco ($a_{i,j}$) en función de la influencia que definida en la planificación. A partir de los resultados de las encuesta de movilidad y preferencias del usuario para el municipio de Málaga.

- Edad: La importancia de la variable edad para la seguridad asociada a cada $a_{i,j}$ se ha centrado en el rango de edad predominante en cada una de las zonas ($Z_{i,j}$) en las que se encuentra dividida el municipio de Málaga. De este modo, se favorece un diseño óptimo para el mayor número de usuarios habituales y potenciales de la bicicleta en cada una de las diferentes infraestructuras futuras para la la bicicleta de la ciudad.

$$Z_{edad_i} \geq Z_{edad_{n_i}} = \beta_{edad_i} \quad \forall a_{i,j} \in Z_i \quad (8.5)$$

Para la variable edad, se han distribuido los datos demográficos en 4 tipologías. Cada una con su correspondiente valor en torno a la seguridad asignada para

cada grupo (β_{edad}). La formulación planteada en el algoritmo asigna el peso de seguridad correspondiente al máximo valor de edad en cada una de las zonas Z_i . El factor de seguridad resultante estará proyectado para maximizar el mayor número de usuarios de la bicicleta, mediante el correcto diseño y planificación a la hora de ejecutar una infraestructura para la bicicleta acorde a las necesidades de la población.

Variable Edad	Descripción	Valor de Seguridad
β_{edad1}	Menores de 16 años	+0.01
β_{edad2}	Población entre 16 y 40 años	+0.075
β_{edad3}	Población entre 40 y 65 años	+0.02
β_{edad4}	Mayores de 65 años	+0

Tabla 8.11: Seguridad zonal para la variable edad.

- Número de hogares: en la distribución municipal es importante tener en cuenta las zonas con una mayor densidad demográfica y, por consiguiente, con un mayor número de hogares²¹. Por lo que se ha considerado la importancia del número de hogares a la hora de planificar y diseñar las posibles infraestructuras de la bicicleta. De este modo, para cada una de las Z_i , se ha asignado un valor diferente a la seguridad mínima que deben de poseer cada uno de los posibles $a_{i,j}$ con respecto al número de hogares de los que dispone cada zona en al que se distribuye el municipio de Málaga. Los coeficientes asignados son:

Variable Número hogares	Descripción	Valor de Seguridad
β_{hogar1}	Menos de 4.000 hogares	+0.01
β_{hogar2}	Entre 4.000 y 8.000 hogares	+0.02
β_{hogar3}	Más de 8.000 hogares	+0.01

Tabla 8.12: Seguridad zonal para la variable número de hogares.

Tras la división en el número de hogares en tres grupos, se llega a la conclusión que en zonas Z_i con una población media es necesario aumentar la seguridad. Con la finalidad de fomentar el uso de la bicicleta a partir de una infraestructura más segura para el mayor número de usuarios posible. Este diseño matemático

está basado en el desglose con 3 categorías para el número de hogares, tal y como se verá en el siguiente capítulo. Cada uno de los valores podrán ser editados de una manera rápida y cómoda que facilite una mejor práctica en el diseño urbano de la movilidad.

- **Tamaño medio del hogar:** esta variable tiene una fuerte influencia en la elaboración de los modelos de transporte a la hora de realizar la generación y distribución de la totalidad de viajes en las ciudades²⁰. Debido a la influencia directa existente entre el tamaño medio del hogar y el número de viajes generados por domicilio, se ha incluido dicha variable en la programación del algoritmo. Se realiza por tanto una comprobación de las diferentes Z_i para asignar el factor de seguridad necesario a los arcos que forman parte de la red vial del municipio de Málaga.

Los valores aplicados, a las variables del tamaño medio del hogar, en el caso de estudio se corresponden con:

Variable TMH	Descripción	Valor de Seguridad
β_{TMH1}	Menos de 2,5 pers./hogar	+0.01
β_{TMH2}	Entre 2,5 y 3 pers./hogar	+0.02
β_{TMH3}	Más de 3 pers./hogar	+0.03

Tabla 8.13: Seguridad zonal para la variable tamaño medio hogar.

- **Número de vehículos:** el número de vehículos medios por hogar que existen en cada una de las diferentes zonas en las que está distribuido el municipio de Málaga, condiciona las pautas de movilidad de los usuarios. A continuación, se expone el valor de los coeficientes de seguridad asignados a cada unas de las zonas Z_i con respecto al número de vehículos disponibles en ellas.

La parte correspondiente al número de vehículos medio por hogar para cada una de las zonas, se encuentra distribuida en cuatro intervalos diferentes. Dichos intervalos están planificados para obtener el resultado más representativo para la afinidad existente entre en número de vehículos y el valor de la seguridad mínima que debe soportar un arco.

Variable N ^o Veh. / Hogar	Descripción	Valor de Seguridad
β_{nvm1}	Menos de 0,85 veh./hogar	+0.02
β_{nvm2}	Entre 0,85 y 1 veh./hogar	+0.04
β_{nvm3}	Entre 1 y 1,25 veh./hogar	+0.05
β_{nvm4}	Más de 1,25 veh./hogar	+0.06

Tabla 8.14: Seguridad zonal para la variable número vehículo medio por hogar.

- Número de hogares con disponibilidad de vehículos: se incluye esta variable con el objetivo de analizar las zonas (Z_i) cuya disponibilidad de vehículos sea menor. La editabilidad en la definición de los pesos, por parte del algoritmo, permite ofrecer diferentes alternativas relacionadas con la importancia otorgada a la disponibilidad del vehículo. Se tiene como objetivo aumentar la facilidad en el cambio de elección modal. Por otro lado contrario, facilita una infraestructura más segura en las zonas que exista un alto número de hogares con facilidad de acceso o posesión de vehículos.

Para el caso de estudio, se ha establecido 4 intervalos para el análisis de la seguridad asociada a la variable del número de de hogares con vehículos ($novh$). Los pesos definidos para los intervalos de dicha variable con respecto a su Z_i correspondiente, serían:

Variable N ^o Hog. con Veh.	Descripción	Valor de Seguridad
β_{novh1}	Menos de 500 hogares	+0.099
β_{novh2}	Entre 500 y 1.500 hogares	+0.099
β_{novh3}	Entre 1.500 y 3.000 hogares	+0.099
β_{novh4}	Más de 3.000 hogares	+0.099

Tabla 8.15: Seguridad zonal para la variable número hogares con vehículos.

- Estudiantes: se asocia a la relación que poseen los estudiantes con el nivel de ingresos y la edad, de un modo generalizado. Tras los estudios realizados por Pinjari⁹⁹, dónde se percibe la clara evidencia que poseen los estudiantes a la hora de cambiar el modo de transporte, en contraposición de los usuarios con una edad

avanzada o trabajadores.

Se justifica, de este modo, la importancia de incluir las variables de estudiantes en el diseño del algoritmo. Con el objetivo de planificar una red ciclista con una seguridad acorde a las diferentes tipologías de usuarios existente en la ciudad de Málaga. La formulación para la variable de estudiantes se corresponde con:

Variable Estudiantes	Descripción	Valor de Seguridad
β_{estu1}	Menos de 75 estudiantes	+0
β_{estu2}	Entre 75 y 150 estudiantes	+0.01
β_{estu3}	Más de 150 estudiantes	+0.05

Tabla 8.16: Seguridad zonal para la variable estudiantes.

- Trabajadores: el interés de incluir la variables de usuarios ocupados o trabajadores es semejante al ocurrido en la anterior variable de estudiantes. La facilidad o resistencia que ofrecen este tipos de usuarios a posibles cambios en su comportamiento y pautas de movilidad, referentes a la elección del modo de transporte. La importancia dada al peso de la seguridad asociado al número de trabajadores (ocupados) para cada zona está representada en la siguiente formulación:

Variable Trabajadores	Descripción	Valor de Seguridad
β_{ocu1}	Menos de 5.000 trabajadores	+0
β_{ocu2}	Entre 5.000 y 10.000 trabajadores	+0.01
β_{ocu3}	Más de 10.000 trabajadores	+0.05

Tabla 8.17: Seguridad zonal para la variable trabajadores.

El valor de seguridad mínimo establecido para cada uno de los valores según el intervalo correspondiente se representa como β_{ocu} . Tendrá un valor diferente para cada uno de los casos de estudio en particular. Este valor tiene como objetivo aumentar la percepción de seguridad de los ocupados (trabajadores) para el caso particular de la planificación de la red ciclista del municipio de Málaga. Con la finalidad de añadir nuevos usuarios para el modo de transporte bicicleta.

- Equipamientos: esta variable está incluida en la programación del algoritmo debido a la importancia que gozan los diferentes servicios y equipamientos en relación a la atracción de viajes, en cada una de las Z_i que forman el municipio de Málaga.

Entre estos servicios se han tenido en cuenta los diferentes equipamientos educativos (colegios, institutos, universidades, etc.), el número de tiendas y centros comerciales existentes por zona y el número de oficinas e industria que representan a un global de las empresas. Además, también se han considerado los equipamientos sanitarios y sociales (como, por ejemplo, centros de salud, centros de la tercera edad, etc.), los equipamientos deportivos disponibles. El coeficiente de seguridad mínima, para el caso de estudio, asignado al número total de equipamientos, β_{equi} , se establece en:

Variable Equipamientos	Descripción	Valor de Seguridad
β_{equi1}	Menos de 1.000 equipamientos	+0.005
β_{equi2}	Entre 1.000 y 2.000 equipamientos	+0.007
β_{equi3}	Más de 2.000 equipamientos	+0.1

Tabla 8.18: Seguridad zonal para la variable equipamientos.

- Número de viajes: para obtener el coeficiente de seguridad mínimo de un arco relacionado con el número de viajes (β_{viajes}) se ha diseñado el algoritmo para representar el número de equipamientos de los que dispone cada Z_i , entendidos como focos atractores de viajes obligados del municipio de Málaga.

Variable N ^o Viajes	Descripción	Valor de Seguridad
$\beta_{viajes1}$	Menos de 250 viajes	+0.05
$\beta_{viajes2}$	Entre 250 y 500 viajes	+0.07
$\beta_{viajes3}$	Más de 500 viajes	+0.1

Tabla 8.19: Seguridad zonal para la variable Número viajes.

El estudio de la variable de viajes se centra en la revisión de las zonas más importantes a analizar en cuanto al número de viajes. Siendo de interés en el

análisis de las M_{OD} y en la seguridad mínima β_{viajes} que debe tener cada uno de los arcos para que sea dado como óptimo en la posible planificación y diseño de la infraestructura destinada al uso de la bicicleta para trazar la red que una cada una de las Z_i .

1. **Agrupaciones.** Una manera de optimizar la influencia de todas las variables que intervienen en el peso de la seguridad zonal consiste en la agrupación de las variables por temáticas. Todas las variables que se han incluido en este apartado se clasifican en una de estas categorías:

- Población: se define la variable de agrupación de la población como $\alpha_{poblacion}$. En este grupo se han introducido las variables sobre edad, sexo, el número de estudiantes y el número de trabajadores. Cada una de éstas variables condiciona el comportamiento de movilidad de la población. Cómo se ha señalado con anterioridad, es patente la influencia de estas variables en las pautas viajes y percepciones de seguridad.
- Vivienda: el valor de la agrupación para viviendas, $\alpha_{vivienda}$, está constituido por la seguridad mínima asociada a las variables del número de hogares por zona, el tamaño de hogar medio, el número de vehículos totales disponible por zona y el número de hogares que disponen de vehículos.
- Usos del suelo. La agrupación de los diferentes usos de suelo se representa por α_{usuelo} . Caracterizada por el número de los diferentes equipamientos disponibles en cada una de las zonas y por el número de viajes que produzcan un flujo de desplazamientos habituales para cada uno de los usuarios al cabo de un día en el municipio de Málaga.

En relación a la agrupación de las variables desarrollas por el algoritmo, esta metodología posibilita una manera cómoda de atribuir a cada conjunto el peso asignado correspondiente. Se establece un restricción para el conjunto de agrupaciones. Con el objetivo controlar la importancia de los pesos entre los tres conjuntos. Se define como:

$$\alpha = \sum (\alpha_{poblacion} + \alpha_{vivienda} + \alpha_{usuelo}) \quad \forall \alpha = 3 \quad (8.6)$$

La clasificación de las diferentes variables que condicionan los perfiles zonales del municipio de Málaga en estas 3 categorías, garantizan una mejor planificación y diseño de las futuras infraestructuras de la bicicleta. En este sentido, se exponen dos posibilidades diferentes relacionadas con los pesos específicos de importancia de cada una de estas categorías α (*población, vivienda y usos del suelo*).

Para garantizar una mejor planificación y diseño de las futuras infraestructuras para la bicicleta, se ha clasificado las diferentes variables en 3 categorías. Cada una de estas categorías posee un peso específico de importancia relacionado con el factor de seguridad mínimo que deben de tener cada uno de los arcos ($a_{i,j}$). Cada uno de los valores o pesos de las 3 categorías condicionan la mayor o menor importancia que se le otorgan a cada conjunto de variables dependiendo de las características propias del caso de estudio en cuestión o de las preferencias asignadas por los técnicos responsables.

Se concluye con el apartado de las agrupaciones de las tres variables descritas, con el cálculo de la seguridad máxima por zonificación. Una manera de obtener el mayor número de usuarios, tal y como se ha apreciado tras el análisis de la documentación científica consultada, consiste en obtener la mayor sensación de seguridad para los diferentes usuarios de la vía pública. De este modo, cada uno de los arcos $a_{i,j}$ pertenecientes a las diferentes Z_i llevan consigo unas seguridades mínimas para cada una de las variables agrupadas (*población, vivienda y usos del suelo*). El resultado impuesto por el algoritmo recae en garantizar la máxima seguridad para el total de los usuarios. Por esta condición, el $a_{i,j}$ elegido corresponderá con la tipología de infraestructura de carril bici más segura para la Z_i pertinente, a partir de las diferentes percepciones de seguridad de la población de la zona de estudio.

Cálculo de Rutas Mínimas

Se procede a explicar el cálculo de las rutas mínimas con las diferentes tipologías de infraestructura para la bicicleta entre los orígenes y destinos destacado en el caso aplicado del municipio de Málaga. La metodología se basa en la búsqueda de todos los recorridos caracterizados por el total de elementos que la componen la red.

La relación de los diferentes elementos del modelo de red, están representados con un grafo $G = (N;A)$. Representado por N , como el conjunto de nodos y A como el conjunto de arcos conectando pares de nodos. En el caso particular del modelo de red de la ciudad de Málaga, se ha construido el digrafo ¹³ con todas las características, a nivel de arco, que forman parte de las restricciones a tener en cuenta en el cálculo del camino más corto entre pares de nodos principales.

En este sentido, se ha desarrollado la posibilidad del cálculo para el problema de la ruta más corta entre los centroides de la zonificación correspondiente para la ciudad de Málaga. Esta solución está basada en el Algoritmo de Dijkstra³². Con el objetivo de encontrar el camino más corto o distancia entre dos vértices dados x y y en la red vial. La aplicación de esta metodología se debe a la pretensión de resolver el problema del camino más corto para cada uno de los corredores planteados, con una descripción de la solución del recorrido.

La base de datos usada, con las dos posibilidades diseñadas, es el resultado obtenido con el análisis de las diferentes restricciones formuladas por el algoritmo en el modelo de optimización. Dicho proceso está planteado para, después del análisis de las restricciones, tener una simplificación del modelo de red vial de la ciudad de Málaga. Obteniéndose de este modo una red simplificada con los arcos, $a_{i,j}$, capaces de ser considerados para la futura infraestructura de “carriles bici” de la ciudad.

Aplicación del algoritmo de Dijkstra El empleo del Algoritmo de Dijkstra³² se ha llevado a la práctica con el objetivo de calcular rutas específicas para una red ciclista. A partir del conocimiento del origen y el destino de las rutas en cuestión.

Del totalidad de 32 zonas en las que se encuentra dividida la ciudad de Málaga, se han establecido 54 corredores principales que unen las diferentes zonas con el objetivo de planificar una red completa para la ciudad. La aplicación de esta metodología se

¹³Un grafo es etiquetado o ponderado cuando dispone de aristas con asignación de peso (p), siendo un número real positivo.

basa en el funcionamiento del algoritmo de Dijkstra, dónde se va a proceder a calcular la ruta mínima entre las zonas de transportes señaladas.

En un primer caso, se determinó el conectar la totalidad de los 32 centroides correspondientes a la zonificación realizada. Tras el análisis de las características socioeconómicas, unido a las particularidades del entramado urbano propios del municipio, se decidió limitar el número de conexiones. Con el objetivo de minimizar los tiempos operacionales de resolución del algoritmo propuesto y evitar incongruencias de conexiones zonales.

De este modo, se tomó como criterio inicial la unión de zonas contiguas. Garantizando la creación de corredores de corto recorrido pero siempre con proporcionando una continuidad de la red ciclista. Igualmente, se plantean corredores no limítrofes de especial interés debido a la conexión de zonas significativas o de elevada importancia para la conexión del municipio. Obteniéndose como resultado final los 54 corredores ejecutados.

Además se añade para un completo y mejor análisis de los resultados, un total de 108 corredores que suponen el recorrido de ida y vuelta de cada uno de los 54 corredores principales. De este modo, se minimizan la posibilidad de error en la optimización de la red calculada con la comprobación de los diferentes recorridos de todos los corredores.

Corredor	Zona Origen	Zona Destino
C 1	Centro	Malagueta
C 2	Centro	La Victoria
C 3	Centro	Capuchinos
C 4	Centro	Prolongación Alameda
C 5	Centro	Huelin/La Isla
C 6	Malagueta	La Victoria
C 7	Malagueta	Limonar
C 8	El Palo	Pedregalejo
C 9	La Victoria	Capuchinos
C 10	Capuchinos	Ciudad Jardín

Corredor	Zona Origen	Zona Destino
C 11	Capuchinos	La Palma
C 12	Capuchinos	Trinidad
C 13	Ciudad Jardín	La Palma
C 14	La Palma	Trinidad
C 15	La Palma	Suárez/Miraflores
C 16	Trinidad	Prolongación Alameda
C 17	Trinidad	Suárez/Miraflores
C 18	Trinidad	Nueva Málaga
C 19	Prolongación Alameda	Huelin/La Isla
C 20	Prolongación Alameda	Nueva Málaga
C 21	Prolongación Alameda	Carranque
C 22	Prolongación Alameda	La Unión/Santa Julia
C 23	Huelin/La Isla	La Unión/Santa Julia
C 24	Huelin/La Isla	San Rafael
C 25	Huelin/La Isla	Girón
C 26	Suárez/Miraflores	Nueva Málaga
C 27	Nueva Málaga	Carlos Haya
C 28	Nueva Málaga	Carranque
C 29	Carlos Haya	Puerto de la Torre
C 30	Carlos Haya	Carranque
C 31	Carlos Haya	Portada Alta
C 32	Teatinos	Puerto de la Torre
C 33	Teatinos	Portada Alta
C 34	Teatinos	El Viso/Los Prados
C 35	Teatinos	Tarajal
C 36	Puerto de la Torre	Portada Alta
C 37	Carranque	Portada Alta
C 38	Carranque	La Unión/Santa Julia
C 39	Portada Alta	La Unión/Santa Julia
C 40	Portada Alta	Santa Cristina
C 41	La Unión/Santa Julia	Santa Cristina
C 42	La Unión/Santa Julia	San Rafael

Corredor	Zona Origen	Zona Destino
C 43	La Unión/Santa Julia	La Luz
C 44	Santa Cristina	San Rafael
C 45	Santa Cristina	El Viso / Los Prados
C 46	San Rafael	El Viso / Los Prados
C 47	San Rafael	La Luz
C 48	El Viso / Los Prados	San Rafael
C 49	La Luz	Girón
C 50	La Luz	Mainake/Térmica
C 51	La Luz	Aeropuerto
C 52	Girón	Mainake/Térmica
C 53	San Julian	Churriana
C 54	Limonar	Pedregalejo

Tabla 8.20: Red Caso Práctico 1.

Tras la realización de los diferentes pasos llevados a cabo por el algoritmo, en cuanto a las diferentes restricciones y condicionantes que deben pasar cada uno de los $a_{i,j}$ que conforman la red vial del municipio de Málaga, se aplica la formulación siguiente para las conexiones descritas en las tablas de conexiones de los corredores principales.

$$\min Z = \sum_{o,d \in [1, \dots, N]} d_{o,d} \quad (8.7)$$

Se obtienen de este modo las distancias mínimas entre cada uno de los corredores planificados. Estos resultados aclaran el recorrido de la red ciclista óptima para la ciudad. Realizado a partir de la base de datos correspondientes con los perfiles de usuario genérico o por zonificación. En la solución propuesta, se define la tipología de carril bici que se debe implantar en cada uno de los arcos, $a_{i,j}$, que conforman el recorrido descrito para cada corredor $d_{o,d}$ de las Z_i .

8.4. Validación del modelo de optimización

En este apartado se presentan los diferentes casos de estudios y las diferentes alternativas de la resolución a optimizar. Para un mejor análisis de la aplicación del algoritmo llevado a cabo durante el desarrollo de la presente tesis doctoral, se van a presentar diferentes casos condicionados por cada una de las variables tenidas en cuenta en la calibración del modelo.

En la resolución de los diferentes casos presentados, se ha utilizado un ordenador Pentium(R) Dual-Core con un procesador de 2.3GHz y una memoria de Ram de 4.00GB. La ejecución del software, elaborado en esta Tesis Doctoral, se ha implementado en Java. Con una lectura directa para la base de datos realizada en archivos de lectura tipo *.txt*. El proceso cometido por Java proporciona una complementación perfecta de archivos con Matlab R2012a para la aplicación del algoritmo matemático. El tiempo medio de ejecución en cada uno de los casos prácticos realizados ha sido de 1 minuto y 42 segundos, para realizar el procedimiento de cálculo, diseño y aplicación.

Se procede a presentar los diferentes casos prácticos analizados para la validación del modelo presentado. Cada uno de los ejemplos presentados han tenido diferente configuración de las variables de estudio relacionado con las características viales y de seguridad a considerar. La configuración de dichas variables es la parte editable para cada uno de los técnicos, ingenieros o responsables para la planificación y diseño de las infraestructuras de carriles para bicicleta.

8.4.1. Aplicación caso práctico 1

El caso práctico 1, se basa en la aplicación más sencilla del algoritmo a la hora de planificar y diseñar la red urbana para el caso particular del municipio de Málaga. Del total de restricciones presentadas con anterioridad, se destaca la posibilidad de implantar la infraestructura dedicada al uso de la bicicleta. Únicamente estará restringida por la disponibilidad de espacio físico en cada uno de los arcos que componen el entramado urbano de la red modelizada. Además, se incluye la restricción basada en la seguridad del usuario (Su_{ij})

En este sentido, se han considerado como medidas mínimas para la implantación de las diferentes tipologías de carriles para bicicleta las siguientes:

Tipología	Anchura mínima
Acera bici	4.5 metros
Acera bici protegida	5 metros
Calzada bici	3.5 metros
Calzada bici segregada	3.5 metros
Ciclovía	3.5 metros
Carril bici por Aparcamiento	2.5 / 5 metros

Tabla 8.21: Anchura para implantacion de CB.

Para permitir con mayor facilidad la implantación de los diferentes tipos de carriles para bicicleta, se exponen las restricciones relacionadas con las características asociadas a la tipología de calzada.

- 1 carril: $IMD_{ij} \leq 2$ y $V_{ij} \leq 30$
- 2 carriles:
 - 1 sentido: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 50$
 - 2 sentidos: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 50$
- 3 carriles:
 - 1 sentido: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 40$
 - 2 sentidos: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 40$
- 4 carriles:
 - 1 sentido: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 40$
 - 2 sentidos: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 40$

Los coeficientes de seguridad asociado a las características de la red vial y a la tipología de “carril bici” son los presentados en el capítulo 6 (Modelo de optimización propuesto). Siendo el umbral de seguridad total del arco como: $Su_{i,j} = 1$, se condiciona de

este modo un perfil del usuario (Pu) mínimo que condiciona una percepción de seguridad para cada arco mínima. Lo que implica la no influencia de la seguridad para este ejemplo.

Tras ejecutar el software y aplicar las restricciones planteadas, se obtiene el resultado para el primer caso práctico. Una red de carriles para bicicletas basadas en la disponibilidad del espacio físico y en los condicionantes y restricciones para la infraestructura de calzada.

Corredor	Distancia	Recorrido (Path)
C 1	1035	[11, 7, 4, 3]
C 2	1781	[89, 149, 88, 664, 9, 4, 3]
C 3	3022.0	[128, 98, 99, 95, 146, 91, 89, 149, 88, 664, 9, 4, 3]
C 4	1758.0	[260, 261, 319, 314, 318, 316, 176, 8, 177, 6, 5, 3]
C 5	2123.	[407, 322, 317, 176, 8, 177, 6, 5, 3]
C 6	1458.	[89, 149, 88, 664, 9, 4, 7, 11]
C 7	1035.0	[13, 663, 662, 11]
C 8	3034.0	[23, 991, 20, 990, 22, 21, 989, 24, 56, 35, 38, 39, 791, 792, 28, 26, 869, 25]
C 9	1241.0	[128, 98, 99, 95, 146, 91, 89]
C 10	2275.0	[698, 180, 686, 199, 202, 684, 206, 896, 208, 210, 116, 681, 114, 121, 119, 124, 125, 128]
C 11	784.0	[725, 723, 310, 131, 130, 129, 128]
C 12	1580.0	[239, 234, 837, 237, 1088, 155, 154, 669, 142, 144, 143, 138, 137, 128]
C 13	2076.0	[725, 311, 226, 720, 225, 219, 1097, 887, 888, 218, 889, 722, 216, 697, 179, 698]
C 14	1075.0	[239, 234, 837, 237, 236, 312, 724, 725]
C 15	1512.0	[278, 840, 231, 232, 230, 235, 724, 725]
C 16	1563.0	[260, 262, 254, 253, 251, 250, 241, 809, 1088, 1071, 239]
C 17	1357.0	[278, 277, 244, 240, 234, 837, 237, 239]
C 18	1681.0	[268, 267, 247, 849, 246, 242, 240, 234, 837, 237, 239]
C 19	1973.0	[407, 322, 317, 726, 315, 264, 263, 262, 260]
C 20	1345.0	[268, 267, 247, 266, 265, 1000, 257, 256, 258, 260]
C 21	1091.0	[709, 297, 266, 265, 1000, 257, 256, 258, 260]
C 22	1720.0	[381, 387, 304, 300, 305, 306, 877, 308, 261, 259, 260]
C 23	2247.0	[381, 815, 380, 883, 632, 379, 633, 634, 334, 332, 325, 324, 407]
C 24	1595.0	[632, 379, 633, 634, 334, 332, 325, 324, 407]
C 25	1246.0	[338, 337, 328, 326, 407]
C 26	1425.0	[268, 1075, 273, 284, 286, 285, 278]
C 27	786.0	[288, 851, 850, 287, 272, 268]
C 28	795.0	[709, 297, 1076, 269, 272, 268]
C 29	2777.0	[593, 926, 592, 767, 553, 547, 403, 399, 296, 295, 288]

Corredor	Distancia	Recorrido (Path)
C 30	1341.0	[709, 271, 601, 397, 884, 289, 288]
C 31	873.0	[398, 397, 884, 289, 288]
C 32	2488.0	[593, 559, 551, 544, 556, 557, 538, 539, 769]
C 33	2143.0	[398, 535, 533, 532, 873, 531, 774, 1087, 563, 573, 769]
C 34	2947.0	[500, 900, 496, 497, 498, 491, 573, 769]
C 35	2533.0	[581, 580, 576, 574, 775, 575, 780, 573, 769]
C 36	2848.0	[398, 535, 1089, 549, 762, 552, 553, 767, 592, 926, 593]
C 37	1434.0	[398, 397, 601, 271, 709]
C 38	1273.0	[381, 387, 304, 300, 710, 297, 709]
C 39	1793.0	[381, 387, 603, 875, 602, 730, 601, 397, 398]
C 40	1053.0	[386, 385, 1002, 1001, 398]
C 41	959.0	[386, 384, 380, 815, 381]
C 42	436.0	[632, 921, 381]
C 43	2185.0	[335, 805, 333, 411, 922, 632, 921, 381]
C 44	711.0	[632, 883, 380, 384, 386]
C 45	3848.0	[500, 900, 496, 492, 482, 897, 478, 476, 378, 816, 386]
C 46	4559.0	[500, 900, 496, 492, 482, 897, 478, 476, 378, 816, 386, 384, 380, 883, 632]
C 47	1749.0	[335, 805, 333, 411, 922, 632]
C 48	1646.0	[505, 504, 502, 501, 500]
C 49	1292.0	[338, 337, 408, 336, 367, 335]
C 50	3543.0	[734, 349, 735, 342, 345, 784, 783, 879, 340, 880, 881, 336, 367, 335]
C 51	4536.0	[505, 507, 506, 430, 628, 753, 629, 429, 373, 370, 368, 369, 335]
C 52	2689.0	[734, 349, 735, 342, 737, 410, 339, 337, 338]
C 53	2258.0	[465, 464, 458, 457, 452, 451, 450, 447]
C 54	4169.0	[23, 991, 20, 17, 790, 16, 15, 14, 789, 87, 649, 12, 788, 660, 659, 661, 662, 663, 13]

Tabla 8.22: Corredores Caso Práctico 1.

Se puede observar en la tabla 8.22, el resultado de los 54 corredores presentados que formarán la red ciclista urbana del municipio de Málaga. Caracterizado por las distancias totales para cada uno de los corredores representadas por los metros longitudinales de los corredores. Como último resultado, se destaca el recorrido realizado por el corredor. Cada uno de los *path* o tramos que forman el recorrido están correspondidos por los nodos origen y destino de cada arco resultante dónde se implantará la red ciclista.

La mayor comprensión de la implantación de las diferentes tipologías para la

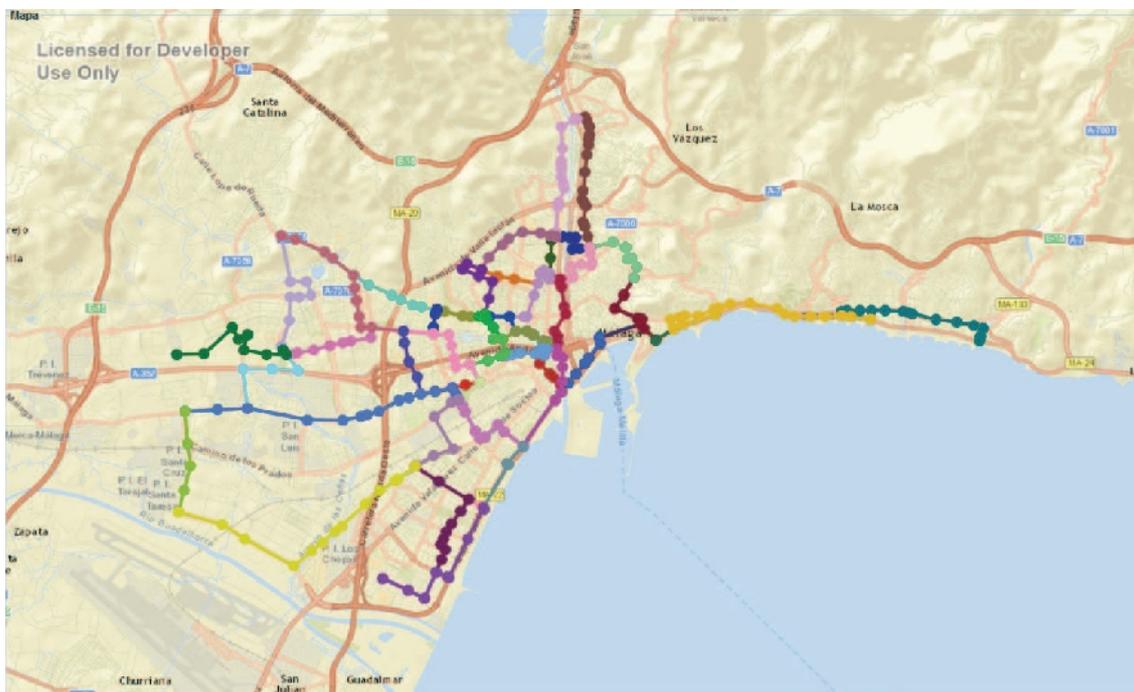


Figura 8.10: Ejemplo Red Caso Práctico 1

bicicletas se obtiene a partir del mapa generado por el software. Dicho mapa se basa en el sistema de información geográfica en el que está basada toda la base de datos y el modelo de red de la ciudad de Málaga. La visualización del mapa resultante (figura 8.10) facilita una mayor comprensión de la infraestructura diseñada. De este modo, se puede analizar con mayor garantía las diferentes tomas de decisiones con respecto a la planificación y diseño de la red ciclista final para el municipio.

Para el primer caso práctico presentado, se han tenido como resultado el listado de los corredores que forman la red ciclista caracterizado por la distancia total de cada uno de ellos y el recorrido por los diferentes arcos. Además, del mapa georeferenciado de los corredores.

Una manera de aumentar el atractivo de la metodología presentada, reside en el resultado final de cada uno de los corredores relacionado con las diferentes tipologías de carril bici. En este sentido, se ha facilitado de manera directa el resultado para cada uno de los arcos resultantes (a_{ij}) y el tipo de carril bici ejecutado en cada caso.

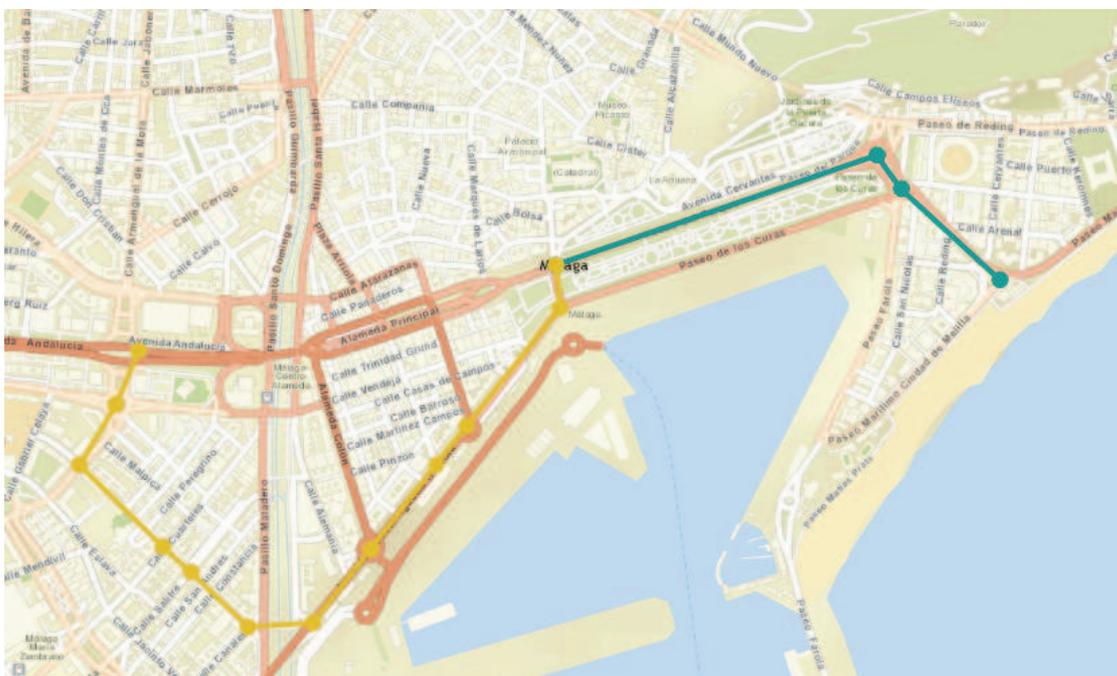


Figura 8.11: Ejemplo Corredores 1 y 4.

En el caso práctico presentado, se expone el resultado de las diferentes infraestructuras que formarán parte de la red ciclista urbana del municipio de Málaga. Además, para una mayor comprensión y análisis de los resultados, se exponen los ejemplos para los corredores 1 (Centro - Malagueta) y 4 (Centro - Prolongación alameda). La elección de dichos corredores corresponde con su especial localización, como es el centro de la ciudad. Tal y como se puede observar en la figura 8.11.

El resultado obtenido para los dos corredores, caracterizado por la tipología de carril bici a implantar, está representado en las figuras 8.12. Dónde el corredor 1, reflejado en la figura a, se caracteriza por 3 arcos con *calzada bici*. Por otro lado, el corredor 4 estaría formado por un carril bici cuyo lugar siempre será la calzada. Formado por *calzada bici* y *calzada bici protegida*, figura b.

De este modo, la metodología empleada para el caso de estudio en cuestión ha proporcionado una de las posibles soluciones para la implantación de las infraestructuras

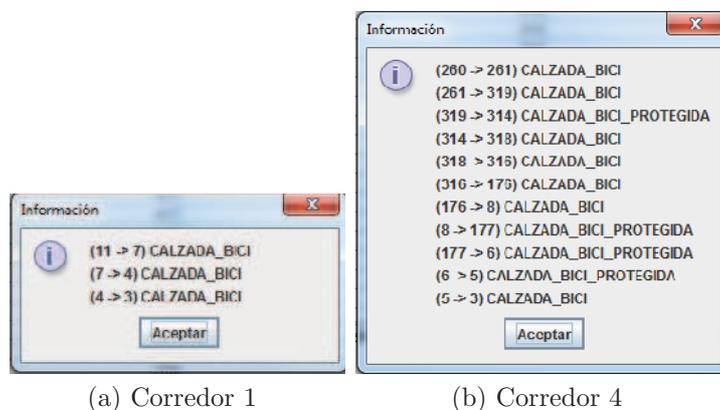


Figura 8.12: CB Corredores 1 y 4.

destinadas al uso de la bicicleta. Las diferentes bases de datos y el modelo de red forman el soporte para el cometido de la planificación y diseño de los carriles para bicicletas. La complejidad del algoritmo llevado a cabo en la elaboración de la presente investigación proporciona multitud de funcionalidad a partir del total e variables a estudiar.

8.4.2. Aplicación caso práctico 2

A continuación, se presenta un segundo caso de aplicación para el diseño de carriles para bicicletas aplicados al municipio de Málaga. En este caso, se han considerado diferentes restricciones para comprobar la versatilidad del algoritmo elaborado. De este modo se presentan las características que han condicionado el resultado del caso práctico 2.

En cuanto a las restricciones de espacio físico, se observa unas restricciones similares que en caso práctico presentado con anterioridad. También, ocurre lo mismo para las restricciones relacionadas con las características de la tipología de calzada.

Se consideran los coeficientes de seguridad asociados a las características de la red vial y a la tipología de “carril bici” idénticos al caso inicial. La diferente recae en la seguridad de usuario genérico. Para este caso, se ha considerado una $Su_{i,j} = 10$, correspondiente a un Pu ocasional. Esta configuración sirve, en primera medida para

Tipología	Anchura mínima
Acera bici	4.5 metros
Acera bici protegida	5 metros
Calzada bici	3.5 metros
Calzada bici segregada	3.5 metros
Ciclovía	3.5 metros
Carril bici por Aparcamiento	2.5 / 5 metros

Tabla 8.23: Anchura para implantacion de CB.

medir y valorar las diferentes restricciones asignadas de un modo inicial para los espacios físicos de la vía pública y las restricciones de calzada relacionada con el IMD_{ij} y V_{ij} . También, ha contribuido a calibrar los valores para los coeficientes de seguridad del total de variables y tipologías de “carriles bici”.

El resultado obtenido para la red de corredores para el municipio de Málaga con la configuración del caso práctico 2 se presenta en la siguiente tabla 8.24.

Corredor	Distancia	Recorrido (Path)
C 1	-1.0	[11, 3]
C 2	-1.0	[89, 3]
C 3	-1.0	[128, 3]
C 4	-1.0	[260, 3]
C 5	-1.0	[407, 3]
C 6	3165.0	[89, 145, 94, 91, 92, 90, 71, 1042, 1041, 1040, 12, 788, 660, 659, 661, 662, 11]
C 7	1035.0	[13, 663, 662, 11]
C 8	3034.0	[23, 991, 20, 990, 22, 21, 989, 24, 56, 35, 38, 39, 791, 792, 28, 26, 869, 25]
C 9	1241.0	[128, 98, 99, 95, 146, 91, 89]
C 10	2275.0	[698, 180, 686, 199, 202, 684, 206, 896, 208, 210, 116, 681, 114, 121, 119, 124, 125, 128]
C 11	-1.0	[725, 128]
C 12	1580.0	[239, 234, 837, 237, 1088, 155, 154, 669, 142, 144, 143, 138, 137, 128]
C 13	-1.0	[725, 698]
C 14	-1.0	[239, 725]
C 15	-1.0	[278, 725]
C 16	1771.0	[260, 259, 703, 257, 1000, 265, 707, 246, 242, 240, 234, 837, 237, 239]
C 17	1357.0	[278, 277, 244, 240, 234, 837, 237, 239]

Corredor	Distancia	Recorrido (Path)
C 18	1681.0	[268, 267, 247, 849, 246, 242, 240, 234, 837, 237, 239]
C 19	1973.0	[407, 322, 317, 726, 315, 264, 263, 262, 260]
C 20	1345.0	[268, 267, 247, 266, 265, 1000, 257, 256, 258, 260]
C 21	1091.0	[709, 297, 266, 265, 1000, 257, 256, 258, 260]
C 22	1733.0	[381, 813, 309, 303, 1079, 307, 319, 261, 259, 260]
C 23	2247.0	[381, 815, 380, 883, 632, 379, 633, 634, 334, 332, 325, 324, 407]
C 24	1595.0	[632, 379, 633, 634, 334, 332, 325, 324, 407]
C 25	1253.0	[338, 337, 408, 727, 326, 407]
C 26	1425.0	[268, 1075, 273, 284, 286, 285, 278]
C 27	-1.0	[288, 268]
C 28	795.0	[709, 297, 1076, 269, 272, 268]
C 29	-1.0	[593, 288]
C 30	-1.0	[709, 288]
C 31	-1.0	[398, 288]
C 32	2488.0	[593, 559, 551, 544, 556, 557, 538, 539, 769]
C 33	3966.0	[398, 1001, 1002, 385, 386, 816, 378, 476, 478, 477, 757, 480, 487, 488, 759, 491, 573, 769]
C 34	3162.0	[500, 900, 496, 898, 493, 759, 491, 573, 769]
C 35	2533.0	[581, 580, 576, 574, 775, 575, 780, 573, 769]
C 36	6454.0	[398, 1001, 1002, 385, 386, 816, 378, 476, 478, 477, 757, 480, 487, 488, 759, 491, 573, 769, 539, 538, 557, 556, 544, 551, 559, 593]
C 37	1434.0	[398, 397, 601, 271, 709]
C 38	1761.0	[381, 387, 603, 875, 602, 730, 601, 271, 709]
C 39	1793.0	[381, 387, 603, 875, 602, 730, 601, 397, 398]
C 40	1053.0	[386, 385, 1002, 1001, 398]
C 41	959.0	[386, 384, 380, 815, 381]
C 42	436.0	[632, 921, 381]
C 43	2185.0	[335, 805, 333, 411, 922, 632, 921, 381]
C 44	711.0	[632, 883, 380, 384, 386]
C 45	3858.0	[500, 900, 496, 898, 493, 481, 758, 478, 476, 378, 816, 386]
C 46	4569.0	[500, 900, 496, 898, 493, 481, 758, 478, 476, 378, 816, 386, 384, 380, 883, 632]
C 47	1749.0	[335, 805, 333, 411, 922, 632]
C 48	13721.0	[505, 504, 503, 502, 755, 951, 754, 627, 752, 625, 629, 429, 373, 370, 368, 369, 335, 805, 333, 411, 922, 632, 883, 380, 384, 386, 816, 378, 476, 478, 477, 757, 480, 487, 488, 759, 493, 492, 494, 899, 496, 900, 500]
C 49	1292.0	[338, 337, 408, 336, 367, 335]
C 50	3543.0	[734, 349, 735, 342, 345, 784, 783, 879, 340, 880, 881, 336, 367, 335]
C 51	6050.0	[505, 504, 503, 502, 755, 951, 754, 627, 752, 625, 629, 429, 373, 370, 368, 369, 335]

Corredor	Distancia	Recorrido (Path)
C 52	2710.0	[734, 349, 735, 342, 737, 346, 409, 408, 337, 338]
C 53	-1.0	[465, 447]
C 54	4169.0	[23, 991, 20, 17, 790, 16, 15, 14, 789, 87, 649, 12, 788, 660, 659, 661, 662, 663, 13]

Tabla 8.24: Corredores Caso Práctico 2.

El resultado obtenido en este caso práctico tiene algunas peculiaridades a destacar. Existen corredores con distancias iguales a -1.0. En el caso de los corredores cuyo resultado sea -1.0, es un indicativo para saber que no existe posibilidad de implantar una red ciclista con las características establecidas para ese corredor. Puede deberse a la falta de espacio para implantar algunas de las tipologías de “carril bici” en el total de arcos. También, cuando en el total de $a_{i,j}$ no cumplan con la seguridad óptima para que se implante algún tipo de carril, el resultado será -1.0.

De este modo, se puede observar como la configuración de la seguridad asignada para un valor de $Su = 10$ ocasiona grandes restricciones a la hora de planificar la red ciclista en el municipio de Málaga. Es un indicio favorable a la hora de considerar un valor de 10 para el perfil de usuario ocasional. En este sentido, la seguridad que debe de tener cada uno de los arcos para considerarse óptimo garantiza un mayor atractivo para los diferentes usuarios del municipio.

Se destaca el recorrido seguido de algunos corredores para la configuración presentada. El corredor 6, encargado de unir las zonas de Malagueta y Victoria, tiene asignada una distancia total de 3165 metros para el conjunto de arcos de recorrido. Al comparar con el mismo corredor para la configuración del caso práctico 1, se observa como la distancia para dicho corredor es de 1458 metros. La configuración de las diferentes variables de seguridad han condicionado el recorrido para el corredor 6. Buscando el recorrido de camino mínimo para unir las dos zonas (Malagueta y Victoria) con un valor de seguridad mínimo de 10. Otros corredores con la misma tesitura serían el C22, C25, C33, C34, C36 C38, C45, C46, C48, C51 y C52.

Para una mayor comprensión de los resultados obtenidos, se adjunta el mapa para el caso práctico expuesto (figura 8.23). En comparación con el mapa resultante del

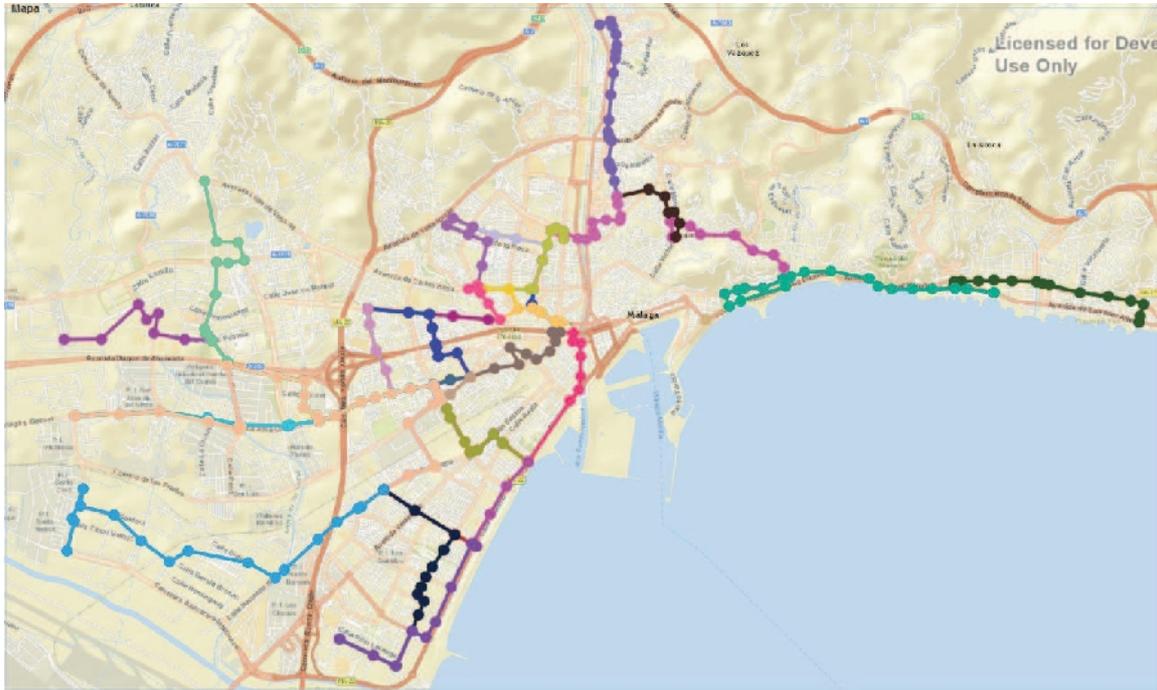


Figura 8.13: Ejemplo Red Caso Práctico 2

primer ejemplo se pueden apreciar grandes diferencias relacionadas con las distancias de los diferentes recorridos de los corredores.

8.4.3. Aplicación caso práctico 3

Otra de las configuraciones planteadas se resuelve en el caso práctico 3. Para este caso particular se han considerado grandes diferencias relacionadas en la disponibilidad del espacio físico en el entramado urbano de Málaga. Se ha disminuido el espacio mínimo disponible para la posibilidad de implantar el carril bici por la acera. En la tabla 8.25 se presentan las anchuras mínimas codificadas.

Además, se ha modificado la configuración de restricciones asociadas a la con las características de tipología de calzada. Con un aumento de la velocidad máxima para la totalidad de arcos. En el caso particular de arcos de un carril y sentido, también se ha realizado un aumento del IMD_{ij} máximo. Para permitir con mayor facilidad la implan-

Tipología	Anchura mínima
Acera bici	3 metros
Acera bici protegida	3 metros
Calzada bici	3.5 metros
Calzada bici segregada	3.5 metros
Ciclovía	3.5 metros
Carril bici por Aparcamiento	2.5 / 5 metros

Tabla 8.25: Anchura para implantacion de CB.

tación de los diferentes tipos de carriles para bicicleta en calzada, se han considerado los siguientes coeficientes:

- 1 carril: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 40$
- 2 carriles:
 - 1 sentido: $IMD_{ij} \leq 4$ y $V_{ij} \leq 50$
 - 2 sentidos: $IMD_{ij} \leq 4$ y $V_{ij} \leq 50$
- 3 carriles:
 - 1 sentido: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 50$
 - 2 sentidos: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 50$
- 4 carriles:
 - 1 sentido: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 50$
 - 2 sentidos: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 50$

La configuración para la seguridad de la tipología de “carril bici” se ha cambiado con respecto al inicial. De este modo se ha otorgado una mayor seguridad a las tipologías cuyo lugar es la acera frente a las que transitan la calzada. El valor de seguridad otorgado a cada una de las clases se corresponden con:

La seguridad mínima se ha mantenido para el caso genérico de un usuario ocasional. Con el valor de $Pu = 10$, se pretende obtener un diseño de red con atractivo para los

Tipología de Carril Bici	Seguridad
Acera Bici	15
Acera Bici Segregada	20
Calzada Bici	5
Calzada Bici Protegida	8
Ciclovía	8

Tabla 8.26: Seguridad asociada a la Tipología de Carril Bici.

diferentes usuarios del municipio de Málaga relacionado con la seguridad.

El resultado de los diferentes corredores se desglosa en la tabla 8.27. En comparación con el primer caso práctico analizado, se observan leves diferencias en cuanto a la longitud y recorridos de los 54 corredores analizados para el municipio de Málaga. Destacando una disminución del recorrido para los corredores C3, C4 C22 y C25. Obteniéndose corredores más con una mayor seguridad, al tener una configuración de seguridad para usuario ocasional.

Corredor	Distancia	Recorrido (Path)
C 1	1035	[11, 7, 4, 3]
C 2	1781	[89, 149, 88, 664, 9, 4, 3]
C 3	2962.0	[128, 125, 124, 119, 120, 123, 131, 130, 132, 141, 155, 890, 702, 160, 162, 164, 167, 166, 165, 170, 2, 3]
C 4	1017.0	[260, 262, 254, 167, 166, 165, 170, 2, 3]
C 5	2123.	[407, 322, 317, 176, 8, 177, 6, 5, 3]
C 6	1458.	[89, 149, 88, 664, 9, 4, 7, 11]
C 7	1035.0	[13, 663, 662, 11]
C 8	3034.0	[23, 991, 20, 990, 22, 21, 989, 24, 56, 35, 38, 39, 791, 792, 28, 26, 869, 25]
C 9	1241.0	[128, 98, 99, 95, 146, 91, 89]
C 10	2275.0	[698, 180, 686, 199, 202, 684, 206, 896, 208, 210, 116, 681, 114, 121, 119, 124, 125, 128]
C 11	784.0	[725, 723, 310, 131, 130, 129, 128]
C 12	1580.0	[239, 234, 837, 237, 1088, 155, 154, 669, 142, 144, 143, 138, 137, 128]
C 13	2076.0	[725, 311, 226, 720, 225, 219, 1097, 887, 888, 218, 889, 722, 216, 697, 179, 698]
C 14	1075.0	[239, 234, 837, 237, 236, 312, 724, 725]
C 15	1512.0	[278, 840, 231, 232, 230, 235, 724, 725]
C 16	1563.0	[260, 262, 254, 253, 251, 250, 241, 809, 1088, 1071, 239]

Corredor	Distancia	Recorrido (Path)
C 17	1357.0	[278, 277, 244, 240, 234, 837, 237, 239]
C 18	1681.0	[268, 267, 247, 849, 246, 242, 240, 234, 837, 237, 239]
C 19	1973.0	[407, 322, 317, 726, 315, 264, 263, 262, 260]
C 20	1345.0	[268, 267, 247, 266, 265, 1000, 257, 256, 258, 260]
C 21	1091.0	[709, 297, 266, 265, 1000, 257, 256, 258, 260]
C 22	1358.0	[381, 813, 309, 307, 319, 261, 259, 260]
C 23	2247.0	[381, 815, 380, 883, 632, 379, 633, 634, 334, 332, 325, 324, 407]
C 24	1595.0	[632, 379, 633, 634, 334, 332, 325, 324, 407]
C 25	1220.0	[338, 337, 328, 323, 407]
C 26	1425.0	[268, 1075, 273, 284, 286, 285, 278]
C 27	786.0	[288, 851, 850, 287, 272, 268]
C 28	795.0	[709, 297, 1076, 269, 272, 268]
C 29	2777.0	[593, 926, 592, 767, 553, 547, 403, 399, 296, 295, 288]
C 30	1341.0	[709, 271, 601, 397, 884, 289, 288]
C 31	873.0	[398, 397, 884, 289, 288]
C 32	2488.0	[593, 559, 551, 544, 556, 557, 538, 539, 769]
C 33	2143.0	[398, 535, 533, 532, 873, 531, 774, 1087, 563, 573, 769]
C 34	3162.0	[500, 900, 496, 898, 493, 759, 491, 573, 769]
C 35	2533.0	[581, 580, 576, 574, 775, 575, 780, 573, 769]
C 36	2848.0	[398, 535, 1089, 549, 762, 552, 553, 767, 592, 926, 593]
C 37	1434.0	[398, 397, 601, 271, 709]
C 38	1273.0	[381, 387, 304, 300, 710, 297, 709]
C 39	1793.0	[381, 387, 603, 875, 602, 730, 601, 397, 398]
C 40	1053.0	[386, 385, 1002, 1001, 398]
C 41	959.0	[386, 384, 380, 815, 381]
C 42	436.0	[632, 921, 381]
C 43	2185.0	[335, 805, 333, 411, 922, 632, 921, 381]
C 44	711.0	[632, 883, 380, 384, 386]
C 45	3848.0	[500, 900, 496, 492, 482, 897, 478, 476, 378, 816, 386]
C 46	4559.0	[500, 900, 496, 492, 482, 897, 478, 476, 378, 816, 386, 384, 380, 883, 632]
C 47	1749.0	[335, 805, 333, 411, 922, 632]
C 48	1646.0	[505, 504, 502, 501, 500]
C 49	1292.0	[338, 337, 408, 336, 367, 335]
C 50	3543.0	[734, 349, 735, 342, 345, 784, 783, 879, 340, 880, 881, 336, 367, 335]
C 51	4536.0	[505, 507, 506, 430, 628, 753, 629, 429, 373, 370, 368, 369, 335]
C 52	2689.0	[734, 349, 735, 342, 737, 410, 339, 337, 338]
C 53	2258.0	[465, 464, 458, 457, 452, 451, 450, 447]
C 54	4169.0	[23, 991, 20, 17, 790, 16, 15, 14, 789, 87, 649, 12, 788, 660, 659, 661, 662,

Corredor	Distancia	Recorrido (Path)
		663, 13]

Tabla 8.27: Corredores Caso Práctico 3.

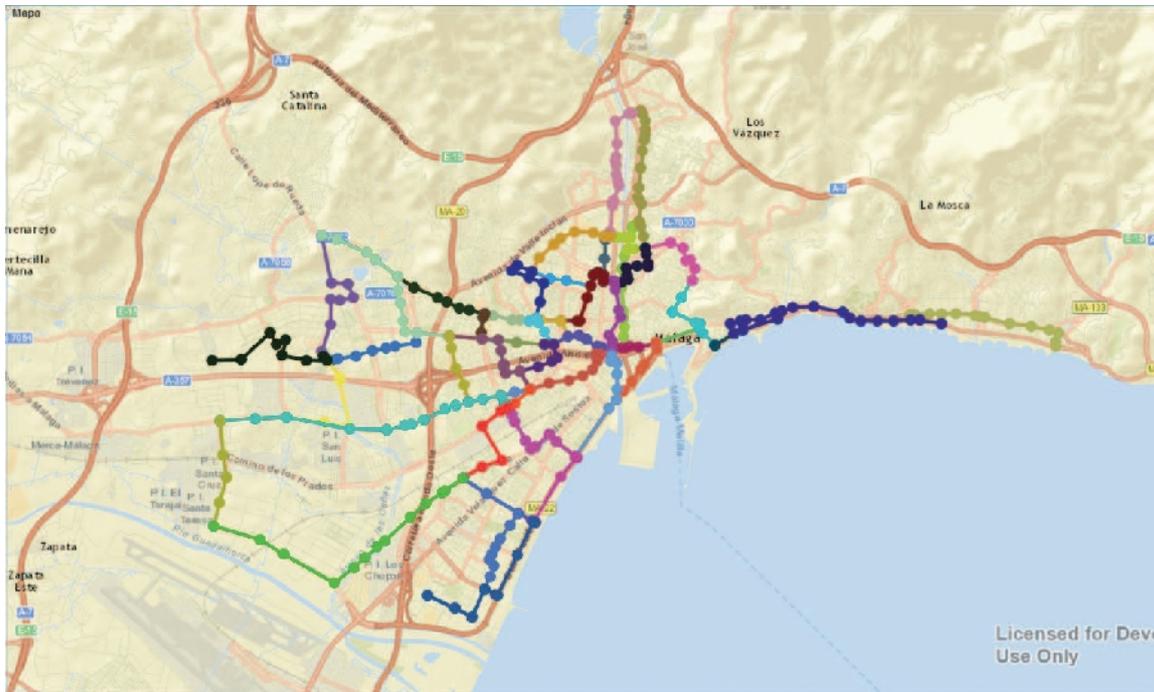


Figura 8.14: Ejemplo Red Caso Práctico 3

El mapa de la red ciclista urbana para el caso de estudio del ejemplo 3, es la representada por la figura 8.14. Se puede observar como el conjunto de la red ocupa gran parte del entramado urbano del municipio de Málaga. De este modo se asegura una infraestructura capaz de abastecer a un mayor número de usuarios reales y potenciales.

Para un mejor análisis de la metodología empleada para el caso particular 3, se realiza un estudio asociado a las tipologías de “carriles bici” asignados a los corredores 1 y 4, tal y como se llevó a cabo en el caso práctico inicial. De este modo se puede comprobar las diferencias en el diseño optado por el software dependiendo de los diferentes pesos e importancia otorgados a las variables de estudio.

En este caso en particular, para el corredor 1 (color morado) no ha habido variaciones con respecto al recorrido realizado para los dos casos. Si hay que diferenciar, para el ejemplo inicial la tipología de carril bici es idéntica para los tres arcos que forman el corredor, *Calzada-Bici*. Para el nuevo ejemplo, se han variado los requisitos de anchura mínima, las restricciones con respecto a la infraestructura de calzada y asignar una

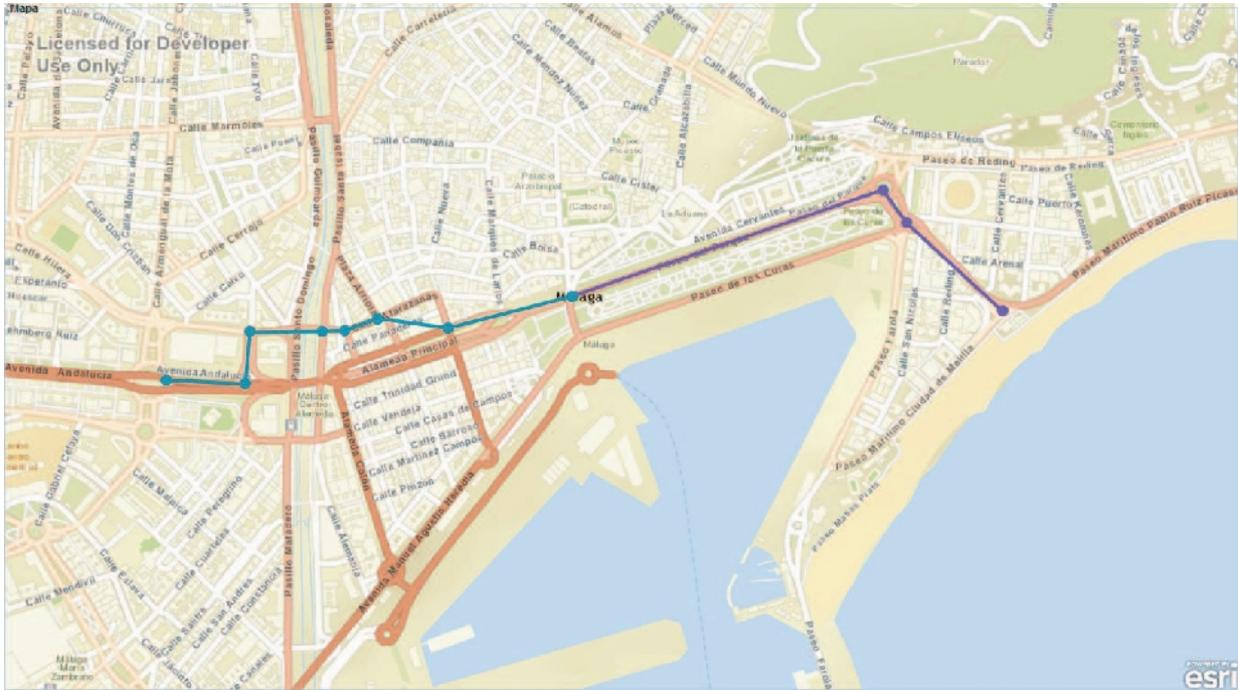
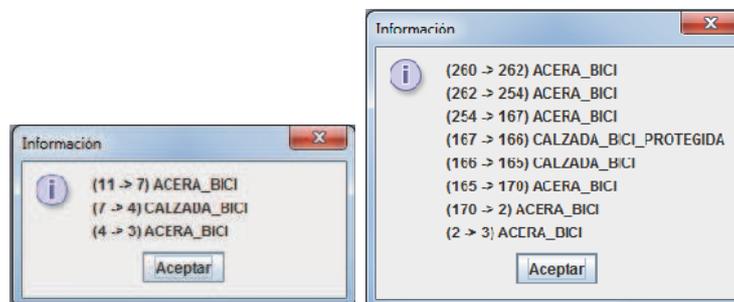


Figura 8.15: Ejemplo Corredores 1 y 4.



(a) Corredor 1

(b) Corredor 4

Figura 8.16: CB Corredores 1 y 4.

seguridad de usuario mínima de 10. Obteniéndose para el corredor Centro - Malagueta una tipología para cada $a_{i,j}$ de *Acera bici*, *Calzada bici* y *Acera bici*, tal y como se puede apreciar en la figura 8.16 (a).

Es en el corredor 4 (Centro - Prolongación Alameda), dónde se pueden observar una mayor importancia de la aplicación de la metodología con la configuración corres-

pendiente para cada variable. El resultado es un corredor con una distancia total de recorrido menor, facilitado por unas menores restricciones para la implantación de este tipo de infraestructuras en aceras. Se puede observar como la influencia del $Pu = 10$ ha condicionado para que los arcos no transiten la zona de la Alameda Principal de Málaga¹⁴ debido a la alta concentración de tráfico que sufre habitualmente.

8.4.4. Aplicación caso práctico 4

A continuación se va a exponer el último ejemplo de aplicación para el caso práctico del municipio de Málaga. Con respecto al ejemplo inicial planteado, se han modificado las restricciones con respecto al espacio físico disponible para cada tipo de infraestructura. En este sentido, destaca un aumento para la posibilidad de ejecutar el “carril bici” por la acera hasta los 5 metros. Del lado contrario, se ha disminuido la restricción de espacio mínimo para la implantación en calzada. Se resumen en la siguiente tabla:

Tipología	Anchura mínima
Acera bici	5 metros
Acera bici protegida	5 metros
Calzada bici	3 metros
Calzada bici segregada	3 metros
Ciclovía	3.5 metros
Carril bici por Aparcamiento	2.5 / 5 metros

Tabla 8.28: Anchura para implantacion de CB.

En relación con las restricciones de infraestructura para la calzada, en términos generales, se ha sido más permisivo. se destaca la restricción de velocidad. Tal y como aparece en el siguiente desglose, las restricciones relacionadas con el número de carriles en calzada sería de:

- 1 carril: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 50$
- 2 carriles:

¹⁴Alameda Principal de Málaga se trata de una de las principales avenidas del centro de la ciudad. Formando parte del eje de conexión con la zona este de la ciudad. Además tiene una funcionalidad de intercambiador entre las líneas de autobús urbano de la Empresa Malagueña de Transporte (EMTSAM).

- 1 sentido: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 50$
- 2 sentidos: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 50$
- 3 carriles:
 - 1 sentido: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 60$
 - 2 sentidos: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 60$
- 4 carriles:
 - 1 sentido: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 60$
 - 2 sentidos: $IMD_{ij} \leq 3$ y $V_{ij} \leq 60$

Los valores concedidos a las diferentes tipologías de infraestructura para la bicicleta se caracterizan por el fomento de “carriles bici” que circulen por la calzada. Tal y como se puede apreciar en la tabla 8.29. Los valores con los que se ha configurado el algoritmo para la aplicación del siguiente ejemplo tiene la clara intención de ser un activo a la hora de reducir el tráfico rodado para el municipio de Málaga. En este sentido, se pretende potenciar las diferentes tipologías ejecutadas por calzada, siempre y cuando cumplan con los mínimos de seguridad establecidos por Pu .

Tipología de Carril Bici	Seguridad
Acera Bici	1
Acera Bici Segregada	2
Calzada Bici	30
Calzada Bici Protegida	40
Ciclovía	50

Tabla 8.29: Seguridad asociada a la Tipología de Carril Bici.

Para obtener una mayor seguridad de la red ciclista en el término municipal de Málaga, se ha asignado un coeficiente de seguridad para el Pu de 15. Con respecto a los perfiles de usuarios establecidos en el modelo, para este ejemplo se ha empleado un perfil de usuario de *Inexperto*. De este modo, se puede garantizar a la hora de asignar un arco como óptimo para tenerlo en cuanto como arco posible para implantar algún

tipo de infraestructura para la bicicleta.

Tras la optimización de los recorridos, se ha obtenido el listado de los corredores correspondientes para el ejemplo del caso práctico 4. El resultado de los 54 corredores se presentan a continuación.

Corredor	Distancia	Recorrido (Path)
C 1	1035	[11, 7, 4, 3]
C 2	1781	[89, 149, 88, 664, 9, 4, 3]
C 3	2372.0	[128, 137, 136, 134, 133, 670, 132, 141, 155, 890, 702, 160, 162, 164, 165, 169, 170, 2, 3]
C 4	1002.0	[260, 262, 254, 167, 166, 165, 169, 170, 2, 3]
C 5	2123.	[407, 322, 317, 176, 8, 177, 6, 5, 3]
C 6	1458.	[89, 149, 88, 664, 9, 4, 7, 11]
C 7	1035.0	[13, 663, 662, 11]
C 8	3034.0	[23, 991, 20, 990, 22, 21, 989, 24, 56, 35, 38, 39, 791, 792, 28, 26, 869, 25]
C 9	1241.0	[128, 98, 99, 95, 146, 91, 89]
C 10	2275.0	[698, 180, 686, 199, 202, 684, 206, 896, 208, 210, 116, 681, 114, 121, 119, 124, 125, 128]
C 11	784.0	[725, 723, 310, 131, 130, 129, 128]
C 12	1561.0	[239, 234, 837, 237, 1088, 155, 154, 669, 142, 133, 670, 132, 135, 129, 128]
C 13	2076.0	[725, 311, 226, 720, 225, 219, 1097, 887, 888, 218, 889, 722, 216, 697, 179, 698]
C 14	1075.0	[239, 234, 837, 237, 236, 312, 724, 725]
C 15	1512.0	[278, 840, 231, 232, 230, 235, 724, 725]
C 16	1563.0	[260, 262, 254, 253, 251, 250, 241, 809, 1088, 1071, 239]
C 17	1357.0	[278, 277, 244, 240, 234, 837, 237, 239]
C 18	1681.0	[268, 267, 247, 849, 246, 242, 240, 234, 837, 237, 239]
C 19	1973.0	[407, 322, 317, 726, 315, 264, 263, 262, 260]
C 20	1345.0	[268, 267, 247, 266, 265, 1000, 257, 256, 258, 260]
C 21	913.0	[709, 708, 301, 298, 259, 260]
C 22	1358.0	[381, 813, 309, 307, 319, 261, 259, 260]
C 23	2247.0	[381, 815, 380, 883, 632, 379, 633, 634, 334, 332, 325, 324, 407]
C 24	1595.0	[632, 379, 633, 634, 334, 332, 325, 324, 407]
C 25	1220.0	[338, 337, 328, 323, 407]
C 26	1425.0	[268, 1075, 273, 284, 286, 285, 278]
C 27	786.0	[288, 851, 850, 287, 272, 268]
C 28	795.0	[709, 297, 1076, 269, 272, 268]
C 29	2777.0	[593, 926, 592, 767, 553, 547, 403, 399, 296, 295, 288]

Corredor	Distancia	Recorrido (Path)
C 30	1341.0	[709, 271, 601, 397, 884, 289, 288]
C 31	873.0	[398, 397, 884, 289, 288]
C 32	2488.0	[593, 559, 551, 544, 556, 557, 538, 539, 769]
C 33	2143.0	[398, 535, 533, 532, 873, 531, 774, 1087, 563, 573, 769]
C 34	2947.0	[500, 900, 496, 497, 498, 491, 573, 769]
C 35	2533.0	[581, 580, 576, 574, 775, 575, 780, 573, 769]
C 36	2848.0	[398, 535, 1089, 549, 762, 552, 553, 767, 592, 926, 593]
C 37	1434.0	[398, 397, 601, 271, 709]
C 38	1273.0	[381, 387, 304, 300, 710, 297, 709]
C 39	1793.0	[381, 387, 603, 875, 602, 730, 601, 397, 398]
C 40	1053.0	[386, 385, 1002, 1001, 398]
C 41	959.0	[386, 384, 380, 815, 381]
C 42	436.0	[632, 921, 381]
C 43	2185.0	[335, 805, 333, 411, 922, 632, 921, 381]
C 44	711.0	[632, 883, 380, 384, 386]
C 45	3848.0	[500, 900, 496, 492, 482, 897, 478, 476, 378, 816, 386]
C 46	4559.0	[500, 900, 496, 492, 482, 897, 478, 476, 378, 816, 386, 384, 380, 883, 632]
C 47	1749.0	[335, 805, 333, 411, 922, 632]
C 48	1646.0	[505, 504, 502, 501, 500]
C 49	1292.0	[338, 337, 408, 336, 367, 335]
C 50	3543.0	[734, 349, 735, 342, 345, 784, 783, 879, 340, 880, 881, 336, 367, 335]
C 51	4536.0	[505, 507, 506, 430, 628, 753, 629, 429, 373, 370, 368, 369, 335]
C 52	2689.0	[734, 349, 735, 342, 737, 410, 339, 337, 338]
C 53	2258.0	[465, 464, 458, 457, 452, 451, 450, 447]
C 54	4169.0	[23, 991, 20, 17, 790, 16, 15, 14, 789, 87, 649, 12, 788, 660, 659, 661, 662, 663, 13]

Tabla 8.30: Corredores Caso Práctico 4.

En comparación con el primer caso de estudio, existe leves diferencias en cuanto a la distancia total de los corredores. Es cierto, al igual que lo demostrado para los diferentes ejemplos expuestos de los corredores 1 y 2, Centro - Malagueta y Centro Prolongación Alameda respectivamente, es necesario analizar que tipología se ha diseñado para cada uno de los arcos que forman los correspondientes corredores. Se destaca la diferencia una menor distancia de los recorridos para los corredores C3, C4, C12, C21, C22 y C25.

Para finalizar el último caso práctico a exponer, se adjunto la resolución del mapa creado por el software para la red ciclista urbana aplicada al municipio de Málaga. Al

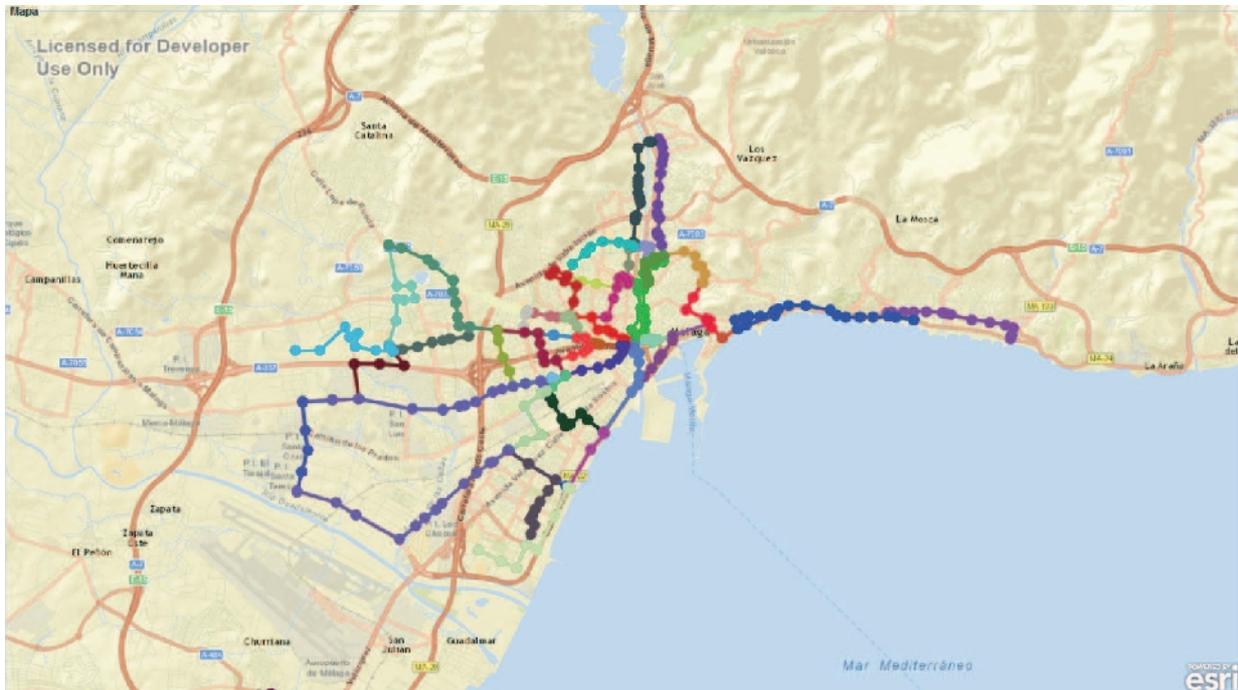


Figura 8.17: Ejemplo Red Caso Práctico 4

igual que en los anteriores casos estudiados, se obtiene una red global que cubre gran parte de la superficie del municipio. De este modo, se permite implantar una infraestructura destinada al uso de la bicicleta a partir de las variables que condicionan los diferentes parámetros planteados en la metodología.

8.4.5. Resumen de los casos prácticos presentados

Para una mayor comparativa relacionada con los casos prácticos expuestos anteriormente, se presenta una tabla resumen para cada uno de los 54 corredores en los diferentes ejemplos llevados a cabo en la validación del caso práctico.

Corredor	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
C 1	1035	-1	1035	1035
C 2	1781	-1	1781	1781
C 3	3022	-1	2962	2372
C 4	1758	-1	1017	1002

Corredor	Caso Práctico 1	Caso Práctico 2	Caso Práctico 3	Caso Práctico 4
C 5	2123	-1	2123	2123
C 6	1458	3165	1458	1458
C 7	1035	1035	1035	1035
C 8	3034	3034	3034	3034
C 9	1241	1241	1241	1241
C 10	2275	2275	2275	2275
C 11	784	-1	784	784
C 12	1580	1580	1580	1561
C 13	2076	-1	2076	2076
C 14	1075	-1	1075	1075
C 15	1512	-1	1512	1512
C 16	1563	1771	1563	1563
C 17	1357	1357	1357	1357
C 18	1681	1681	1681	1681
C 19	1973	1973	1973	1973
C 20	1345	1345	1345	1345
C 21	1091	1091	1091	913
C 22	1720	1733	1358	1358
C 23	2247	2247	2247	2247
C 24	1595	1595	1595	1595
C 25	1246	1253	1220	1220
C 26	1425	1425	1425	1425
C 27	786	-1	786	786
C 28	795	795	795	795
C 29	2777	-1	2777	2777
C 30	1341	-1	1341	1341
C 31	873	-1	873	873
C 32	2488	2488	2488	2488
C 33	2143	3966	2143	2143
C 34	2947	3162	3162	2947
C 35	2533	2533	2533	2533
C 36	2848	6454	2848	2848
C 37	1434	1434	1434	1434
C 38	1273	1761	1273	1273
C 39	1793	1793	1793	1793
C 40	1053	1053	1053	1053
C 41	959	959	959	959
C 42	436	436	436	436

Corredor	Caso Práctico 1	Caso Práctico 2	Caso Práctico 3	Caso Práctico 4
C 43	2185	2185	2185	2185
C 44	711	711	711	711
C 45	3848	3858	3848	3848
C 46	4559	4569	4559	4559
C 47	1749	1749	1749	1749
C 48	1646	13721	1646	1646
C 49	1292	1292	1292	1292
C 50	3543	3543	3543	3543
C 51	4536	6050	4536	4536
C 52	2689	2710	2689	2689
C 53	2258	-1	2258	2258
C 54	4169	4169	4169	4169
Total km.	102,70	101,19	101,72	100,71

Tabla 8.31: Resumen distancias de Corredores (Ejemplos).

9

Conclusiones y líneas de investigación futuras

9.1. Conclusiones

En la presente tesis se ha desarrollado una serie de modelos para la planificación, análisis y diseño de las infraestructuras destinadas al uso de la bicicleta en ámbito urbano. Para lograr dicho objetivo se ha hecho uso de diferentes herramientas matemáticas que han permitido optimizar, dentro del entramado urbano actual, una nueva red ciclista adaptada a cada uno de los casos de estudio. Esta metodología se ha aplicado al estudio de "carriles bici" en el municipio de Málaga, obteniéndose importantes resultados.

Las soluciones a los diferentes objetivos propuestos durante la parte inicial de la investigación se han expuesto en cada uno de los capítulos presentados. A la hora de identificar los diferentes parámetros con los métodos y técnicas para el fomento de la bicicleta en áreas urbanas, se tomó la decisión de clasificar cada una de las variables relacionadas con la infraestructura vial y el entramado urbano existente, con las tipologías de infraestructuras destinadas al uso de la bicicleta y las variables que afectan a la movilidad de los usuarios. En este sentido, se identifican las variables latentes que influyen en las percepciones de seguridad de los diferentes usuarios. Este conjunto de parámetros, junto con los observables y objetivos, han servido para la interpretación del comportamiento de la movilidad ciclista, en especial, para el caso aplicado del municipio de Málaga.

La encuesta de movilidad realizada sobre las preferencias de uso, respecto a la movilidad sostenible, ha facilitado la configuración de los patrones de conducta y, en definitiva, el peso de las variables que influyen en la toma de decisiones a la hora de seleccionar la bicicleta como modo de transporte habitual para un usuario de Málaga.

El tratamiento de datos, a la hora de realizar modelos de transportes, adquiere vital importancia. Para el caso particular de la presente tesis, se tuvo que realizar la creación del modelo de red debido a su inexistencia. Todos y cada uno de los procesos llevados a cabo han sido únicos para el caso aplicado. Con la finalidad de conseguir una mayor versatilidad para la futura aplicación de la metodología creada a otros casos de estudio, se clasifican los diferentes datos necesarios, y su formato, para obtener un resultado satisfactorio al elaborar el modelo de optimización planteado.

Un aspecto importante a destacar es la creación del software específico. Además de ser capaz de resolver problemas de optimización de movilidad urbana, particularmente para las diferentes redes ciclistas urbanas existentes en el caso de estudio presentado, tiene la capacidad de construir el modelo visual resultante de las infraestructuras ciclistas y de representarlo mediante mapas con sistemas de información geográfica. Este software aporta una gran flexibilidad de aplicación a los diferentes casos de estudio y facilita su uso sobre diferentes modelos de ciudad a la hora de optimizar las redes ciclistas urbanas.

Tras la aplicación del software se presentan algunas de las conclusiones obtenidas en el desarrollo de la presente tesis, basadas en la resolución de los diferentes casos que se han ido presentados en la elaboración de cada uno de los capítulos existentes. El conjunto de conclusiones fundamentan la elaboración del algoritmo matemático creado y su implementación en software.

La búsqueda del camino mínimo para rutas está directamente influenciado por las características del entramado urbano existente. No se puede considerar una buena planificación de red ciclista sin tener en cuenta el problema del tráfico actual y futuro. Las restricciones presentes para este tipo de problemas se centran principalmente en la disponibilidad de espacio físico en cada uno de los arcos que forman la red vial creada. La posibilidad del algoritmo de modificar fácilmente las anchuras mínimas de aceras, calzadas y aparcamientos a tener en cuenta, para implantar las diferentes tipologías de infraestructura ciclista, ofrece multitud de alternativas de diseño.

En relación con la seguridad, se han obtenido conclusiones que describen y analizan el comportamiento y las preferencias sobre el uso de la bicicleta en la ciudad de Málaga. Los no usuarios de la bicicleta otorgan una mayor importancia a la seguridad, debido fundamentalmente a la falta de hábito en su uso, lo que justifica lo expuesto en la revisión de la literatura científica por Harkey⁵⁶. Y la influencia existente de los vehículos a motor protagoniza una disminución de la seguridad y comodidad de los usuarios encuestados. Por ello, el volumen del tráfico es un factor disuasorio de la bicicleta¹¹⁶ que se hace patente en el municipio de Málaga. La posibilidad de aumento de la

percepción de seguridad de los usuarios, a la hora de usar la bicicleta, tiene relación con la existencia de una red completa y mayor número de infraestructuras para la bicicleta³⁴.

La configuración de la ciudad, definida por sus características geométricas y operativas, es el primer condicionante para la implantación de la red ciclista urbana. En lo referido a los tipos de carriles para bicicletas, el 42% de los encuestados usaría diariamente la bicicleta como modo de transporte habitual dentro del municipio de Málaga. Demostrándose la correlación entre una mayor frecuencia de uso de la bicicleta cuando existen "carriles bici" cómodos, seguros y, por tanto, atractivos a un mayor número de usuarios.

En el caso particular de Málaga, existe una predilección por las acera bici protegidas y calzada bici protegidas. La separación de espacios físicos con el resto de actores de la vía pública condicionan la prioridad de estas tipologías. Se destaca un mayor cambio de conducta en los usuarios no habituales de la bicicleta en esas condiciones y se determina que la percepción de seguridad está directamente relacionada con la experiencia de uso de la bicicleta. Por ello se ha observado, en los usuarios con más experiencia en el uso de la bicicleta, una sensación de seguridad mayor en sus desplazamientos.

Para el desarrollo de los modelos de optimización, existe la dificultad de encontrar una solución que satisfaga a todos los condicionantes del problema cuando se trata de optimización multiobjetivo. Este problema tiene solución dentro de la programación matemática del algoritmo con el empleo de herramientas capaces de maximizar la mejor solución para cada uno de los casos. A la hora de elegir los arcos "aptos" y las diferentes tipologías de "carril bici" que pueden implantarse, siempre se selecciona la que ofrece una mayor seguridad, facilitando de este modo un mejor resultado de red ciclista.

Al haberse utilizado en esta tesis una zonificación basada en los diseños de las diferentes administraciones públicas locales, en este caso las de la ciudad de Málaga, se logra una mayor facilidad de uso por parte de las mismas. En este sentido, se ha tenido en consideración que futuros técnicos municipales sean capaces de implementar el software para desarrollar sus propias propuestas de redes ciclistas urbanas. Además, se ofrece una rápida actualización de las diferentes bases de datos con respecto a las

futuras modificaciones que puedan sucederse.

La segmentación, con la que se ha caracterizado a los diferentes perfiles de usuarios genéricos, son una representación real y adaptada a múltiples modelos de aplicación. En este sentido, se han desarrollado 4 perfiles diferenciados por los múltiples hábitos respecto a la frecuencia de uso de la bicicleta y, por tanto, con relación directa sobre la percepción de seguridad de cada usuario. Se obtiene de este modo una configuración que se contrapone a la seguridad mínima global del total de la red.

Al existir diferencias en los hábitos de movilidad, motivos de los desplazamientos y percepciones con respecto a la seguridad, se obtiene una solución adecuada a partir de los *perfiles zonales de seguridad* y caracterizada para cada una de dichas zonas en las que se ha distribuido el municipio de Málaga. Las agrupaciones del total de variables influyen en la optimización final, obteniendo la tipología de "carril bici" con mayor nivel de seguridad. La influencia positiva o negativa con respecto a la seguridad, para las agrupaciones de población, vivienda y usos del suelo, garantizan la mejor planificación y diseño de las infraestructuras para bicicletas más seguras.

El caso práctico presentado en este trabajo corresponde al municipio de Málaga. Se trata de una aplicación del algoritmo a una red de tamaño real con unos tiempos de cálculo ligeros. De este modo, se ha conseguido una convergencia muy rápida para analizar diferentes situaciones de estudio, lo cual aumenta el atractivo del software creado para su uso práctico a diferentes casos reales.

Para finalizar, parte de las investigaciones desarrolladas durante el transcurso de la tesis doctoral han sido presentadas y publicadas en diferentes congresos y revistas internacionales. Se exponen dichos trabajos:

- Liñán, R.J., Gaspar, I., Bordagaray, M., Moura, J.L., Ibeas, A. (2014). Optimization of cycle paths with mathematical programming. *Transportation Research Procedia* 3(2014) 848-855. Elsevier.

- Liñán, R.J., Pérez, J., Cabrera, V. Mathematical optimization for planning and design of cycle paths. *Transport Policy*. En revisión desde abril 2016.
- Liñán, R.J., Merino, S., Martínez, J.(20143). Optimization and design of bicycle lines. *Proceedings of Applications of Computer Algebra ACA (2013)* 303-307.

9.2. Líneas de investigación futuras

A partir de los trabajos realizados y resultados alcanzados en la presente tesis, quedan abiertas diferentes líneas de investigación que se detallan a continuación:

- Aumentar el campo de búsqueda relacionado con las variables que influyen en el comportamiento ciclista y en sus preferencias de uso. Los resultados obtenidos para el caso particular de la ciudad de Málaga pueden ser un punto de partida interesante para la aplicación práctica de la metodología realizada a diferentes casos reales.
- Implementar el software creado sobre el modelo de transporte de Málaga, con el objetivo de relacionar el total de infraestructuras de la red vial para todos los modos de transportes y ver el efecto producido en el reparto modal real de la ciudad. Se obtendría un modelo para la gestión de la demanda ciclista y del resto de modos que actúan en el entramado urbano.
- Servir como metodología para el análisis de las diferentes infraestructuras para biciletas ya diseñadas, con la obtención de mejoras técnicas de diseño y planificación con el objetivo de fomentar su uso en áreas urbanas.
- Buscar los algoritmos más eficientes para la resolución del modelo de optimización multiobjetivo desarrollado para al cálculo de la ruta óptima de la red urbana ciclista.
- Regular el marco legal y normativo en materia de planificación del tráfico y circulación urbana aplicado a la movilidad ciclista. Esto sería una herramienta necesaria a la hora de realizar los diferentes Planes Generales de Ordenación Urbana (PGOU),

además de ser una herramienta de planificación y de regulación para la circulación en bicicleta.

- Crear un modelo común de estrategias ciclistas capaz de ser adaptado a todas las ciudades a partir de la versatilidad ofrecida por la programación del algoritmo.
- Concluir un proceso para el cálculo de la evaluación ambiental y energética de los diferentes casos prácticos aplicados.
- Incluir el análisis de los costes operacionales relacionados con la implantación de los diferentes corredores que puedan formar parte de la red ciclista.
- Relacionar nuevas variables del trazado para la resolución de la optimización de la red ciclista, tales como la ubicación del servicio de bicicleta pública.
- Adaptar los diferentes sistemas de transporte público y sentar las bases para planificar nuevas infraestructuras de uso exclusivo para modos de transportes más sostenibles dentro del entramado urbano.

Bibliografía

- [1] Diego Sanz Abella, Raúl Rúa Cerveró, Francisco Selma Mendoza, and Miguel Ángel Carrera Hueso. Tipología y secciones transversales de vías ciclistas en España. *Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*, (172):6–26, 2010.
- [2] Icek Ajzen. *From intentions to actions: A theory of planned behavior*. Springer, 1985.
- [3] Icek Ajzen. The theory of planned behavior. *Organizational behavior and human decision processes*, 50(2):179–211, 1991.
- [4] Gulsah Akar and Kelly J Clifton. Influence of individual perceptions and bicycle infrastructure on decision to bike. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2140(1):165–172, 2009.
- [5] Lisa Aultman-Hall, Fred L Hall, and Brian B Baetz. Analysis of bicycle commuter routes using geographic information systems: implications for bicycle planning. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1578(1):102–110, 1997.
- [6] M. Hadi Baa'j and Hani S. Mahmassani. An ai-based approach for transit route system planning and design. *Journal of Advanced Transportation*, 25(2):187–209, 1991.
- [7] Albert Bandura. Social cognitive theory of self-regulation. *Organizational behavior and human decision processes*, 50(2):248–287, 1991.
- [8] Miguel Bea Alonso, Joan Pasqual i Rocabert, et al. Los sistemas de bicicletas públicas urbanas. 2009.
- [9] Richard Bellman. Mathematical aspects of scheduling theory. *Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics*, 4(3):168–205, 1956.
- [10] Gerd Bohner and Michaela Wänke. *Attitudes and attitude change*. Psychology Press, 2002.
- [11] Gilles Brassard and Paul Bratley. *Fundamentals of algorithmics*, volume 133350681. Prentice Hall Englewood Cliffs, 1996.

- [12] Daniel L Carter, William W Hunter, Charles V Zegeer, J Richard Stewart, and Herman F Huang. Pedestrian and bicyclist intersection safety indices: final report. Technical report, 2006.
- [13] Robert Cervero and Michael Duncan. Walking, bicycling, and urban landscapes: evidence from the san francisco bay area. *American journal of public health*, 93(9):1478–1483, 2003.
- [14] Robert Cervero and Kara Kockelman. Travel demand and the 3ds: density, diversity, and design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2(3):199–219, 1997.
- [15] Robert Cervero, Olga L Sarmiento, Enrique Jacoby, Luis Fernando Gomez, and Andrea Neiman. Influences of built environments on walking and cycling: lessons from bogotá. *International Journal of Sustainable Transportation*, 3(4):203–226, 2009.
- [16] Partha Chakroborty. Genetic algorithms for optimal urban transit network design. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18(3):184–200, 2003.
- [17] Boris V Cherkassky, Andrew V Goldberg, and Tomasz Radzik. Shortest paths algorithms: Theory and experimental evaluation. *Mathematical programming*, 73(2):129–174, 1996.
- [18] Carey Curtis, John L Renne, and Luca Bertolini. *Transit oriented development: making it happen*. Ashgate Publishing, Ltd., 2009.
- [19] Carta de Aalborg. Carta de las ciudades europeas hacia la sostenibilidad. In *Conferencia europea sobre Ciudades Sostenibles*, volume 27, 1994.
- [20] Juan de Dios Ortúzar. *Modelos de demanda de transporte*. Alfaomega; Universidad católica de Chile, 2000.
- [21] Juan de Dios Ortuzar, Andres Iacobelli, and Claudio Valeze. Estimating demand for a cycle-way network. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 34(5):353–373, 2000.
- [22] Comisión de las comunidades europeas. Bruselas. *Libro blanco: la política europea de transporte cara al 2010: La hora de la verdad*. 2001.
- [23] Comisión de las comunidades europeas. Bruselas. *Libro verde: hacia una nueva cultura de la movilidad urbana*. 2007.
- [24] Delegación de movilidad. Área de tráfico y transporte público. Plan municipal de movilidad sostenible de Málaga (pmms). Technical report, Ayuntamiento de Málaga, 2008.
- [25] Delegación de movilidad. Área de tráfico y transporte público. Consultrans. Propuesta para la mejora de la movilidad urbana de la ciudad de Málaga. Technical report, Ayuntamiento de Málaga, 2005.

- [26] Delegación de movilidad. Área de tráfico y transporte público. Estudio 7. Campaña de encuestas de movilidad sobre el sistema público de bicicletas de Málaga. Technical report, Ayuntamiento de Málaga, 2013.
- [27] Delegación de movilidad. Área de tráfico y transporte público. Tema Consultores y Pereda 4. Estudio sobre la movilidad y modelización de la demanda de transporte en la ciudad de Málaga. Technical report, Ayuntamiento de Málaga, 2001.
- [28] Delegación de movilidad. Área de tráfico y transporte público. Estudio 7. Análisis de la movilidad en la ciudad de Málaga. Technical report, Ayuntamiento de Málaga, 2008.
- [29] Delegación de movilidad. Área de tráfico y transporte público. Estudio 7. Estudio de demanda de movilidad en la ciudad de Málaga. Technical report, Ayuntamiento de Málaga, 2014.
- [30] Kalyanmoy Deb. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, volume 16. John Wiley & Sons, 2001.
- [31] Paul DeMaio. Bike-sharing: History, impacts, models of provision, and future. *Journal of Public Transportation*, 12(4):41–56, 2009.
- [32] Edsger W Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1):269–271, 1959.
- [33] Jennifer Dill. Travel behavior and attitudes: New urbanist vs. traditional suburban neighborhoods. In *Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC*, 2003.
- [34] Jennifer Dill and Theresa Carr. Bicycle commuting and facilities in major us cities: if you build them, commuters will use them. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1828(1):116–123, 2003.
- [35] Jennifer Dill and John Gliebe. Understanding and measuring bicycling behavior: A focus on travel time and route choice. 2008.
- [36] Linda B Dixon. Bicycle and pedestrian level-of-service performance measures and standards for congestion management systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1538(1):1–9, 1996.
- [37] Richard Dowling, Aimee Flannery, Bruce Landis, Theo Petritsch, Nagui Roupail, and Paul Ryus. Multimodal level of service for urban streets. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2071(1):1–7, 2008.
- [38] Matthias Ehrgott and Xavier Gandibleux. A survey and annotated bibliography of multiobjective combinatorial optimization. *OR-Spektrum*, 22(4):425–460, 2000.

- [39] Matthias Ehrgott and Xavier Gandibleux. Approximative solution methods for multiobjective combinatorial optimization. *Top*, 12(1):1–63, 2004.
- [40] Catherine R Emond, Wei Tang, and Susan L Handy. Explaining gender difference in bicycling behavior. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2125(1):16–25, 2009.
- [41] Wei Fan and Randy B Machemehl. Optimal transit route network design problem: Algorithms, implementations, and numerical results. Technical report, 2004.
- [42] Robert W Floyd. Algorithm 97: shortest path. *Communications of the ACM*, 5(6):345, 1962.
- [43] John Forester. The bicycle transportation controversy. *Transportation Quarterly*, 55(2), 2001.
- [44] Peter G Furth and Maaza C Mekuria. Network connectivity and low-stress bicycling. In *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*, number 13-0427, 2013.
- [45] Antonio Miguel Mora Garcia. *Resolución del Problema Militar de Búsqueda de Camino Óptimo Multiobjetivo Mediante el Uso de Algoritmos de Optimización Basados en Colonias de Hormigas*. PhD thesis, PhD thesis, Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores, Universidad de Granada, Spain, 2009.
- [46] Juan Carlos García Palomares. Incidencia en la movilidad de los principales factores de un modelo metropolitano cambiante. *EURE (Santiago)*, 34(101):5–24, 2008.
- [47] Jan Garrard, Geoffrey Rose, and Sing Kai Lo. Promoting transportation cycling for women: the role of bicycle infrastructure. *Preventive medicine*, 46(1):55–59, 2008.
- [48] Frank W Geels. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research policy*, 31(8):1257–1274, 2002.
- [49] Frank W Geels. The dynamics of transitions in socio-technical systems: a multi-level analysis of the transition pathway from horse-drawn carriages to automobiles (1860–1930). *Technology Analysis & Strategic Management*, 17(4):445–476, 2005.
- [50] John Paul Gliebe, Joseph Broach, and Jennifer Dill. Development of a multi-class bicyclist route choice model using revealed preference data. In *The 12th International Conference on Travel Behaviour Research*. Retrieved March, volume 26, page 2010, 2009.
- [51] Mulley C. Nelson J. Smith M. Sammer G. Klementschtz R. Roider O. GÄ¼lller, P. Socio-economic impact assessment; urban transport and socio-economic development (transecon), deliverable 5. Technical report, University of Newcastle, 2003.
- [52] Fred Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & operations research*, 13(5):533–549, 1986.

- [53] Valérie Guihaire and Jin-Kao Hao. Transit network design and scheduling: A global review. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(10):1251–1273, 2008.
- [54] Martin Guttenplan, Bruce W Landis, Linda Crider, and Douglas S McLeod. Multimodal level-of-service analysis at planning level. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1776(1):151–158, 2001.
- [55] Susan L. Handy and Yan Xing. Factors correlated with bicycle commuting: A study in six small u.s. cities. *International Journal of Sustainable Transportation*, 5(2):91–110, 2011.
- [56] David L Harkey, Donald W Reinfurt, and Matthew Knuiman. Development of the bicycle compatibility index. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1636(1):13–20, 1998.
- [57] Sylvia Harms. From routine choice to rational decision making between mobility alternatives. In *Paper delivered at 3rd Swiss Transport Research Conference, Monte Verità/Ascona, Switzerland*. Citeseer, 2003.
- [58] Christine R Harris, Michael Jenkins, and Dale Glaser. Gender differences in risk assessment: Why do women take fewer risks than men. *Judgment and Decision Making*, 1(1):48–63, 2006.
- [59] Peter E Hart, Nils J Nilsson, and Bertram Raphael. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *Systems Science and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 4(2):100–107, 1968.
- [60] Eva Heinen, Kees Maat, and Bert Van Wee. The role of attitudes toward characteristics of bicycle commuting on the choice to cycle to work over various distances. *Transportation research part D: transport and environment*, 16(2):102–109, 2011.
- [61] Eva Heinen, Bert Van Wee, and Kees Maat. Impact of work-related factors on levels of bicycle commuting. In *88th Meeting of the Transportation Research Board*, pages 11–15, 2009.
- [62] Darrall Henderson, Sheldon H Jacobson, and Alan W Johnson. The theory and practice of simulated annealing. In *Handbook of metaheuristics*, pages 287–319. Springer, 2003.
- [63] David A Hensher. Stated preference analysis of travel choices: the state of practice. *Transportation*, 21(2):107–133, 1994.
- [64] Hartwig Hochmair. Decision support for bicycle route planning in urban environments. In *Proceedings of the 7th AGILE Conference on Geographic Information Science*, pages 697–706, 2004.
- [65] P Hopkinson and M Wardman. Evaluating the demand for new cycle facilities. *Transport Policy*, 3(4):241–249, 1996.

- [66] John Douglas Hunt and JE Abraham. Influences on bicycle use. *Transportation*, 34(4):453–470, 2007.
- [67] Tetsuro Hyodo, Norikazu Suzuki, and Katsumi Takahashi. Modeling of bicycle route and destination choice behavior for bicycle road network plan. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1705(1):70–76, 2000.
- [68] A. et al. Ibeas Portilla. Manual de encuestas de movilidad (preferencias reveladas). Technical report, Escuela tecnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander, 2007.
- [69] Ivan Illich. Energía y equidad. *Posada. Barcelona*, page 42, 1978.
- [70] Andrzej Jaszkievicz. *Multiple objective metaheuristic algorithms for combinatorial optimization*. Citeseer, 2001.
- [71] Søren Jensen. Pedestrian and bicyclist level of service on roadway segments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2031):43–51, 2007.
- [72] Søren Underlien Jensen, Claus Rosenkilde, and Niels Jensen. Road safety and perceived risk of cycle facilities in copenhagen. *Presentation to AGM of European Cyclists Federation*, 2007.
- [73] Ignacy Kaliszewski. Out of the mist—towards decision-maker-friendly multiple criteria decision making support. *European Journal of Operational Research*, 158(2):293–307, 2004.
- [74] Astrid Kemperman and Harry Timmerman. Influences of built environment on walking and cycling by latent segments of aging population. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2134(1):1–9, 2009.
- [75] Paul Krawczyk. Creating pedestrian and bicycle systems in conjunction with new development. 1995.
- [76] Kevin J Krizek. Estimating the economic benefits of bicycling and bicycle facilities: An interpretive review and proposed methods. In *Essays on transport economics*, pages 219–248. Springer, 2007.
- [77] Kevin J Krizek, Ahmed El-Geneidy, and Kristin Thompson. A detailed analysis of how an urban trail system affects cyclist’s travel. *Transportation*, 34(5):611–624, 2007.
- [78] Joseph B Kruskal. On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. *Proceedings of the American Mathematical society*, 7(1):48–50, 1956.

- [79] Bruce W Landis, Venkat R Vattikuti, Russell M Ottenberg, Theodore A Petritsch, Martin Guttenplan, and Linda B Crider. Intersection level of service for the bicycle through movement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1828(1):101–106, 2003.
- [80] Roberto José Liñán Ruiz. Estudio y optimización del carril bici de la ciudad de Málaga. Master's thesis, Escuela Politécnica Superior. Universidad de Málaga, 2012.
- [81] Anne C Lusk, Peter G Furth, Patrick Morency, Luis F Miranda-Moreno, Walter C Willett, and Jack T Dennerlein. Risk of injury for bicycling on cycle tracks versus in the street. *Injury Prevention*, 17(2):131–135, 2011.
- [82] Christoph E Mandl. Evaluation and optimization of urban public transportation networks. *European Journal of Operational Research*, 5(6):396–404, 1980.
- [83] Chris McCahil and Norman W Garrick. The applicability of space syntax to bicycle facility planning. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2074(1):46–51, 2008.
- [84] Hugh McClintock and Johanna Cleary. Cycle facilities and cyclist's safety: Experience from greater nottingham and lessons for future cycling provision. *Transport Policy*, 3(1):67–77, 1996.
- [85] John A Molino, Jason F Kennedy, Patches L Johnson, Pascal A Beuse, Amanda K Emo, and Ann Do. Pedestrian and bicyclist exposure to risk: Methodology for estimation in an urban environment. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2140(1):145–156, 2009.
- [86] A Monzón and G Rondinella. Probici-guia de la movilidad ciclista-métodos y técnicas para el fomento de la bicicleta en áreas urbanas. *Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE)-Colegio ICCyP-Transyt. Madrid*, 2010.
- [87] Anne Vernez Moudon, Chanam Lee, Allen D Cheadle, Cheza W Collier, Donna Johnson, Thomas L Schmid, and Robert D Weather. Cycling and the built environment, a us perspective. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 10(3):245–261, 2005.
- [88] Shankar Natarajan and Michael J Demetsky. Selection and evaluation of bicycle and pedestrian safety projects. In *Transportation Research Board 88st Annual Meeting, Washington DC*, 2009.
- [89] Arthur C Nelson and David Allen. If you build them, commuters will use them: association between bicycle facilities and bicycle commuting. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1578(1):79–83, 1997.

- [90] Nathalie Noël, Carole Leclerc, and Martin Lee-Gosselin. Crc index: compatibility of roads for cyclists in rural and urban fringe areas. In *Proceedings of the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 2003.
- [91] Robert B Noland, Devajyoti Deka, and Ranjit Walia. A statewide analysis of bicycling in new jersey. *International journal of sustainable transportation*, 5(5):251–269, 2011.
- [92] San Francisco Department of Public Health. Bicycle environmental quality index (beqi), draft report. Technical report, San Francisco Department of Public Health, 2009.
- [93] Andrzej Osyczka. Multicriteria optimization for engineering design. *Design optimization*, 1:193–227, 1985.
- [94] Christos H Papadimitriou and Kenneth Steiglitz. *Combinatorial optimization: algorithms and complexity*. Courier Corporation, 1998.
- [95] John Parkin and Jonathon Rotheram. Design speeds and acceleration characteristics of bicycle traffic for use in planning, design and appraisal. *Transport Policy*, 17(5):335–341, 2010.
- [96] John Parkin, Mark Wardman, and Matthew Page. Models of perceived cycling risk and route acceptability. *Accident Analysis & Prevention*, 39(2):364–371, 2007.
- [97] TA Petritsch, BW Landis, PS McLeod, HF Huang, and D Scott. Energy savings resulting from the provision of bicycle facilities. In *TRB 87th Annual Meeting Compendium of Papers DVD*, pages 13–17, 2008.
- [98] Theodore A Petritsch, Bruce W Landis, Herman F Huang, Peyton S McLeod, Daniel Lamb, Waddah Farah, and Martin Guttenplan. Bicycle level of service for arterials. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2031(1):34–42, 2007.
- [99] Abdul Rawoof Pinjari, Naveen Eluru, Chandra R Bhat, Ram M Pendyala, and Erika Spissu. Joint model of choice of residential neighborhood and bicycle ownership: accounting for self-selection and unobserved heterogeneity. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2082(1):17–26, 2008.
- [100] Robert Clay Prim. Shortest connection networks and some generalizations. *Bell system technical journal*, 36(6):1389–1401, 1957.
- [101] John Pucher and Ralph Buehler. Cycling for everyone: lessons from europe. *Transportation Research Record: Journal of the transportation research board*, 2074(1):58–65, 2008.
- [102] John Pucher and Ralph Buehler. Making cycling irresistible: lessons from the netherlands, denmark and germany. *Transport Reviews*, 28(4):495–528, 2008.

- [103] Samuel Raff. Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. *Computers & Operations Research*, 10(2):63–211, 1983.
- [104] Andrea Raith and Matthias Ehrgott. A comparison of solution strategies for biobjective shortest path problems. *Computers & Operations Research*, 36(4):1299–1331, 2009.
- [105] Michael Replogle and Environmental Defense Fund. *Integrating Pedestrian and Bicycle Factors Into Regional Transportation Planning Models: Summary of the State-of-the-art and Suggested Steps Forward*. Environmental Defense Fund Washington, DC, 1995.
- [106] Piet Rietveld. Non-motorised modes in transport systems: a multimodal chain perspective for the netherlands. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 5(1):31–36, 2000.
- [107] Piet Rietveld and Vanessa Daniel. Determinants of bicycle use: do municipal policies matter? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(7):531–550, 2004.
- [108] Juan P. Romero, Angel Ibeas, Jose L. Moura, Juan Benavente, and Borja Alonso. A simulation-optimization approach to design efficient systems of bike-sharing. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 54(0):646 – 655, 2012. Proceedings of {EWGT2012} - 15th Meeting of the {EURO} Working Group on Transportation, September 2012, Paris.
- [109] Juan Pablo Romero Junquera. Modelos de optimización para planificación y gestión operativa de sistemas de bicicleta pública. 2013.
- [110] Gianni Rondinella and Andrés Monzón de Cáceres. ¿ cómo fomentar el uso de la bicicleta como modo de transporte? 2012.
- [111] Kjartan Sælensminde. Cost–benefit analyses of walking and cycling track networks taking into account insecurity, health effects and external costs of motorized traffic. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(8):593–606, 2004.
- [112] Ipek N Sener, Naveen Eluru, and Chandra R Bhat. An analysis of bicycle route choice preferences in texas, us. *Transportation*, 36(5):511–539, 2009.
- [113] A Sorton and T Walsh. Bicycle stress level as a tool to evaluate urban and suburban bicycle compatibility. in transportation research record 1438, trb, national research council, washington, d. c., 1994, pp. 17-24.
- [114] Bradley S Stewart and Chelsea C White III. Multiobjective a*. *Journal of the ACM (JACM)*, 38(4):775–814, 1991.
- [115] Monique A Stinson and Chandra R Bhat. Commuter bicyclist route choice: analysis using a stated preference survey. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1828(1):107–115, 2003.

-
- [116] Nebiyou Y Tilahun, David M Levinson, and Kevin J Krizek. Trails, lanes, or traffic: Valuing bicycle facilities with an adaptive stated preference survey. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(4):287–301, 2007.
- [117] Geetam Tiwari. Planning for bicycles and other non motorised modes: The critical element in city transport system. In *ADB International Workshop on Transport Planning, Demand Management and Air Quality*, 2002.
- [118] R. Tolley. *Sustainable Transport*. Woodhead Publishing in environmental management. Elsevier Science, 2003.
- [119] Kazuyoshi Wakuta. A multi-objective shortest path problem. *Mathematical methods of operations research*, 54(3):445–454, 2001.
- [120] Mark Wardman, Miles Tight, and Matthew Page. Factors influencing the propensity to cycle to work. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(4):339–350, 2007.
- [121] Meghan Winters, Gavin Davidson, Diana Kao, and Kay Teschke. Motivators and deterrents of bicycling: comparing influences on decisions to ride. *Transportation*, 38(1):153–168, 2011.
- [122] Sammy Zahran, Samuel D Brody, Praveen Maghelal, Andrew Prelog, and Michael Lacy. Cycling and walking: Explaining the spatial distribution of healthy modes of transportation in the united states. *Transportation research part D: transport and environment*, 13(7):462–470, 2008.

Anexo I

Programación de las variables para
los Casos Prácticos.

Se exponen el valor dado a las diferentes variables que condicionan el resultado para cada uno de los 4 casos prácticos expuestos.

I.a. Caso Práctico 1

Listing I.1: Código Parámetros Ejemplo 1

```
<perfil>
<num_carriles value="2619" />
<alphas>
  <alpha1 value="1" />
  <alpha2 value="1" />
  <alpha3 value="1" />
</alphas>
<infraestructura>
  <acera_bici>
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="4.5" />
  </acera_bici>
  <acera_bici_protegida>
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="5" />
  </acera_bici_protegida>
  <calzada_bici>
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="3.5" />
  </calzada_bici>
  <calzada_bici_protegida>
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="3.5" />
  </calzada_bici_protegida>
  <ciclovia>
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="4" />
  </ciclovia>
  <carril_bici_aparcamiento>
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="2.5" />
  </carril_bici_aparcamiento>
  <carril_bici_mas_aparcamiento>
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="5" />
  </carril_bici_mas_aparcamiento>
  <infraestructura_calzada>
    <conditions>
      <condition operator="MENORIGUAL" value="2" />
    </conditions>
  </infraestructura_calzada>
</infraestructura>
```

```
        <condition operator="MENORIGUAL" value="30" />
    </conditions>
</infraestructura_calzada>
<dos_carriles_1_sentido>
    <conditions>
        <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
        <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="50" />
    </conditions>
</dos_carriles_1_sentido>
<dos_carriles_2_sentidos>
    <conditions>
        <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
        <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="50" />
    </conditions>
</dos_carriles_2_sentidos>
<comprobacion_3_carriles_a>
    <conditions>
        <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
        <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="40" />
    </conditions>
</comprobacion_3_carriles_a>
<comprobacion_3_carriles_b>
    <conditions>
        <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="2" />
        <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="40" />
    </conditions>
</comprobacion_3_carriles_b>
<comprobacion_3_carriles_c>
    <conditions>
        <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
        <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="40" />
    </conditions>
</comprobacion_3_carriles_c>
<comprobacion_3_carriles_d>
    <conditions>
        <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
        <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="40" />
    </conditions>
</comprobacion_3_carriles_d>
```

```
</infraestructura>
<seguridad>
  <imd>
    <cases>
      <case condition="1" value="5" />
      <case condition="2" value="4" />
      <case condition="3" value="3" />
      <case condition="4" value="1" />
      <case condition="5" value="0" />
    </cases>
  </imd>
  <velocidad>
    <rangos type="valores">
      <rango condition="30" value="5" />
      <rango condition="40" value="4" />
      <rango condition="50" value="3" />
      <rango condition="60" value="2" last_value="1" />
    </rangos>
  </velocidad>
  <capacidad>
    <cases>
      <case condition="500" value="5" />
      <case condition="700" value="4" />
      <case condition="800" value="3" />
      <case condition="1000" value="2" />
      <case condition="1100" value="1" />
    </cases>
  </capacidad>
  <tipo_via>
    <cases>
      <case condition="0" value="2" />
      <case condition="1" value="1" />
      <case condition="2" value="0.5" />
      <case condition="3" value="0" />
      <case condition="4" value="0" />
    </cases>
  </tipo_via>
  <numero_carriles>
    <cases_un_sentido>
```

```

        <case condition="1" value="0" />
        <case condition="2" value="1" />
        <case condition="3" value="2" />
        <case condition="4" value="3" />
    </cases_un_sentido>
    <cases_doble_sentido>
        <case condition="2" value="0.2" />
        <case condition="3" value="0.5" />
        <case condition="4" value="0.8" />
    </cases_doble_sentido>
</numero_carriles>
<tipologia_carril_bici>
    <nivel_seguridad>
        <nivel value="1" />
        <nivel value="2" />
        <nivel value="3" />
        <nivel value="4" />
        <nivel value="5" />
    </nivel_seguridad>
</tipologia_carril_bici>
<seguridad_maxima>
    <umbral_seguridad_usuario_generico value="1" />
</seguridad_maxima>
</seguridad>
<perfil_seguridad>
    <sexo>
        <hombres value="-0.075" />
        <mujeres value="+0.1" />
    </sexo>
    <edades>
        <edad1 value="+0.01" />
        <edad2 value="+0.075" />
        <edad3 value="+0.02" />
        <edad4 value="+0" />
    </edades>
    <hogares>
        <rangos>
            <rango condition="4000" value="+0.01" />
            <rango condition="8000" value="+0.02" last_value="+0.01" />
        </rangos>
    </hogares>
</perfil_seguridad>

```

```
</rangos>
</hogares>
<tamanyo_medio_hogar>
  <rangos>
    <rango condition="2.5" value="+0.01" />
    <rango condition="3" value="+0.02" last_value="+0.03" />
  </rangos>
</tamanyo_medio_hogar>
<numero_vehiculos_media>
  <rangos>
    <rango condition="0.85" value="+0.02" />
    <rango condition="1" value="+0.04" />
    <rango condition="1.25" value="+0.05" last_value="+0.06" />
  </rangos>
</numero_vehiculos_media>
<numero_vehiculos_hogar>
  <rangos>
    <rango condition="500" value="+0.099" />
    <rango condition="1500" value="+0.099" />
    <rango condition="3000" value="+0.099" last_value="+0.099" />
  </rangos>
</numero_vehiculos_hogar>
<estudiantes>
  <rangos>
    <rango condition="75" value="+0" />
    <rango condition="150" value="+0.01" last_value="+0.05" />
  </rangos>
</estudiantes>
<ocupados>
  <rangos>
    <rango condition="5000" value="+0" />
    <rango condition="10000" value="+0.01" last_value="+0.05" />
  </rangos>
</ocupados>
<equipamiento>
  <rangos>
    <rango condition="1000" value="+0.005" />
    <rango condition="2000" value="+0.007" last_value="+0.1" />
  </rangos>
```

```

    </equipamiento>
    <viajes>
      <rangos>
        <rango condition="250" value="+0.05" />
        <rango condition="500" value="+0.07" last_value="+0.1" />
      </rangos>
    </viajes>
    <viajes2>
      <rangos>
        <rango condition="400" value="+0.05" />
        <rango condition="800" value="+0.07" last_value="+0.1" />
      </rangos>
    </viajes2>
    <limite_seguridad_zonificacion value="1" />
  </perfil_seguridad>
</perfil>

```

I.b. Caso Práctico 2

Listing I.2: Código Parámetros Ejemplo 2

```

<perfil>
  <num_carriles value="2619" />
  <alphas>
    <alpha1 value="1" />
    <alpha2 value="1" />
    <alpha3 value="1" />
  </alphas>
  <infraestructura>
    <acera_bici>
      <condition operator="MAYORIGUAL" value="4.5" />
    </acera_bici>
    <acera_bici_protegida>
      <condition operator="MAYORIGUAL" value="5" />
    </acera_bici_protegida>
  </infraestructura>
</perfil>

```

```
<calzada_bici>
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="3.5" />
</calzada_bici>
<calzada_bici_protegida>
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="3.5" />
</calzada_bici_protegida>
<ciclovia>
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="4" />
</ciclovia>
<carril_bici_aparcamiento>
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="2.5" />
</carril_bici_aparcamiento>
<carril_bici_mas_aparcamiento>
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="5" />
</carril_bici_mas_aparcamiento>
<infraestructura_calzada>
    <conditions>
        <condition operator="MENORIGUAL" value="2" />
        <condition operator="MENORIGUAL" value="30" />
    </conditions>
</infraestructura_calzada>
<dos_carriles_1_sentido>
    <conditions>
        <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
        <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="50" />
    </conditions>
</dos_carriles_1_sentido>
<dos_carriles_2_sentidos>
    <conditions>
        <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
        <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="50" />
    </conditions>
</dos_carriles_2_sentidos>
<comprobacion_3_carriles_a>
    <conditions>
        <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
        <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="40" />
    </conditions>
</comprobacion_3_carriles_a>
```

```
<comprobacion_3_carriles_b>
  <conditions>
    <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
    <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="40" />
  </conditions>
</comprobacion_3_carriles_b>
<comprobacion_3_carriles_c>
  <conditions>
    <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
    <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="40" />
  </conditions>
</comprobacion_3_carriles_c>
<comprobacion_3_carriles_d>
  <conditions>
    <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
    <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="40" />
  </conditions>
</comprobacion_3_carriles_d>
</infraestructura>
<seguridad>
  <imd>
    <cases>
      <case condition="1" value="5" />
      <case condition="2" value="4" />
      <case condition="3" value="3" />
      <case condition="4" value="1" />
      <case condition="5" value="0" />
    </cases>
  </imd>
  <velocidad>
    <rangos type="valores">
      <rango condition="30" value="5" />
      <rango condition="40" value="4" />
      <rango condition="50" value="3" />
      <rango condition="60" value="2" last_value="1" />
    </rangos>
  </velocidad>
  <capacidad>
    <cases>
```

```
        <case condition="500" value="5" />
        <case condition="700" value="4" />
        <case condition="800" value="3" />
        <case condition="1000" value="2" />
        <case condition="1100" value="1" />
    </cases>
</capacidad>
<tipo_via>
    <cases>
        <case condition="0" value="2" />
        <case condition="1" value="1" />
        <case condition="2" value="0.5" />
        <case condition="3" value="0" />
        <case condition="4" value="0" />
    </cases>
</tipo_via>
<numero_carriles>
    <cases_un_sentido>
        <case condition="1" value="0" />
        <case condition="2" value="1" />
        <case condition="3" value="2" />
        <case condition="4" value="3" />
    </cases_un_sentido>
    <cases_doble_sentido>
        <case condition="2" value="0.2" />
        <case condition="3" value="0.5" />
        <case condition="4" value="0.8" />
    </cases_doble_sentido>
</numero_carriles>
<tipologia_carril_bici>
    <nivel_seguridad>
        <nivel value="1" />
        <nivel value="2" />
        <nivel value="3" />
        <nivel value="4" />
        <nivel value="5" />
    </nivel_seguridad>
</tipologia_carril_bici>
<seguridad_maxima>
```

```
        <umbral_seguridad_usuario_generico value="10" />
    </seguridad_maxima>
</seguridad>
<perfil_seguridad>
    <sexo>
        <hombres value="-0.075" />
        <mujeres value="+0.1" />
    </sexo>
    <edades>
        <edad1 value="+0.01" />
        <edad2 value="+0.075" />
        <edad3 value="+0.02" />
        <edad4 value="+0" />
    </edades>
    <hogares>
        <rangos>
            <rango condition="4000" value="+0.01" />
            <rango condition="8000" value="+0.02" last_value="+0.01" />
        </rangos>
    </hogares>
    <tamanyo_medio_hogar>
        <rangos>
            <rango condition="2.5" value="+0.01" />
            <rango condition="3" value="+0.02" last_value="+0.03" />
        </rangos>
    </tamanyo_medio_hogar>
    <numero_vehiculos_media>
        <rangos>
            <rango condition="0.85" value="+0.02" />
            <rango condition="1" value="+0.04" />
            <rango condition="1.25" value="+0.05" last_value="+0.06" />
        </rangos>
    </numero_vehiculos_media>
    <numero_vehiculos_hogar>
        <rangos>
            <rango condition="500" value="+0.099" />
            <rango condition="1500" value="+0.099" />
            <rango condition="3000" value="+0.099" last_value="+0.099" />
        </rangos>
    </numero_vehiculos_hogar>
</perfil_seguridad>
</seguridad_maxima>
</seguridad>
```

```
</numero_vehiculos_hogar>
<estudiantes>
  <rangos>
    <rango condition="75" value="+0" />
    <rango condition="150" value="+0.01" last_value="+0.05" />
  </rangos>
</estudiantes>
<ocupados>
  <rangos>
    <rango condition="5000" value="+0" />
    <rango condition="10000" value="+0.01" last_value="+0.05" />
  </rangos>
</ocupados>
<equipamiento>
  <rangos>
    <rango condition="1000" value="+0.005" />
    <rango condition="2000" value="+0.007" last_value="+0.1" />
  </rangos>
</equipamiento>
<viajes>
  <rangos>
    <rango condition="250" value="+0.05" />
    <rango condition="500" value="+0.07" last_value="+0.1" />
  </rangos>
</viajes>
<viajes2>
  <rangos>
    <rango condition="400" value="+0.05" />
    <rango condition="800" value="+0.07" last_value="+0.1" />
  </rangos>
</viajes2>
<limite_seguridad_zonificacion value="10" />
</perfil_seguridad>
</perfil>
```

I.c. Caso Práctico 3

Listing I.3: Código Parámetros Ejemplo 3

```
<perfil >
<num_carriles value="2619" />
<alphas>
  <alpha1 value="1" />
  <alpha2 value="1" />
  <alpha3 value="1" />
</alphas>
<infraestructura >
  <acera_bici >
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="3" />
  </acera_bici >
  <acera_bici_protegida >
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="3.5" />
  </acera_bici_protegida >
  <calzada_bici >
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="3.5" />
  </calzada_bici >
  <calzada_bici_protegida >
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="3.5" />
  </calzada_bici_protegida >
  <ciclovia >
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="4" />
  </ciclovia >
  <carril_bici_aparcamiento >
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="2.5" />
  </carril_bici_aparcamiento >
  <carril_bici_mas_aparcamiento >
    <condition operator="MAYORIGUAL" value="5" />
  </carril_bici_mas_aparcamiento >
  <infraestructura_calzada >
    <conditions >
      <condition operator="MENORIGUAL" value="3" />
      <condition operator="MENORIGUAL" value="40" />
    </conditions >
  </infraestructura_calzada >
</dos_carriles_1_sentido >
```

```
<conditions>
  <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="4" />
  <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="50" />
</conditions>
</dos_carriles_1_sentido>
<dos_carriles_2_sentidos>
  <conditions>
    <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
    <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="50" />
  </conditions>
</dos_carriles_2_sentidos>
<comprobacion_3_carriles_a>
  <conditions>
    <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
    <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="50" />
  </conditions>
</comprobacion_3_carriles_a>
<comprobacion_3_carriles_b>
  <conditions>
    <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
    <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="50" />
  </conditions>
</comprobacion_3_carriles_b>
<comprobacion_3_carriles_c>
  <conditions>
    <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
    <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="50" />
  </conditions>
</comprobacion_3_carriles_c>
<comprobacion_3_carriles_d>
  <conditions>
    <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
    <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="50" />
  </conditions>
</comprobacion_3_carriles_d>
</infraestructura>
<seguridad>
  <imd>
    <cases>
```

```
<case condition="1" value="5" />
<case condition="2" value="4" />
<case condition="3" value="3" />
<case condition="4" value="1" />
<case condition="5" value="0" />
</cases>
</imd>
<velocidad>
  <rangos type="valores">
    <rango condition="30" value="5" />
    <rango condition="40" value="4" />
    <rango condition="50" value="3" />
    <rango condition="60" value="2" last_value="1" />
  </rangos>
</velocidad>
<capacidad>
  <cases>
    <case condition="500" value="5" />
    <case condition="700" value="4" />
    <case condition="800" value="3" />
    <case condition="1000" value="2" />
    <case condition="1100" value="1" />
  </cases>
</capacidad>
<tipo_via>
  <cases>
    <case condition="0" value="2" />
    <case condition="1" value="1" />
    <case condition="2" value="0.5" />
    <case condition="3" value="0" />
    <case condition="4" value="0" />
  </cases>
</tipo_via>
<numero_carriles>
  <cases_un_sentido>
    <case condition="1" value="0" />
    <case condition="2" value="1" />
    <case condition="3" value="2" />
    <case condition="4" value="3" />
  </cases_un_sentido>
</numero_carriles>
```

```

        </cases_un_sentido>
        <cases_doble_sentido>
            <case condition="2" value="0.2" />
            <case condition="3" value="0.5" />
            <case condition="4" value="0.8" />
        </cases_doble_sentido>
    </numero_carriles>
    <tipologia_carril_bici>
        <nivel_seguridad>
            <nivel value="15" />
            <nivel value="20" />
            <nivel value="5" />
            <nivel value="8" />
            <nivel value="8" />
        </nivel_seguridad>
    </tipologia_carril_bici>
    <seguridad_maxima>
        <umbral_seguridad_usuario_generico value="10" />
    </seguridad_maxima>
</seguridad>
<perfil_seguridad>
    <sexo>
        <hombres value="-0.075" />
        <mujeres value="+0.1" />
    </sexo>
    <edades>
        <edad1 value="+0.01" />
        <edad2 value="+0.075" />
        <edad3 value="+0.02" />
        <edad4 value="+0" />
    </edades>
    <hogares>
        <rangos>
            <rango condition="4000" value="+0.01" />
            <rango condition="8000" value="+0.02" last_value="+0.01" />
        </rangos>
    </hogares>
    <tamanyo_medio_hogar>
        <rangos>

```

```
        <rango condition="2.5" value="+0.01" />
        <rango condition="3" value="+0.02" last_value="+0.03" />
    </rangos>
</tamano_medio_hogar>
<numero_vehiculos_media>
    <rangos>
        <rango condition="0.85" value="+0.02" />
        <rango condition="1" value="+0.04" />
        <rango condition="1.25" value="+0.05" last_value="+0.06" />
    </rangos>
</numero_vehiculos_media>
<numero_vehiculos_hogar>
    <rangos>
        <rango condition="500" value="+0.099" />
        <rango condition="1500" value="+0.099" />
        <rango condition="3000" value="+0.099" last_value="+0.099" />
    </rangos>
</numero_vehiculos_hogar>
<estudiantes>
    <rangos>
        <rango condition="75" value="+0" />
        <rango condition="150" value="+0.01" last_value="+0.05" />
    </rangos>
</estudiantes>
<ocupados>
    <rangos>
        <rango condition="5000" value="+0" />
        <rango condition="10000" value="+0.01" last_value="+0.05" />
    </rangos>
</ocupados>
<equipamiento>
    <rangos>
        <rango condition="1000" value="+0.005" />
        <rango condition="2000" value="+0.007" last_value="+0.1" />
    </rangos>
</equipamiento>
<viajes>
    <rangos>
        <rango condition="250" value="+0.05" />
```

```

        <rango condition="500" value="+0.07" last_value="+0.1" />
    </rangos>
</viajes>
<viajes2>
    <rangos>
        <rango condition="400" value="+0.05" />
        <rango condition="800" value="+0.07" last_value="+0.1" />
    </rangos>
</viajes2>
<limite_seguridad_zonificacion value="10" />
</perfil_seguridad>
</perfil>

```

I.d. Caso Práctico 4

Listing I.4: Código Parámetros Ejemplo 4

```

<perfil>
<num_carriles value="2619" />
<alphas>
    <alpha1 value="1" />
    <alpha2 value="1" />
    <alpha3 value="1" />
</alphas>
<infraestructura>
    <acera_bici>
        <condition operator="MAYORIGUAL" value="5" />
    </acera_bici>
    <acera_bici_protegida>
        <condition operator="MAYORIGUAL" value="5" />
    </acera_bici_protegida>
    <calzada_bici>
        <condition operator="MAYORIGUAL" value="3" />
    </calzada_bici>
    <calzada_bici_protegida>

```

```
        <condition operator="MAYORIGUAL" value="3" />
</calzada_bici_protegida>
<ciclovia>
        <condition operator="MAYORIGUAL" value="3" />
</ciclovia>
<carril_bici_aparcamiento>
        <condition operator="MAYORIGUAL" value="2.5" />
</carril_bici_aparcamiento>
<carril_bici_mas_aparcamiento>
        <condition operator="MAYORIGUAL" value="5" />
</carril_bici_mas_aparcamiento>
<infraestructura_calzada>
  <conditions>
    <condition operator="MENORIGUAL" value="3" />
    <condition operator="MENORIGUAL" value="50" />
  </conditions>
</infraestructura_calzada>
<dos_carriles_1_sentido>
  <conditions>
    <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
    <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="50" />
  </conditions>
</dos_carriles_1_sentido>
<dos_carriles_2_sentidos>
  <conditions>
    <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
    <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="60" />
  </conditions>
</dos_carriles_2_sentidos>
<comprobacion_3_carriles_a>
  <conditions>
    <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
    <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="60" />
  </conditions>
</comprobacion_3_carriles_a>
<comprobacion_3_carriles_b>
  <conditions>
    <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
    <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="60" />
  </conditions>
</comprobacion_3_carriles_b>
```

```

    </conditions>
  </comprobacion_3_carriles_b>
  <comprobacion_3_carriles_c>
    <conditions>
      <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
      <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="60" />
    </conditions>
  </comprobacion_3_carriles_c>
  <comprobacion_3_carriles_d>
    <conditions>
      <condition property="imd" operator="MENORIGUAL" value="3" />
      <condition property="velocidad" operator="MENORIGUAL" value="60" />
    </conditions>
  </comprobacion_3_carriles_d>
</infraestructura>
<seguridad>
  <imd>
    <cases>
      <case condition="1" value="5" />
      <case condition="2" value="4" />
      <case condition="3" value="3" />
      <case condition="4" value="1" />
      <case condition="5" value="0" />
    </cases>
  </imd>
  <velocidad>
    <rangos type="valores">
      <rango condition="30" value="5" />
      <rango condition="40" value="4" />
      <rango condition="50" value="3" />
      <rango condition="60" value="2" last_value="1" />
    </rangos>
  </velocidad>
  <capacidad>
    <cases>
      <case condition="500" value="5" />
      <case condition="700" value="4" />
      <case condition="800" value="3" />
      <case condition="1000" value="2" />
    </cases>
  </capacidad>
</seguridad>
</infraestructura>

```

```
                <case condition="1100" value="1" />
            </cases>
        </capacidad>
        <tipo_via>
            <cases>
                <case condition="0" value="2" />
                <case condition="1" value="1" />
                <case condition="2" value="0.5" />
                <case condition="3" value="0" />
                <case condition="4" value="0" />
            </cases>
        </tipo_via>
        <numero_carriles>
            <cases_un_sentido>
                <case condition="1" value="0" />
                <case condition="2" value="1" />
                <case condition="3" value="2" />
                <case condition="4" value="3" />
            </cases_un_sentido>
            <cases_doble_sentido>
                <case condition="2" value="0.2" />
                <case condition="3" value="0.5" />
                <case condition="4" value="0.8" />
            </cases_doble_sentido>
        </numero_carriles>
        <tipologia_carril_bici>
            <nivel_seguridad>
                <nivel value="1" />
                <nivel value="2" />
                <nivel value="30" />
                <nivel value="40" />
                <nivel value="50" /
            </nivel_seguridad>
        </tipologia_carril_bici>
        <seguridad_maxima>
            <umbral_seguridad_usuario_generico value="15" />
        </seguridad_maxima>
    </seguridad>
</perfil_seguridad>
```

```
<sexo>
  <hombres value="-0.075" />
  <mujeres value="+0.1" />
</sexo>
<edades>
  <edad1 value="+0.01" />
  <edad2 value="+0.075" />
  <edad3 value="+0.02" />
  <edad4 value="+0" />
</edades>
<hogares>
  <rangos>
    <rango condition="4000" value="+0.01" />
    <rango condition="8000" value="+0.02" last_value="+0.01" />
  </rangos>
</hogares>
<tamanyo_medio_hogar>
  <rangos>
    <rango condition="2.5" value="+0.01" />
    <rango condition="3" value="+0.02" last_value="+0.03" />
  </rangos>
</tamanyo_medio_hogar>
<numero_vehiculos_media>
  <rangos>
    <rango condition="0.85" value="+0.02" />
    <rango condition="1" value="+0.04" />
    <rango condition="1.25" value="+0.05" last_value="+0.06" />
  </rangos>
</numero_vehiculos_media>
<numero_vehiculos_hogar>
  <rangos>
    <rango condition="500" value="+0.099" />
    <rango condition="1500" value="+0.099" />
    <rango condition="3000" value="+0.099" last_value="+0.099" />
  </rangos>
</numero_vehiculos_hogar>
<estudiantes>
  <rangos>
    <rango condition="75" value="+0" />
  </rangos>
</estudiantes>
```

```
        <rango condition="150" value="+0.01" last_value="+0.05" />
      </rangos>
    </estudiantes>
  <ocupados>
    <rangos>
      <rango condition="5000" value="+0" />
      <rango condition="10000" value="+0.01" last_value="+0.05" />
    </rangos>
  </ocupados>
  <equipamiento>
    <rangos>
      <rango condition="1000" value="+0.005" />
      <rango condition="2000" value="+0.007" last_value="+0.1" />
    </rangos>
  </equipamiento>
  <viajes>
    <rangos>
      <rango condition="250" value="+0.05" />
      <rango condition="500" value="+0.07" last_value="+0.1" />
    </rangos>
  </viajes>
  <viajes2>
    <rangos>
      <rango condition="400" value="+0.05" />
      <rango condition="800" value="+0.07" last_value="+0.1" />
    </rangos>
  </viajes2>
  <limite_seguridad_zonificacion value="10" />
</perfil_seguridad>
</perfil>
```