

# Universidad Politécnica de Valencia

Departamento de Física Aplicada



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

## Tesis Doctoral

### PRIORIZACIÓN DE PROYECTOS DE MEJORA PARA LA MOVILIDAD URBANA SOSTENIBLE EN LA CIUDAD DE VALENCIA

Presentada por:

**Julio Luis Mazarío Díez**

Dirigida por:

**Dr. Julián Cantó Perelló**

**Dr. Manuel Guzmán Martín Utrillas**

**Dr. Jorge Curiel Esparza**

Valencia, Septiembre de 2015



A mi familia



## **Priorización de proyectos de mejora para la movilidad urbana sostenible en la ciudad de Valencia.**

Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València.

Autor:

Julio Luis Mazarío Díez, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Directores de Tesis:

Dr. Julián Cantó Perelló

Dr. Manuel Guzmán Martín Utrillas

Dr. Jorge Curiel Esparza

## Resumen

Las ciudades europeas actuales presentan importantes problemas de tipo económico, ambiental y social. La Unión Europea ha publicado leyes para solventar estos problemas, y varias ciudades europeas están desarrollando planes de movilidad urbana sostenible con medidas que se pueden implementar para mejorar la movilidad. Las decisiones sobre el transporte tienen impacto directo en los tiempos de circulación, la conectividad urbana, y también afectan al medio ambiente, la salud pública y la sociedad. Elegir la mejora óptima a desarrollar es una decisión compleja, que depende de factores tangibles e intangibles que deben tomarse en cuenta a la vez. Se debe encontrar una solución de compromiso que pondere calidad del viaje, coste y sostenibilidad.

Esta tesis desarrolla un método híbrido multicriterio de ayuda a la decisión para la selección óptima consensuada de un proyecto de movilidad urbana entre varios posibles. Este método combina la participación de expertos mediante el método Delphi, el análisis de sus respuestas mediante el método de análisis multicriterio AHP y el método VIKOR para analizar los resultados y la estabilidad de la solución obtenida como óptima. El método se ha aplicado a la ciudad de Valencia.

## Abstract

Nowadays the European cities usually present important problems at economic, social and environmental levels. The European Union has published policies to ease this issue, and several European cities are creating sustainable mobility urban plans with the measures which can be taken to improve the mobility system. Transport decisions have direct impact on transit times, urban connectivity, and have also effects in the environment, public health and society. Choosing the best enhancement to implement is a complex decision, depending on tangible and intangible criteria, which have to be taken into account together. A compromise solution that weighs travel quality, cost and sustainability inputs has to be achieved.

This thesis develops a multicriteria hybrid method of help to the decision for the optimal consensuated selection of an urban mobility project among the possible ones. This method combines the experts' participation with the Delphi method, the analysis of their answers with the multicriteria analysis AHP and the VIKOR method to analyze the results and the stability of the optimal solution obtained. The methodology has been applied to the city of Valencia.

## Resum

Les ciutats europees actuals presenten importants problemes de tipus econòmic, ambiental i social. La Unió Europea ha publicat lleis per a solventar estos problemes, i varies ciutats europees estan desenvolupant plans de mobilitat urbana sustentable amb mesures que es poden implementar per a millorar la mobilitat. Les decisions sobre el transport tenen impacte directe en els temps de circulació, la connectivitat urbana i també afecten el medi ambient, la salut pública i la societat. Elegir la millora òptima a desenvolupar és una decisió complexa, que depèn de factors tangibles e intangibles que s'han de tomar en compte a la vegada. S'ha de trobar una solució de compromís que ponderi qualitat del viatge, cost i sostenibilitat.

Aquesta tesi desenvolupa un mètode híbrid multicriteri d'ajuda a la decisió per la selecció òptima consensuada d'un projecte de mobilitat urbana entre varis possibles. Aquest mètode combina la participació d'experts mitjançant el mètode Delphi, l'anàlisi de les respostes mitjançant el mètode d'anàlisi multicriteri AHP i el mètode VIKOR per analitzar els resultats i la estabilitat de la solució obtinguda com òptima. El mètode s'ha aplicat a la ciutat de València.

# ÍNDICE



## Índice de Contenidos

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	27
1.1 Exposición de las necesidades a resolver	27
1.2 Objetivos de la tesis	39
1.3 Estructura de la tesis	42
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS PARA ALCANZAR LA MOVILIDAD URBANA SOSTENIBLE	45
2.1 Objetivos económicos	45
2.2 Objetivos de calidad del viaje	48
2.3 Objetivos de sostenibilidad	52
2.4 Otros criterios	64
CAPÍTULO 3. ALTERNATIVAS PARA ALCANZAR LA MOVILIDAD SOSTENIBLE	71
3.1 Modos de transporte no motorizados	75
3.2 Mejoras en el transporte público	82
3.3 Subvenciones a la movilidad	86
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA EMPLEADA	93
4.1 Estructura del proceso metodológico propuesto	93
4.2 El Método Delphi	99
4.3 El Método AHP	105
4.4 El Método VIKOR	114
CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A LA MOVILIDAD SOSTENIBLE	123
5.1 Obtención de la estructura jerárquica	123
5.2 Ponderación de la estructura de criterios y subcriterios	127
5.3 Obtención de la matriz de prioridades	135

5.4	Ponderación de las mejoras a la movilidad aplicando el método VIKOR _____	153
CAPÍTULO 6.	CONCLUSIONES _____	163
CAPÍTULO 7.	REFERENCIAS _____	171
ANEXO 1	PUBLICACIÓN _____	195

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Área metropolitana de Buffalo (EEUU), 1950 - 2000 (Banas, 2010)	29
<b>Figura 2</b> Población y Área metropolitana de Buffalo (EEUU), 1950 - 2000 (Banas, 2010)	29
<b>Figura 3</b> Evolución del área urbana de Pittsburg (EEUU), 1950-2010 (Carter, 2011)	30
<b>Figura 4</b> Dispersión Urbana en Europa (EEA, 2012)	30
<b>Figura 5</b> Zonas con mayor cambio de usos del suelo 1990 - 2006 (ESPON, 2012)	31
<b>Figura 6</b> Consecuencias de la dispersión urbana (arriba, Sustainable prosperity, 2013), (centro izquierda, Vanderleest, 2012), (centro derecha, PEW Research, 2013), (abajo, U.S. Government, 2000)	32
<b>Figura 7</b> Ciclo del desarrollo urbano de las ciudades	33
<b>Figura 8</b> Consumo de energía por modo de transporte con vehículos llenos (Alqueres & Martines, 1999)	35
<b>Figura 9</b> Energía consumida por persona, por modo de transporte (Alcántara, 2010)	36
<b>Figura 10</b> Emisiones de CO <sub>2</sub> por región, 1990 - 2011 (World Resources Institute, 2014)	36
<b>Figura 11</b> Distribución de las emisiones de GHG en EEUU (EPA, 2009)	37
<b>Figura 12</b> Normativa para alcanzar la movilidad urbana sostenible (CEC y Gobierno de España)	40
<b>Figura 13</b> Lamas abandonadas del Ágora, al fondo, obra inacabada por motivos económicos	47
<b>Figura 14</b> Comparativa de los diferentes modos de transporte (CEC2000)	49
<b>Figura 15</b> Tiempo de desplazamiento (enbicipormadrid.es, 2013)	50
<b>Figura 16</b> Coste de la gasolina por kilómetro (céntimos) (AVIS, 2012)	51

<b>Figura 17</b> Emisiones de gases efecto invernadero para diferentes medios de transporte (NSW Government, 2014)	53
<b>Figura 18</b> Exposición a la polución (EEA, 2013)	54
<b>Figura 19</b> Evolución de la contaminación por partículas (Ministerio de Medio Ambiente, 2006)	56
<b>Figura 20</b> Evolución de la contaminación por NO <sub>2</sub> (Ministerio de Medio Ambiente, 2006)	56
<b>Figura 21</b> Emisiones producidas por automóviles en relación con la velocidad (Alcántara, 2010)	57
<b>Figura 22</b> Emisiones producidas por autobús en relación con la velocidad (Alcántara, 2010)	57
<b>Figura 23</b> Exposición nocturna al ruido del tráfico (EEA, 2013)	58
<b>Figura 24</b> Porcentaje de población de Valencia afectada por el ruido dividida por distritos (Ayuntamiento de Valencia, 2012)	60
<b>Figura 25</b> Hoja del mapa de ruido de Valencia (Ayuntamiento de Valencia, 2012)	60
<b>Figura 26</b> Elementos a considerar en el proceso de producción	62
<b>Figura 27</b> Potencial de producción de gases efecto invernadero (Maibach et al., 1997)	62
<b>Figura 28</b> Espacio viario consumido por persona según modo de transporte (Alcántara, 2010)	65
<b>Figura 29</b> Relación entre el flujo en la vía y el tiempo de recorrido (Mayres et al., 1996)	68
<b>Figura 30</b> Evolución del consumo promedio (Casanova, 2005)	71
<b>Figura 31</b> Funcionamiento de los vehículos híbridos y eléctricos (Mauricio Ledesma)	72
<b>Figura 32</b> Renault Twizy, vehículo 100% eléctrico (Reve, 2012)	72
<b>Figura 33</b> Perfil de los usuarios de los sistemas de “Carpooling” (Carpooling, 2015)	74
<b>Figura 34</b> Beneficios sobre el organismo que se producen al andar	75
<b>Figura 35</b> Zona de Londres con tráfico restringido (Transport for London, 2011)	76
<b>Figura 36</b> Plaza del Patriarca	77
<b>Figura 37</b> Vial de gran capacidad frente a la Lonja de la Seda	78

<b>Figura 38</b> Área de actuación de la peatonalización del centro urbano _____	78
<b>Figura 39</b> Beneficios de la bicicleta sobre la salud (lemi.com.mx) _____	79
<b>Figura 40</b> Red de carril bici y estaciones de Valenbisi en la ciudad (Valenbisi, 2015) _____	80
<b>Figura 41</b> Área de actuación de la mejora de la red de carriles bici _____	81
<b>Figura 42</b> Reparto modal por motivo del trabajo en las principales áreas metropolitanas españolas (Ministerio de Medio Ambiente, 2003) _____	83
<b>Figura 43</b> Red actual de autobuses (EMT Valencia, 2015) _____	83
<b>Figura 44</b> Red de metro actual en la ciudad de Valencia (Metrovalencia, 2015) _____	85
<b>Figura 45</b> Obras incompletas de la línea 2 _____	85
<b>Figura 46</b> Cobertura de gastos de explotación por ingresos tarifarios (Melero & Pinto, 2004) _____	86
<b>Figura 47</b> Evolución del precio de los transportes en Madrid (20 Minutos, 2012) _____	87
<b>Figura 48</b> Vehículos estacionados en doble fila _____	88
<b>Figura 49</b> Ubicación de los aparcamientos públicos de la zona centro (RACC, 2012) _____	89
<b>Figura 50</b> Pasos necesarios para obtener la estructura jerárquica _____	95
<b>Figura 51</b> Pasos para obtener el vector de prioridad de criterios y subcriterios _____	96
<b>Figura 52</b> Pasos para obtener la matriz de prioridad de alternativas para subcriterios _____	97
<b>Figura 53</b> Pasos para obtener la solución de compromiso _____	98
<b>Figura 54</b> Proceso de redacción de los cuestionarios según el método Delphi _____	104
<b>Figura 55</b> Ejemplo de una estructura jerárquica de objetivos / criterios / alternativas _____	107
<b>Figura 56</b> Solución de compromiso frente a la solución ideal _____	119
<b>Figura 57</b> Estructura jerárquica para seleccionar las mejoras para la movilidad sostenible _____	126

<b>Figura 58</b> Esquema del procedimiento AIJ (Elaboración propia) _____	131
<b>Figura 59</b> Diagrama de la ponderación de los criterios y subcriterios dentro de la jerarquía _____	134
<b>Figura 60</b> Representación gráfica de la matriz de prioridad _____	152
<b>Figura 61</b> Representación gráfica de los valores Q de las mejoras _____	155
<b>Figura 62</b> Variación del parámetro Q en función de $v$ _____	159
<b>Figura 63</b> Diagrama de la ponderación de los criterios y subcriterios dentro de la jerarquía _____	165
<b>Figura 64</b> Representación gráfica de la matriz de prioridad _____	166

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Velocidades básicas promedio (Alcántara, 2010).	49
<b>Tabla 2</b> Contribución relativa de los contaminantes al efecto invernadero (Tolley & Turton, 1995)	55
<b>Tabla 3</b> Generación de CO <sub>2</sub> por tipo de combustible (Goldemberg, 1998)	55
<b>Tabla 4</b> Efectos del ruido (T & E, 2008).	59
<b>Tabla 5</b> Espacio necesario por modo de transporte (Alcántara 2010)	65
<b>Tabla 6</b> Riesgo de los medios de transporte en Europa (WHO, 2004)	67
<b>Tabla 7</b> Escala para comparaciones por parejas (Vargas, 1990).	107
<b>Tabla 8</b> Escala fundamental de Saaty para comparaciones por parejas (Saaty, 2012).	108
<b>Tabla 9</b> Construcción de la matriz de juicio	109
<b>Tabla 10</b> Índice de consistencia aleatorio (RCI) (Saaty, 2012).	112
<b>Tabla 11</b> Cuestionario para evaluar los criterios (P01-P03) y subcriterios (P04-P15).	128
<b>Tabla 12</b> Plantilla para las respuestas del cuestionario.	129
<b>Tabla 13</b> Resultados del segundo cuestionario. Evaluación de los criterios con respecto al objetivo final (P01-P03), y de los subcriterios con respecto a cada uno de los criterios (P04-P15).	130
<b>Tabla 14</b> Vector de prioridad y análisis de consistencia de las matrices de comparación por pares de los criterios y subcriterios para los juicios colectivos.	133
<b>Tabla 15</b> Pesos de los criterios y subcriterios	134
<b>Tabla 16</b> Cuestionario para evaluar las mejoras para el subcriterio costes iniciales (INI)	135
<b>Tabla 17</b> Plantilla para las respuestas del cuestionario.	136
<b>Tabla 18</b> Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Costes Iniciales (INI)	137
<b>Tabla 19</b> Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Costes de Mantenimiento (OPE)	138

<b>Tabla 20</b> Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Costes Ambientales (ENV)	139
<b>Tabla 21</b> Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Tiempo (TIM)	140
<b>Tabla 22</b> Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Confort (COM)	141
<b>Tabla 23</b> Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Costes del Viaje (COS)	142
<b>Tabla 24</b> Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Polución (POL)	143
<b>Tabla 25</b> Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Ruido (NOI)	144
<b>Tabla 26</b> Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Huella de Carbono (CAF)	145
<b>Tabla 27</b> Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Beneficios para la salud (HEA)	146
<b>Tabla 28</b> Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Costes Iniciales (INI)	147
<b>Tabla 29</b> Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Costes de Mantenimiento (OPE)	147
<b>Tabla 30</b> Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Costes Ambientales (ENV)	148
<b>Tabla 31</b> Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Tiempo (TIM)	148
<b>Tabla 32</b> Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Confort (COM)	148

<b>Tabla 33</b> Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Costes del Viaje (COS) _____	149
<b>Tabla 34</b> Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Polución (POL) _____	149
<b>Tabla 35</b> Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Ruido (NOI) _____	149
<b>Tabla 36</b> Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Huella de Carbono (CAF) _____	150
<b>Tabla 37</b> Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Beneficios para la salud (HEA) _____	150
<b>Tabla 38</b> Matriz de prioridad de las mejoras a la movilidad respecto a los subcriterios _____	151
<b>Tabla 39</b> Valores $f_j^*$ y $f_j^-$ para las mejoras a la movilidad _____	153
<b>Tabla 40</b> Valores de $w_j \frac{f_j^- - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-}$ , $S_i$ y $R_i$ para cada mejora en la movilidad _____	154
<b>Tabla 41</b> Mejores valores $S^*$ , $R^*$ y peores valores $S^-$ , $R^-$ para las mejoras a la movilidad _____	155
<b>Tabla 42</b> Valores de $Q_i$ para cada mejora en la movilidad ( $v = 0.5$ ) _____	155
<b>Tabla 43</b> Valores de $S_i$ , $R_i$ y $Q_i$ ( $v = 0.5$ ) para cada mejora en la movilidad _____	156
<b>Tabla 44</b> Clasificación de las mejoras a la movilidad obtenida del método VIKOR _____	156
<b>Tabla 45</b> Mejoras a la movilidad ordenadas según la clasificación del método VIKOR _____	156
<b>Tabla 46</b> Variación de $Q_i$ para distintos valores de $v$ para cada mejora en la movilidad _____	158
<b>Tabla 47</b> Comprobación de la condición de ventaja aceptable para distintos valores de $v$ _____	160



## Índice de Acrónimos

<b>AHP</b>	Analytic Hierarchy Process (Proceso Analítico Jerárquico)
<b>AIJ</b>	Aggregation of Individual Judgments (Agrupación de juicios individuales)
<b>BIC</b>	Bicycle (Bicicletas)
<b>BUS</b>	Autobús
<b>CAF</b>	Carbon Footprint (Huella de Carbono)
<b>CEC</b>	Commision of The European Communities (Comisión de la comunidad europea)
<b>CFC</b>	Clorofluorocarboros
<b>CI</b>	Consistency Index (Índice de consistencia)
<b>CO</b>	Monóxido de carbono
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>COM</b>	Comfort (Confort)
<b>COS</b>	Coste de viaje
<b>CR</b>	Consistency Ratio (Ratio de Consistencia)
<b>dB(A)</b>	Decibelios
<b>DIS</b>	Discount (Descuento)
<b>E</b>	Economy (criterios económicos)
<b>EEA</b>	European Environment Agency (Agencia Europea de Medio Ambiente)

- ENV** Environmental (Medioambiental)
- ESPON** European Observation Network for Territorial Development and Cohesion (Red de Observación Europea para la Cohesión y el Desarrollo Territorial)
- GHG** Greenhouse Gases (Gases de efecto invernadero)
- HEA** Health (Salud)
- INI** Initial (criterio de costes iniciales)
- MCDM** MultiCriteria Decision Making (Toma de decisiones multicriterio)
- MET** Metro
- MG** Media geométrica
- NO<sub>2</sub>** Dióxido de nitrógeno
- NOI** Noise (Ruido)
- OMS** Organización Mundial de la Salud
- OPE** Operation (Funcionamiento)
- PAR** Parking (Aparcamiento)
- PIB** Producto Interior Bruto
- POL** Pollution (Polución)
- Q** Quality (Criterios de calidad del viaje)
- RCI** Random consistency index
- TBL** Three Bottom Line (Triple resultado)
- TIM** Time (Tiempo)

**UE** Unión Europea

**UNCED** United Nations Conference on Environment and Development  
(Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo y el Medioambiente)

**VIKOR** VišeKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje  
(Optimización Multicriterio y Solución de Compromiso)

**WAL** Walking (Caminar)



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN



## Capítulo 1. Introducción

### 1.1 Exposición de las necesidades a resolver

Las ciudades son el ecosistema en el que gran parte de la población realiza su actividad vital; en ellas se transita para trabajar, estudiar, hacer compras, así como las actividades de ocio. Todas estas actividades requieren traslados, bien andando o mediante vehículos, tanto motorizados como no motorizados. Para la circulación se necesita espacio, tiempo, energía, así como financiación. Así mismo, también se generan impactos negativos, tales como accidentes, contaminación atmosférica, acústica y congestión (Alcantara, 2010).

Para comprender los desplazamientos que se realizan y los medios de transporte idóneos es necesario comprender cómo está estructurada la ciudad y los factores que más influyen en la movilidad y en la elección de los modos de transporte. En el desarrollo de las ciudades intervienen numerosos agentes, cuya relación es dinámica, pues puede cambiar dependiente de las condiciones de cada momento. Los principales agentes y factores que intervienen en el desarrollo urbano son:

- Sistema político y económico: la propiedad privada de la tierra urbana impacta en el desarrollo urbano de las ciudades.
- Estado: influye con sus políticas en sectores tan variados como educación, justicia, salud, desarrollo urbano, transporte público y tránsito.
- Sector privado: principalmente por las empresas constructoras, automotrices, y los grandes capitales financieros, industriales y comerciales.
- Ciudadanos: independientes o asociados, con sus necesidades e intereses específicos.
- Sistemas de transporte existentes: la configuración de la oferta existente condiciona el uso que le dan los ciudadanos.
- Procesos migratorios: la variación de la población de las ciudades cambia las necesidades de movilidad de las mismas.

- Precio de terreno: condiciona la ubicación de la población y de las actividades.
- Dinámica de la economía: afecta al nivel de empleo, a los ingresos medios y a la apertura de nuevos negocios.

Es necesario realizar un correcto análisis de la combinación de los agentes mencionados, para disminuir o incluso eliminar los problemas relacionados con el transporte. Las ciudades sufren constantes transformaciones en su morfología, tanto en los centros de atracción como en la oferta de transporte disponible. El espacio disponible está limitado, y tienen que convivir en él los distintos medios de transporte. Dependiendo del medio de transporte predominante la evolución de las ciudades ha seguido una pauta distinta, desde las ciudades de Norteamérica que se han expandido enormemente por el dominio del vehículo privado, hasta las ciudades de los países pertenecientes a naciones pobres, donde la mayor parte de los desplazamientos se realizan con medios no motorizados de transporte ([Goose & Clarens, 2013](#)).

Durante las últimas décadas las ciudades europeas han estado sufriendo una importante transformación. Han evolucionado desde un centro urbano compacto multifuncional a una extensa masa con usos concentrados en zonas especializadas. Esta transformación ha producido importantes problemas en niveles económicos, sociales y ambientales ([Schmidt-Thomé, et al., 2013](#)). Esta nueva morfología aumenta las operaciones de movilidad ([Schauer, 2011](#)). A este fenómeno, consistente en aumentar la superficie urbana sin aumentar la población, se le conoce como dispersión urbana.

En España, la mayoría de la población vive en municipios de más de 50.000 habitantes, cifra que se ha incrementado en los últimos años. Actualmente, el 41% de la población vive en municipios de más de 100.000 habitantes, y un 11,4% vive en municipios entre 50.000 y 100.000 habitantes ([Ministerio de Medioambiente, 2005](#)). Las ciudades de las áreas metropolitanas han aumentado su influencia, llegando a contabilizar volúmenes de población equivalentes a algunas capitales de provincia.

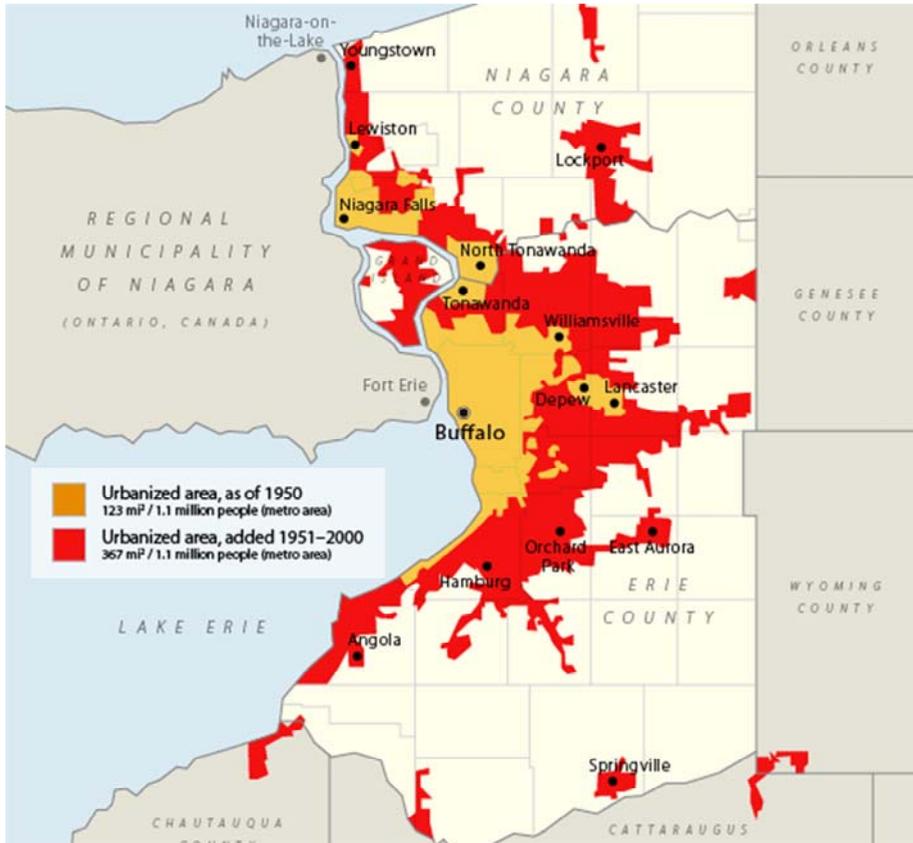


Figura 1 Área metropolitana de Buffalo (EEUU), 1950 - 2000 (Banas, 2010)

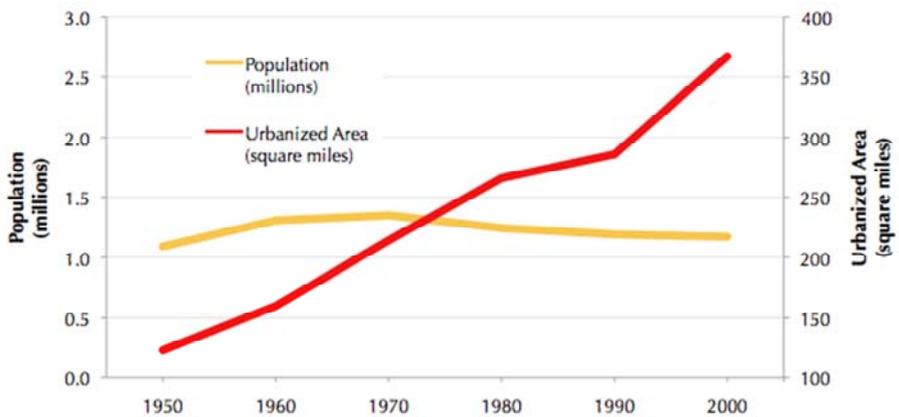


Figura 2 Población y Área metropolitana de Buffalo (EEUU), 1950 - 2000 (Banas, 2010)

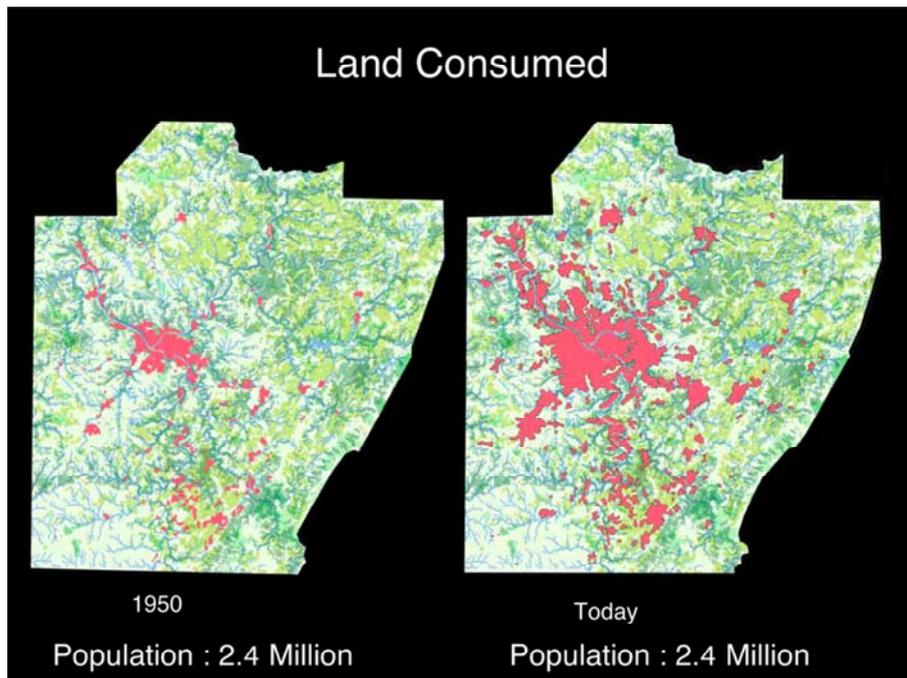


Figura 3 Evolución del área urbana de Pittsburg (EEUU), 1950-2010 (Carter, 2011)

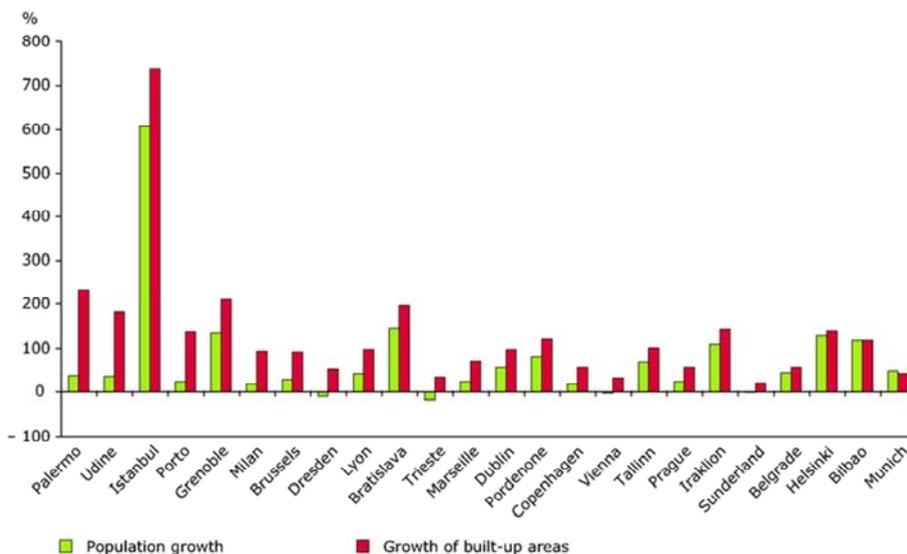


Figura 4 Dispersión Urbana en Europa (EEA, 2012)

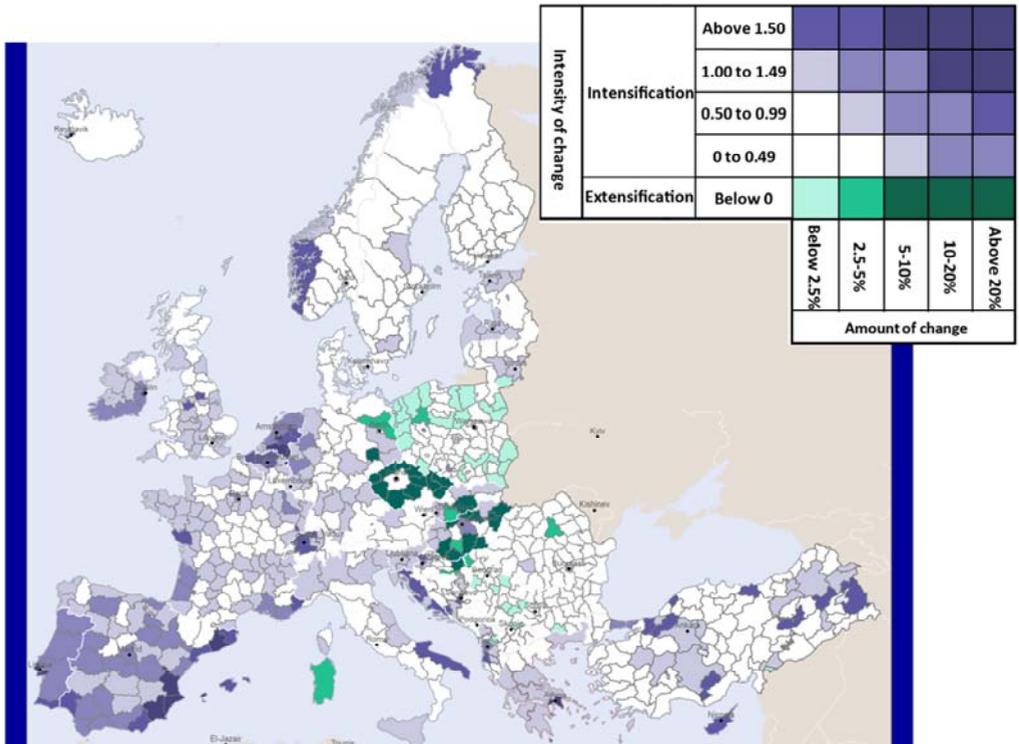


Figura 5 Zonas con mayor cambio de usos del suelo 1990 – 2006 (ESPON, 2012)

Las figuras 1 - 6 describen diferentes facetas de la dispersión urbana. La figura 1 refleja el área metropolitana de Buffalo en 1950 y en el año 2000, mientras que la figura 2 describe la evolución de la población y la superficie urbanizada (Banas, 2010). Se puede ver cómo mientras que la población ha permanecido constante, el área metropolitana se ha triplicado. La figura 3 recoge el mismo fenómeno en el caso de Pittsburg, donde el aumento del área metropolitana es incluso más acusado que en el caso de Buffalo (Carter, 2011). La figura 4 recoge la dispersión urbana producida en diferentes ciudades europeas entre mediados de los años 50 y finales de los 90 (EEA, 2012). La figura 5 refleja las zonas en las que mayores cambios se han producido en los usos del suelo (ESPON, 2012). Por último, la figura 6 refleja la importancia que tiene la dispersión urbana mediante carteles de campañas de concienciación donde se presentan los principales impactos de este problema.

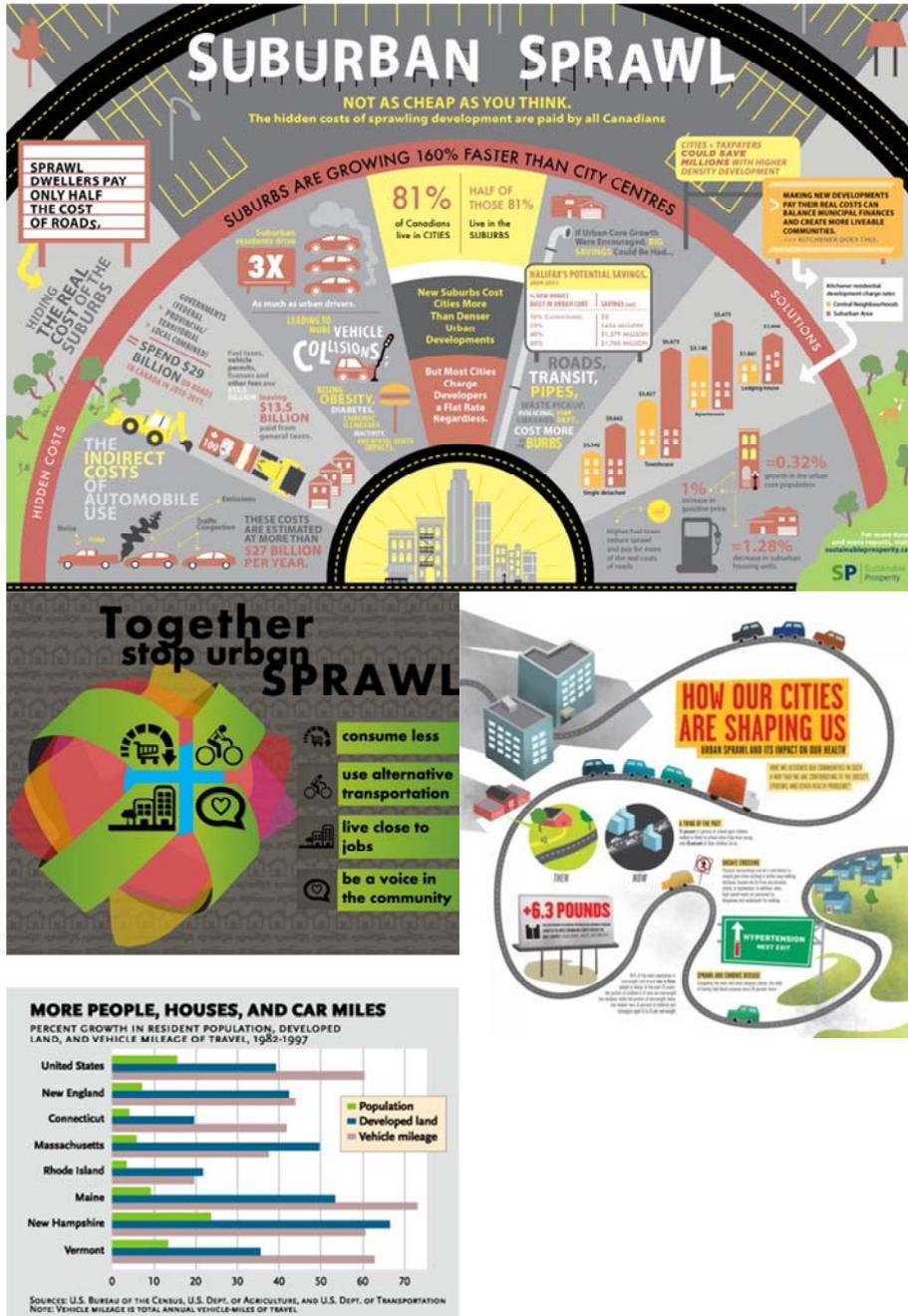


Figura 6 Consecuencias de la dispersión urbana (arriba, Sustainable prosperity, 2013), (centro izquierda, Vanderleest, 2012), (centro derecha, PEW Research, 2013), (abajo, U.S. Government, 2000)

En la movilidad un parámetro fundamental es la distancia entre la ubicación de las personas y sus necesidades de ocio, trabajo y educación. Debido a la forma en la que se han desarrollado las ciudades, la ubicación de las personas en relación con sus necesidades de trabajo, educación y tiempo destinado al ocio no es la mejor (Goldemberg, 1998).

Habitualmente la población con menores ingresos se ubica en la periferia de las ciudades, con menor oferta de servicios públicos, tales como escuelas, centros de salud y transporte público. Esto implica un empleo ineficiente de los recursos públicos. Como segundo problema, los desplazamientos a los lugares de trabajo son mayores, así como el tiempo empleado. En tercer lugar, al aumentar la distancia, también aumenta el coste del transporte, por lo que para las personas dependientes del transporte público los desplazamientos representan un costo muy elevado en tiempo y comodidad. Así mismo, las personas de ingresos más altos con acceso a un automóvil se ubican en el centro de las ciudades. La falta de compatibilidad entre la densidad ocupacional del suelo y la creciente cantidad de viajes de los usuarios ha llevado a la constitución de áreas con gran cantidad de vehículos que, a su vez, causan elevados índices de congestión, como se resume en la figura 7.

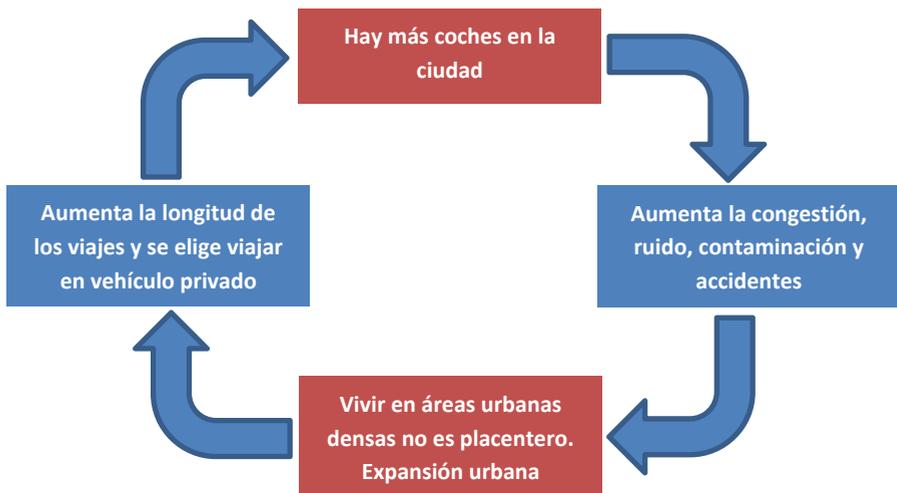


Figura 7 Ciclo del desarrollo urbano de las ciudades

Hay que tener en cuenta que las operaciones de movilidad aumentan con el aumento de ingresos. Las personas en edad activa generan más desplazamientos que los niños y ancianos. La situación laboral también influye, pues las personas con trabajos estables se desplazan más. Además el tipo de medio de transporte usado está muy influenciado por el nivel de ingresos; las personas con ingresos bajos emplean mayoritariamente sistemas de transporte no motorizado y transporte público, mientras que las personas con mayores ingresos emplean mayoritariamente el vehículo privado (Alqueres & Martines, 1999).

La movilidad tiene una componente social, pues los desplazamientos se pueden realizar de modo colectivo o individual. En ambos casos es necesario compartir la infraestructura existente. Esto hace que la movilidad deba estar sujeta a reglas colectivas. Los diferentes medios de transporte emplean de modo muy desigual el espacio, lo que deberá tenerse en cuenta. Se deberá considerar que los medios de transporte individuales motorizados no están al alcance de los ciudadanos con menores ingresos, por lo que hay parte de la infraestructura a la que no pueden acceder. Por tanto, el destinar recursos a la construcción de las vías rápidas de tráfico rodado generará desigualdades, al no poder emplearlas una parte considerable de la población.

El empleo de coches particulares es uno de los retos principales de la movilidad urbana. A pesar de que en las ciudades europeas existen sistemas de transporte público completamente desarrollados, el coche continúa siendo el medio de transporte urbano dominante, representando el 75% aproximadamente de los kilómetros recorridos en las áreas urbanas de la UE. La congestión producida por los coches es tal, que la velocidad media de circulación en hora punta llega a ser inferior a la de la época de los coches de caballos. El uso excesivo de los coches ha causado problemas ambientales y de seguridad, a la par que ha provocado déficit en las inversiones en sistemas de transporte públicos (Holmgren, 2014).

Las ciudades se convierten en centros de actividades, siendo los mayores productores de emisiones de gases de efecto invernadero. El transporte terrestre es un factor clave en la energía consumida, el 19% de la demanda global de energía, y el 23% de las emisiones de CO<sub>2</sub> (Goose & Clarens, 2013). Por ello, cualquier mejora en el transporte es una decisión política crucial pues tiene impacto directo en la sociedad urbana, cambiando los tiempos de viaje y la conectividad urbana. Las figuras 8 - 9 (Alqueres & Martines, 1999; Alcántara, 2010) reflejan el consumo de energía asociado a los principales medios de transporte urbano. La figura 10 (WRI, 2014) representa la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub>, y la figura 11 (EPA, 2009) representa la distribución de las emisiones de GHG asociadas a los diferentes sectores de actividad.

El desarrollo urbano no es sólo determinante en el tráfico, pues también afecta al medioambiente, la salud pública y la sociedad (Creutzig et al., 2012). Las ciudades crecen a un ritmo frenético (Schmidt-Thomé, et. al, 2013) lo que implica retrasos relacionados con el tráfico en casi todos los centros urbanos del mundo, mientras que las emisiones de carbono debidas al transporte terrestre crecen cada vez más.

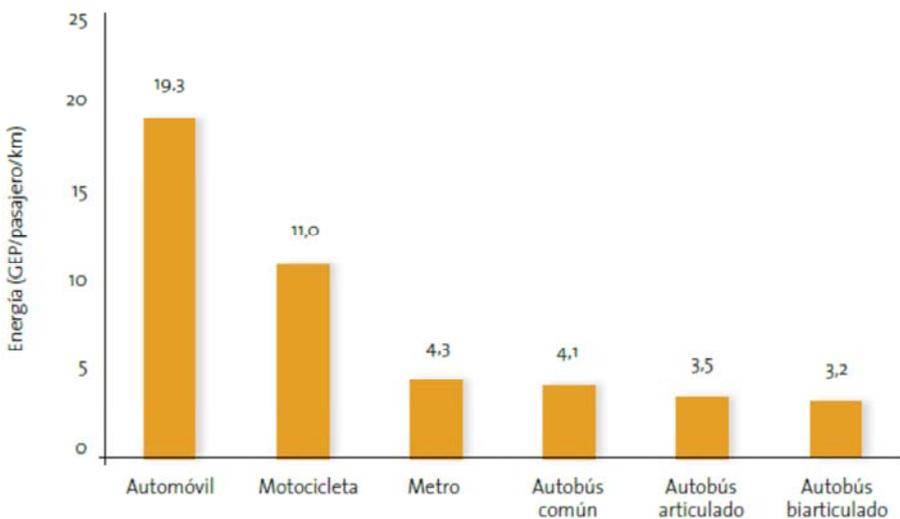


Figura 8 Consumo de energía por modo de transporte con vehículos llenos (Alqueres & Martines, 1999)

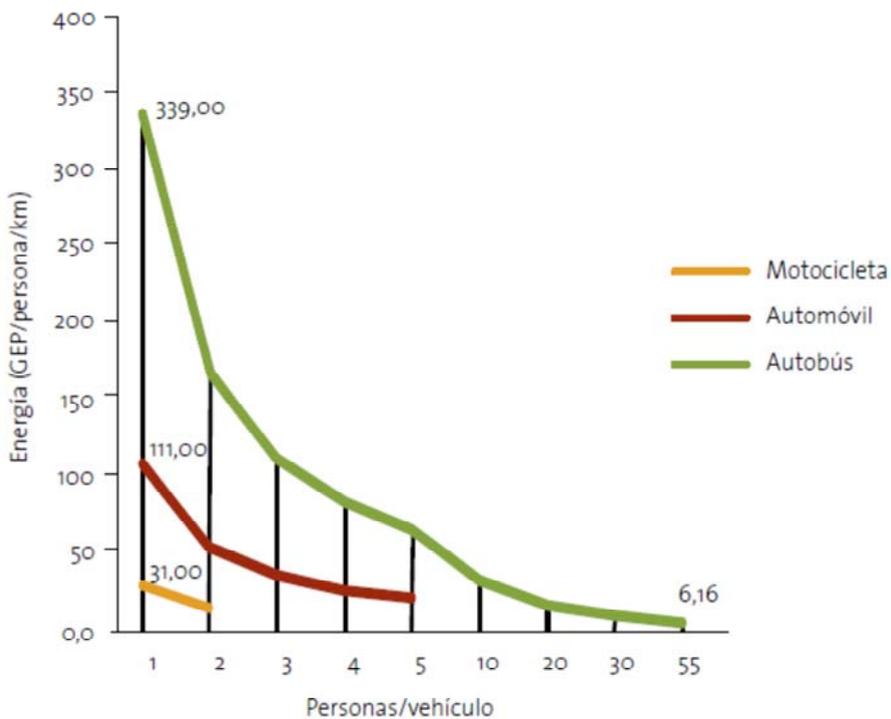


Figura 9 Energía consumida por persona, por modo de transporte (Alcántara, 2010)

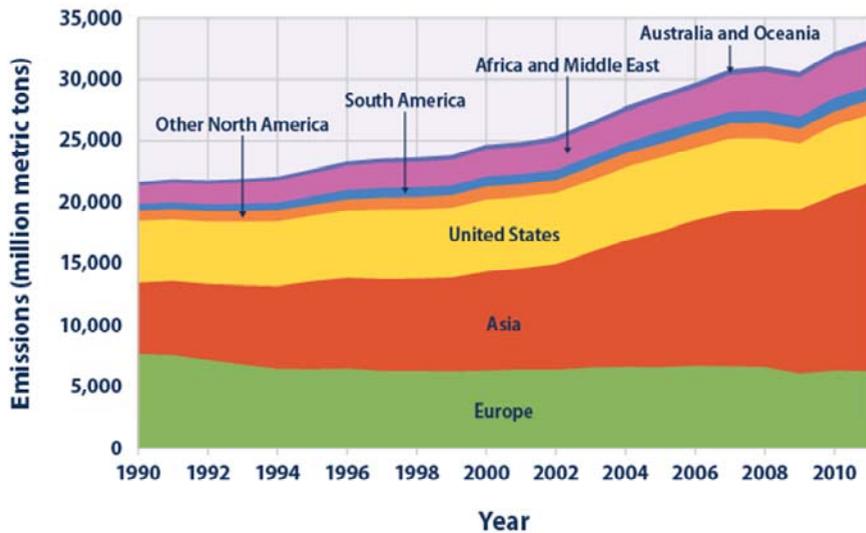


Figura 10 Emisiones de CO<sub>2</sub> por región, 1990 - 2011 (World Resources Institute, 2014)

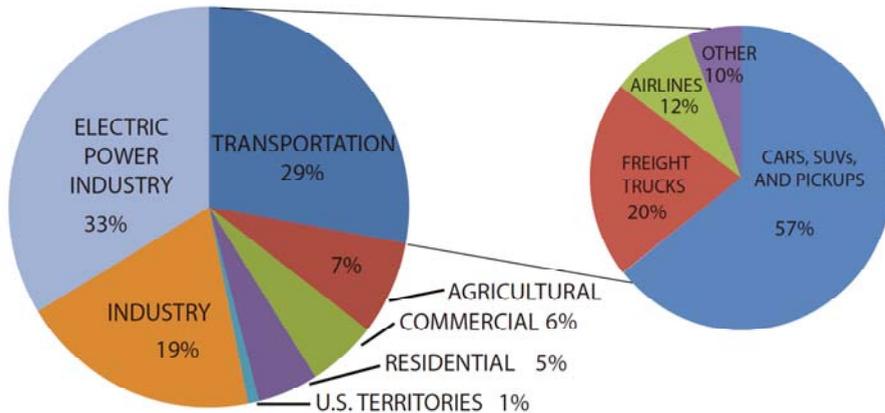


Figura 11 Distribución de las emisiones de GHG en EEUU (EPA, 2009)

La movilidad sostenible se basa en las características del desarrollo sostenible, es decir, el progreso económico, la justicia social, y la preservación del medioambiente. Sin embargo, la actual movilidad urbana no cumple estos requisitos, pues produce impactos por congestión, ruido, contaminación, accidentes, efecto barrera,..., que afectan negativamente a los ciudadanos, el medio ambiente y la economía.

El informe de la Agencia europea de medioambiente (EEA) enfocado en el transporte urbano señaló que más del 74% de la población de la Europa de los 27 vivía en áreas urbanas (EEA, 2013). Según este informe, el 50% de los ciudadanos de la EU estaban expuestos a niveles de ruido de tráfico superiores a 55 dB. Entre 2009 y 2011, hasta el 96% de la población urbana estuvo expuesta a concentraciones de partículas en suspensión ( $PM_{2.5}$ ) superiores a los niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud y hasta el 98% en el caso del  $O_3$ . La EEA estima que la contribución del tráfico urbano en la concentración de  $PM_{10}$  es del 35%, y hasta el 64% en el caso de las concentraciones de  $NO_2$  (EEA, 2012).

El último informe de la EEA relacionado con la calidad del aire en Europa establece que el transporte es el mayor emisor de NO<sub>x</sub>, contabilizando el 46% del total de emisiones en la Europa de los 28 en 2012 (EEA, 2014a). En el mismo informe se indica que las emisiones de CO se han reducido significativamente (61 % de 2003 a 2012) mientras que el nuevo coche vendido en 2013 era casi un 10% más eficiente que en 2010 y que las emisiones de CO<sub>2</sub> se redujeron de 132 g a 127 g entre 2012 y 2013 (EEA, 2014b).

## 1.2 Objetivos de la tesis

Partiendo del contexto expuesto en el apartado anterior, la Unión Europea (UE) aprobó en 2007 un Libro Verde en Movilidad Urbana, *Hacia una nueva cultura para la movilidad urbana* (CEC, 2007). Este documento establece estrategias para luchar contra los problemas indicados en cinco áreas distintas que son: contra la congestión propone andar y las bicicletas y optimizar el uso del coche privado; contra los problemas medioambientales, como la polución y el ruido, propone el uso de nuevas tecnologías, legislación verde y nuevas formas de conducir, también conocidas como conducción ecológica; para mejorar la eficiencia del sistema de transporte indica ideas sobre el uso de sistemas de transporte inteligentes; para mejorar la accesibilidad a las infraestructuras de transporte urbano, sugiere que el transporte colectivo concuerda con las necesidades del ciudadano, el uso de soluciones innovadoras, y la coordinación de los usos del suelo desde una condición acumulativa; y finalmente, mejorar la seguridad del transporte proponiendo un comportamiento más seguro, así como infraestructuras y vehículos más seguros. Uno de los objetivos es la introducción de soluciones tecnológicas, para crear un mercado de vehículos limpios y poco ruidosos. Así mismo, se propone emplear las herramientas de las que dispone la UE, tales como los Fondos Estructurales y el Fondo de Cohesión, para financiar las propuestas para mejorar la movilidad urbana. Otro reto al que se enfrenta la UE es el intercambio de buenas prácticas en materia de movilidad. También se establece como reto el reducir el empleo de combustibles fósiles, mediante innovaciones que permitan aumentar los rendimientos, tales como sistemas de transporte inteligente.

Estas directivas europeas han generado leyes en los estados miembros. *La estrategia española de Movilidad Sostenible* (Gobierno de España, 2009), establece las acciones más importantes que deben efectuarse para desarrollar el sistema de transporte. Esta ley introduce el concepto de Plan Urbano de Movilidad Sostenible, una herramienta que indica las medidas que pueden desarrollarse para mejorar el sistema de

movilidad. Estos planes de movilidad tienen en cuenta todos los medios de transporte simultáneamente, considerando el componente de la sostenibilidad que añade valor al triple resultado, que incluye factores económicos, sociales y medioambientales. Este concepto se conoce en inglés como Triple Bottom Line (TBL). La [figura 12](#) presenta la normativa europea y española (CEC, 2007; Ministerio de fomento, 2009).

Los medios de transporte terrestres, desde andar a los vehículos de motor, se han estudiado históricamente de modo aislado. Escasos ejemplos de análisis multicriterio de modo conjunto se han publicado ([Berritella et al., 2008](#)). Es necesario realizar un estudio conjunto de todos los medios de transporte.

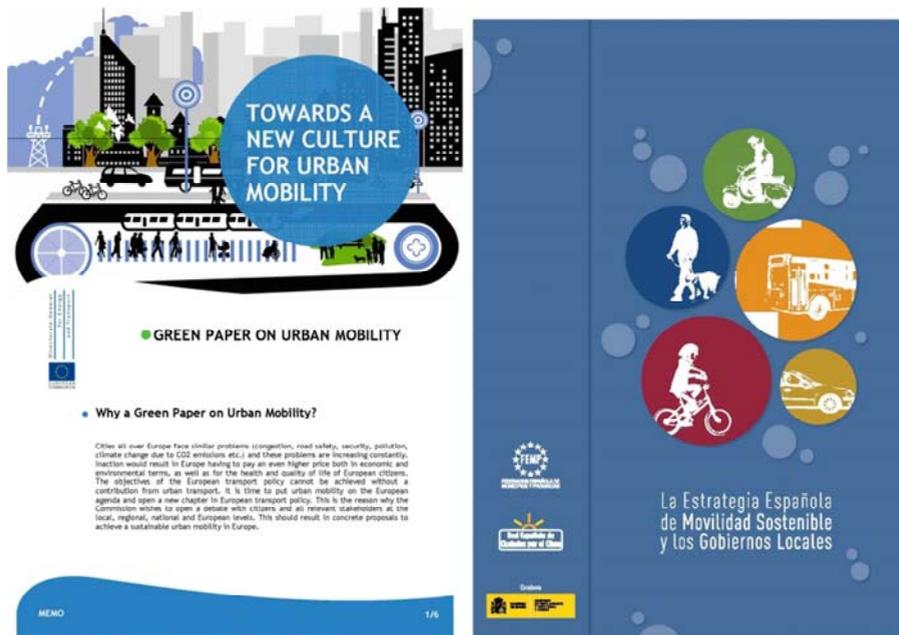


Figura 12 Normativa para alcanzar la movilidad urbana sostenible (CEC y Gobierno de España)

El alcance de este estudio no es el tráfico, es la movilidad. Pero la movilidad es un reto con factores interconectados tales como la economía, la tecnología, sociales y culturales. Tal como se indicó en la

Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo y el Medioambiente (UNCED, 1992), los problemas deben estudiarse a escala local, regional y global. Se debe adoptar un enfoque integrado, que incluya todos los niveles de la administración pública colaborando entre sí.

Un elemento importante del reto es la necesidad de alcanzar el consenso entre diferentes formas de conocimiento y diferentes actores de la ciencia y la política. El punto de vista deber ser múltiple, considerando los conductores de los vehículos a motor así como los pasajeros de los medios de transporte públicos, los ciclistas y los peatones, todos ellos con diferentes necesidades e interés (Katoshevski, Arentze & Timmermans, 2010; Orecchini et al., 2010).

La movilidad sostenible es un problema complejo que debe ser considerado como un todo. Las decisiones deben incluir simultáneamente todos los actores relevantes, con diferentes intereses, algunos de ellos opuestos a los demás, con diferentes criterios que deben ser consensuados. Además, algunos de estos criterios son tangibles, como el coste y el tiempo de viaje, mientras otros son intangibles, tales como el confort y la salud. Un proceso de toma de decisiones estructurado, capaz de trabajar con criterios tangibles e intangibles debe desarrollarse para alcanzar el consenso en la selección del proyecto más idóneo (Martin-Utrillas et al., 2014; Vermote et al., 2014).

El objetivo general de la tesis es obtener un sistema de ayuda a la toma de decisiones que permita analizar diferentes proyectos de movilidad considerando los condicionantes de modo conjunto, combinando criterios tangibles e intangibles. El estudio de los criterios más influyentes en la movilidad, y la relación existente entre los mismos se considera como un objetivo particular del estudio. Otro objetivo que resuelve la tesis a modo particular es el estudio y definición de los proyectos más relevantes que se pueden acometer en la ciudad de Valencia para mejorar la movilidad urbana sostenible.

### 1.3 Estructura de la tesis

Esta tesis doctoral presenta un sistema de ayuda a la toma de decisiones para seleccionar la alternativa óptima en términos de movilidad sostenible. El modelo híbrido propuesto es una integración del método Delphi, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP por sus siglas en inglés), y el método VIKOR.

El primer capítulo describe la situación actual indicando la problemática existente y las necesidades detectadas, así como los objetivos que abarca el documento.

El segundo capítulo describe y desarrolla los objetivos más representativos que conforman la movilidad urbana sostenible. El estudio está sustentado por las referencias obtenidas en foros y revistas tanto nacionales como internacionales.

El tercer capítulo describe y desarrolla las soluciones que se analizarán en detalle comparándolas entre sí para los objetivos descritos en el segundo capítulo. El funcionamiento previsible de estas soluciones está sustentado en soluciones similares empleadas en otras ciudades, cuyo soporte está recogido en la bibliografía.

El cuarto capítulo desarrolla la metodología propuesta, destinándose un apartado a cada uno de los tres métodos que se aplican en la metodología híbrida aplicada.

El quinto capítulo consiste en la aplicación de la metodología propuesta para el caso particular de Valencia. Los conceptos que se integrarán en esta aplicación particular son los descritos en el segundo y en el tercer capítulo.

El sexto capítulo recoge las conclusiones del estudio realizado, así como las líneas futuras de investigación.

El séptimo capítulo recoge las referencias consultadas para la realización de la Tesis.

## **CAPÍTULO 2. OBJETIVOS PARA ALCANZAR LA MOVILIDAD SOSTENIBLE**



## Capítulo 2. Objetivos para alcanzar la movilidad urbana sostenible

En la movilidad urbana intervienen numerosos parámetros de diversa índole, muy variados entre sí, enlazados entre ellos formando un todo. Para el estudio pormenorizado de la movilidad se ha dividido la misma en partes independientes, enlazadas entre sí agrupadas por naturalezas.

### 2.1 Objetivos económicos

El criterio coste hace referencia a la valoración económica de las soluciones propuestas. Al desarrollarse las mejoras se generan consumos o desgastes de una serie de factores productivos.

Este criterio se considera un criterio tangible, pues la valoración económica de las mejoras a la movilidad que se propongan puede realizarse de un modo objetivo. Es un criterio fundamental, pues su presencia ha sido constante en la toma de decisiones (Kim et al., 2015; Malmgren and Mjörnell, 2015). Tal es su importancia que en numerosas ocasiones se han homogenizado el resto de criterios transformándolos en unidades económicas, para poder realizar una comparación con elementos homogéneos (Zahavi, 1976; Hagerstrand, 1970).

A lo largo de la tesis, para la referencia abreviada a los criterios económicos se empleará el acrónimo **E**, procedente de la inicial de ECONOMY (economía en inglés). El valor de la inversión necesaria para la consecución de la mejora de movilidad es considerado como un criterio inexcusable (Martin-Utrillas et al., 2015c). Se descompone en tres subcriterios.

### 2.1.1 Costes iniciales

Se denominan costes iniciales a los costes necesarios para desarrollar la mejora hasta su puesta en funcionamiento. Estos costes sólo se producen una vez a lo largo de la vida útil de la solución. Dependiendo de la mejora a la movilidad propuesta, estos costes varían, pudiendo ser desde nulos hasta muy elevados. Conforme pasan los años se produce desgaste físico y funcional, así como obsolescencia técnica, por lo que a lo largo de la vida útil se produce una pérdida de uso. En la presente tesis la referencia abreviada a este tipo de costes es mediante el acrónimo **INI**, proveniente del inglés INITIAL COSTS.

### 2.1.2 Costes de mantenimiento

Estos costes se producen durante el funcionamiento de las mejoras proyectadas. Al contrario de lo que sucede con los costes iniciales, estos costes se producen de modo recurrente, toda la vida útil de la infraestructura. Estos costes deben estudiarse detalladamente durante la fase de planificación, pues en numerosas ocasiones se han infravalorado o directamente no se han considerado en el estudio de viabilidad de la propuesta. Estos errores han producido sobrecostes en innumerables ocasiones, llegando a provocar, en los casos más extremos, la cancelación con los proyectos inacabados, quedando muchas veces las obras abandonadas, expuestas al deterioro y a la barbarie, como recoge la [figura 13](#) a modo de ejemplo. Estas situaciones, fruto de una mala planificación, son altamente indeseables, pues el dinero invertido en las obras ha servido para generar un nuevo problema, en lugar de generar soluciones. Además, se produce el desasosiego en la ciudadanía, al desconfiar de la valía de los políticos con gestores del dinero público. El acrónimo empleado es **OPE**, proveniente del inglés OPERATION COSTS (costes de funcionamiento).



Figura 13 Lamas abandonadas del Ágora, al fondo, obra inacabada por motivos económicos

### 2.1.3 Costes medioambientales

El coste de las mejoras es la suma de los dos costes introducidos anteriormente, costes iniciales y costes de funcionamiento. Sin embargo, en los últimos tiempos también se tiene en consideración un nuevo concepto denominado costes de la vida útil. Estos costes tienen en consideración el impacto ambiental que se produce por el uso de los recursos naturales. Considera, por ejemplo, el uso de los materiales necesarios para construir vehículos, o los necesarios para pavimentar caminos. También se considera aquí el desecho de materiales, como automóviles viejos, aceites, neumáticos y otros elementos en general, que pueden producir graves impactos ambientales de larga duración. Su importancia se ha mostrado con anterioridad (Chester & Horvath, 2012). En el desarrollo de la tesis nos referiremos a ellos con el acrónimo ENV, procedente del inglés ENVIRONMENTAL (medioambiental).

## 2.2 Objetivos de calidad del viaje

Como calidad del viaje, se engloban los conceptos que comúnmente definen las operaciones de movilidad. Estos subcriterios son el tiempo, el confort, y el coste para el usuario. El criterio de calidad de viaje se representa con el acrónimo **Q**, relacionado con la expresión inglesa TRAVEL QUALITY (calidad de viaje).

### 2.2.1 Tiempo

El tiempo de desplazamiento es un factor clave en la movilidad, que puede ser determinante para algunos actores (Morris & Guerra, 2015; Fosgerau & Lindsey, 2013; Tian & Huang, 2015; He, 2013; Jenelius, 2012; Ermagun & Samimi, 2015). Es un recurso escaso para todos, por lo que disminuir el consumo de tiempo al mínimo posible siempre es el objetivo prioritario para que quienes se desplazan puedan usarlo en la realización de otras actividades. Hay que recordar que los desplazamientos de los ciudadanos se realizan diariamente varias veces, por lo que pequeños ahorros en tiempo, repetidos muchas veces, adquieren gran importancia. Según este criterio, la mejor solución es la más rápida. La [tabla 1](#) (Alcántara, 2010) recoge las velocidades de los modos de transporte empleados en los desplazamientos urbanos. Los modos de transporte no motorizados, tales como andar y la bicicleta son los óptimos para distancias cortas, al no tener tiempos de espera. Sin embargo, para trayectos de más de dos km autobuses y metro son más eficaces que andar. La bicicleta, gracias a su mayor velocidad, y al no verse afectada por el tráfico, puede mantener su competitividad durante trayectos más largos. La [figura 14](#) (CEC, 2000) muestra como el vehículo privado es poco competitivo para desplazamientos urbanos, al verse influenciado por el tráfico. Para considerar los tiempos de viaje debe tenerse en cuenta los periodos de acceso al transporte, que pueden ser muy elevados, principalmente en transporte público con frecuencias bajas.

Tabla 1 Velocidades básicas promedio (Alcántara, 2010).

Modo de transporte	Velocidad (km/h)
A pie	4 a 5
Bicicleta	10 a 15
Autobús	15 a 25
Automóvil	25 a 35
Motocicleta	30 a 35
Metro	30 a 35
Tren	35 a 40

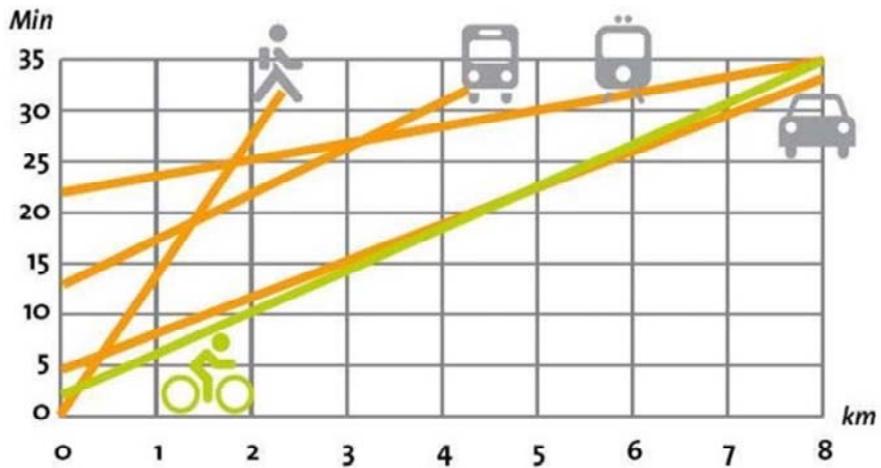


Figura 14 Comparativa de los diferentes modos de transporte (CEC2000)

La figura 15 ([enbicipormadrid.es](http://enbicipormadrid.es), 2013) recoge la combinación de diferentes medios de transporte, considerando los tiempos de desplazamientos, acceso al transporte, y esperas, que suman para contabilizar el tiempo total. Se emplea el acrónimo **TIM** procedente del inglés TIME (tiempo).

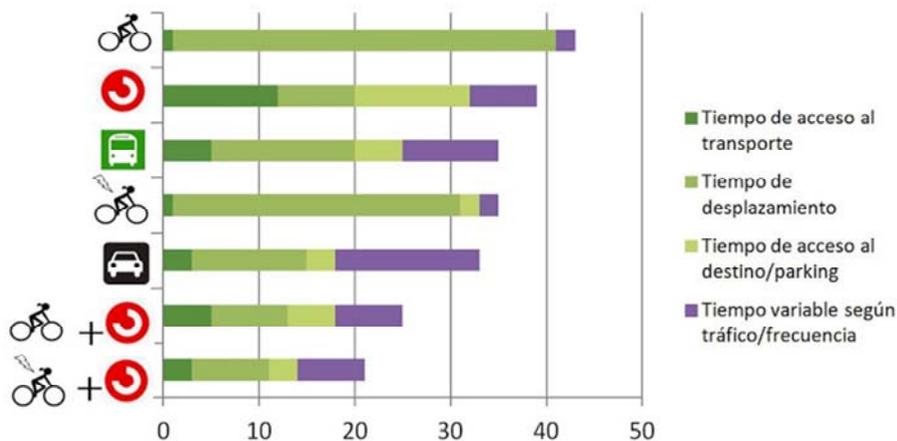


Figura 15 Tiempo de desplazamiento (enbicipormadrid.es, 2013)

### 2.2.2 Confort

El confort es un criterio intangible que depende del viajero. Comúnmente se asocia con la calidad del viaje (Zakaria & Ujang, 2015; Ayachi et al., 2015; Zhang et al., 2014; de Groot & Schuitema, 2012). También se denomina nivel del servicio de transporte. Depende del vehículo utilizado y las condiciones de las vías y la señalización. Para el transporte público, el nivel de servicio depende de una serie de factores visibles para el usuario tales como la ocupación promedio de los vehículos, las posibilidades efectivas de embarque (reflejadas en el tiempo de espera) y la calidad de la señalización y la información disponibles para los usuarios. También se contempla la disponibilidad de lugares para sentarse en los horarios fuera del período punta y por la oferta de espacios cómodos durante el horario punta. Para los peatones, el confort se remite sobre todo a la calidad de las aceras y de los semáforos y otras señales relativas sobre todo al cruce de las vías. En el caso de las bicicletas, la comodidad viene afectada principalmente por las condiciones del pavimento y la señalización. Se emplea el acrónimo **COM** procedente del inglés COMFORT (confort).

### 2.2.3 Coste del viaje para el usuario

Estos costes, también llamados costes de transporte, representan el coste monetario tangible para el usuario, tales como combustible, estacionamiento, tarifas del transporte público, seguros,... Este aspecto es muy importante, pues estos movimientos normalmente son recurrentes (repetidos muchas veces), por lo que una pequeña diferencia en costes puede ser importante en la globalidad (Lu et al., 2015; Loukopoulos et al., 2005). De acuerdo con este criterio, la mejor solución es la más barata. La figura 16 (AVIS, 2012) recoge el coste de combustible por kilómetro para diferentes vehículos motorizados. Se emplea el acrónimo **COS** procedente del inglés TRAVEL COST (coste de viaje).



Figura 16 Coste de la gasolina por kilómetro (céntimos) (AVIS, 2012)

## 2.3 Objetivos de sostenibilidad

Se engloban criterios que cada día ganan importancia en los países desarrollados. Las condiciones ambientales adecuadas demandan bajos niveles de contaminación sonora y ambiental, así como una relación compatible entre el medioambiente y el tráfico. Se consideran los siguientes aspectos:

### 2.3.1 Polución

El empleo de vehículos motorizados conlleva asociados problemas de contaminación en la atmósfera ([Armah et al., 2010](#)). El tráfico urbano causa el 40% de las emisiones de CO<sub>2</sub> y el 70% de las demás emisiones del transporte. Los principales impactos de la contaminación son:

- Presencia de contaminantes que afectan a la salud humana, como el CO, los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y partículas en suspensión.
- Smog fotoquímico, formándose contaminantes secundarios a partir de la presencia de contaminantes primarios emitidos por vehículos. Los principales contaminantes secundarios son el ozono y el peróxido acetil-nitrato (PAN). Tardan horas en formarse, por lo que pueden tener efectos sobre zonas alejadas de donde se emitieron.
- Lluvia ácida, que puede afectar a áreas separadas cientos de km, días después de la emisión de los contaminantes.
- Reducción de la capa de ozono en los polos del planeta.
- Efecto invernadero, principalmente causado por el dióxido de carbono.

Los principales contaminantes emitidos por los medios de transporte son óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, partículas en suspensión, hidrocarburos, monóxido de carbono, dióxido de azufre, plomo, y ozono, considerado contaminante a baja altura. La contaminación atmosférica afecta a todos, independientemente de las condiciones sociales y económicas, aunque la mayoría de las emisiones proviene de los vehículos motorizados, y, dentro de este grupo, de los vehículos individuales, encabezados por el automóvil. Como media el transporte público emite un 95% menos de monóxido de carbono, un 90% menos de compuestos orgánicos volátiles y un 45% menos de dióxido de carbono y de óxido de nitrógeno por pasajero y kilómetro que los vehículos particulares (UITP, 2003). La [figura 17](#) recoge las emisiones de gases efecto invernadero para diferentes medios de transporte (NSW Government, 2014).

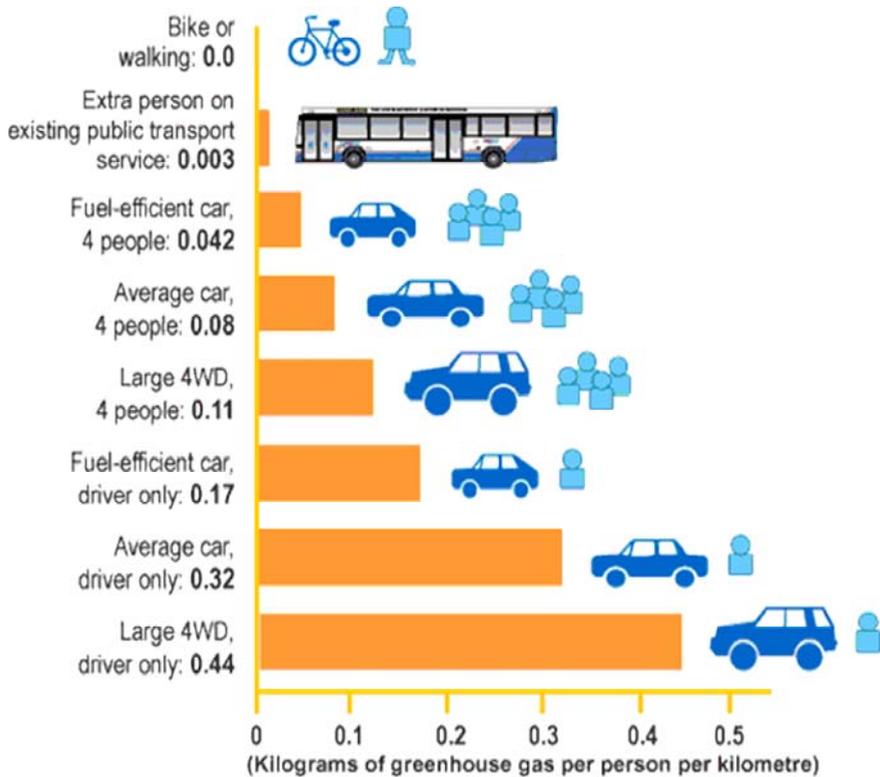


Figura 17 Emisiones de gases efecto invernadero para diferentes medios de transporte (NSW Government, 2014)

La polución tiene impacto directo sobre la salud; por ejemplo, el monóxido de carbono reacciona con la hemoglobina de la sangre produciendo problemas cardíacos y problemas pulmonares crónicos. Los hidrocarburos reaccionan con el dióxido de nitrógeno y causan problemas respiratorios. El dióxido de azufre presente en las partículas en suspensión, puede causar daños graves en personas con bronquitis crónica (Varma et al., 1992). La contaminación atmosférica es un gran problema que se presenta en las ciudades actuales (Chiesa et al., 2014; Yang et al., 2015; Berrittella et al., 2008). El 90% de los ciudadanos europeos que viven en ciudades están expuestos a niveles de polución superiores a los límites establecidos por la Organización mundial de la salud. La figura 18 recoge una presentación gráfica de la exposición de los ciudadanos europeos a los principales contaminantes (EEA, 2013).

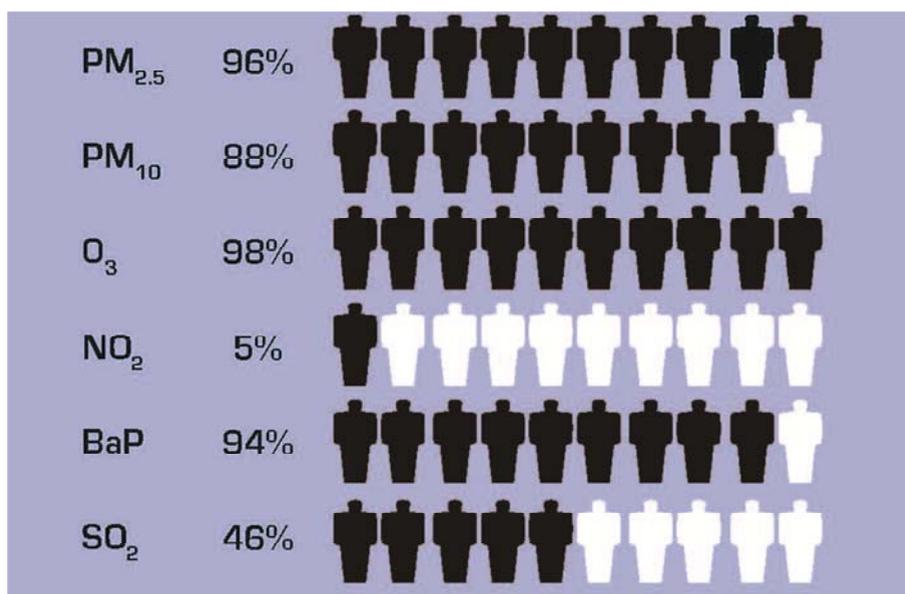


Figura 18 Exposición a la polución (EEA, 2013)

Además de la contaminación local, la polución debida al transporte urbano también afecta directamente al medio ambiente global. El efecto invernadero es uno de los impactos más estudiados debido a sus implicaciones a medio y largo plazo.

El gas que más contribuye al efecto invernadero es el CO<sub>2</sub>, como se aprecia en la [tabla 2](#). La [tabla 3](#) indica la cantidad de CO<sub>2</sub> que emiten los diferentes tipos de combustibles. Sin embargo, la contribución final depende del tiempo de vida en la atmósfera, por lo que los clorofluorocarbonos (CFC) tienen un potencial de calentamiento global hasta siete mil veces mayor que el CO<sub>2</sub>.

**Tabla 2 Contribución relativa de los contaminantes al efecto invernadero (Tolley & Turton, 1995)**

<b>Gas</b>	<b>Contribución (%)</b>
Dióxido de carbono	50
Metano	18
Clorofluorocarbonos	14
Ozono	12
Óxidos de nitrógeno	6

**Tabla 3 Generación de CO<sub>2</sub> por tipo de combustible (Goldemberg, 1998)**

<b>Combustible</b>	<b>CO<sub>2</sub> emitido (kg/litro)</b>
Gasolina	2,4
Gasoil	2,69
Metanol	1,08
Etanol	1,50

Las figuras 19 y 20 indican la evolución de la contaminación por partículas y por NO<sub>2</sub>, respectivamente (Ministerio de Medioambiente, 2006).

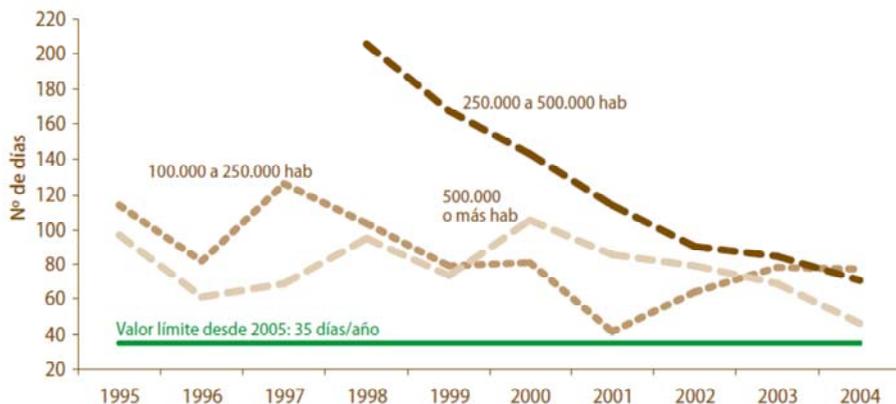


Figura 19 Evolución de la contaminación por partículas (Ministerio de Medio Ambiente, 2006)

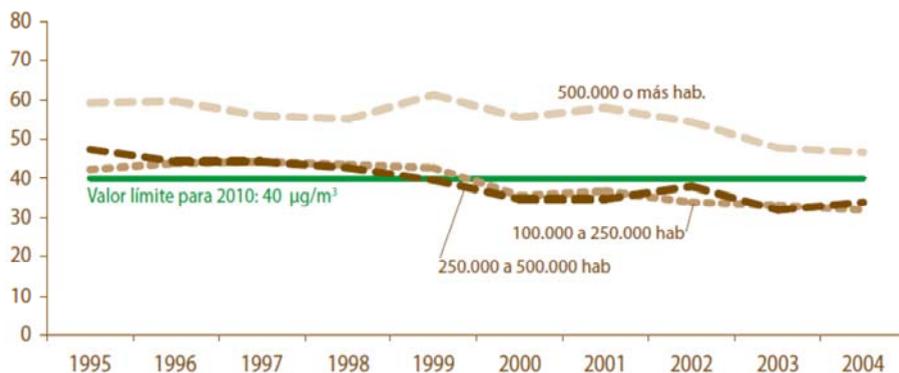


Figura 20 Evolución de la contaminación por NO<sub>2</sub> (Ministerio de Medio Ambiente, 2006)

El volumen de contaminación producido por el funcionamiento de los motores varía en función de la velocidad de los vehículos, como se muestra en las figuras 21 y 22 (Alcántara, 2010).

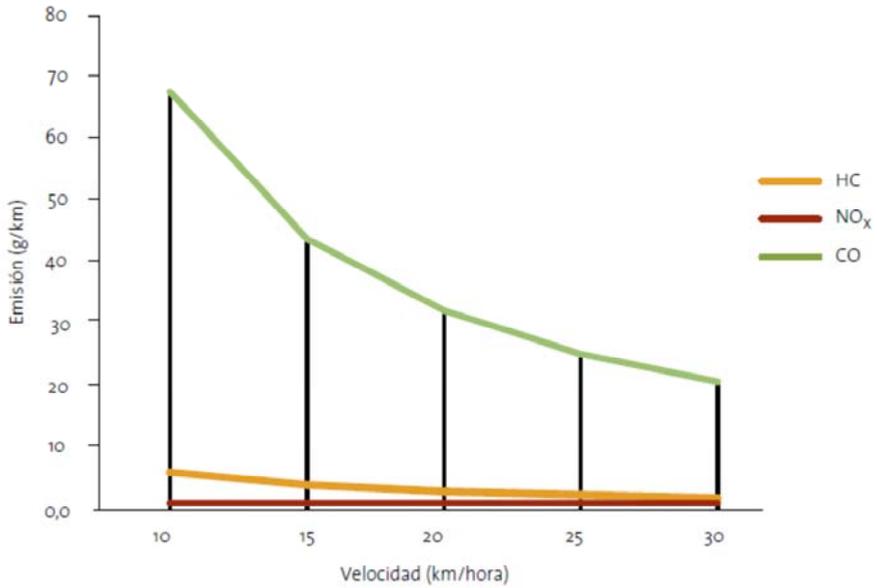


Figura 21 Emisiones producidas por automóviles en relación con la velocidad (Alcántara, 2010)

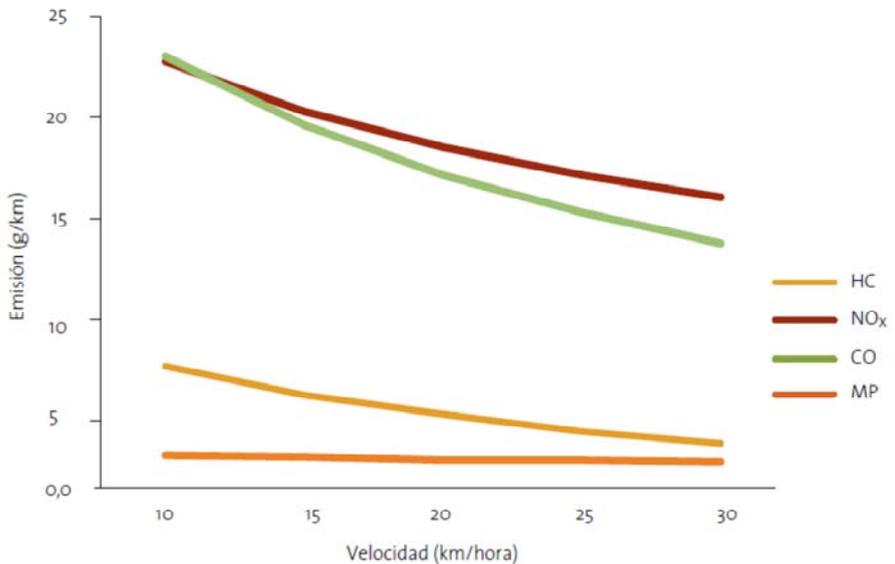


Figura 22 Emisiones producidas por autobús en relación con la velocidad (Alcántara, 2010)

En las referencias a este criterio se empleará el acrónimo **POL** procedente del inglés POLLUTION (polución).

### 2.3.2 Ruido

En la Unión Europea, el 80% del ruido generado en las zonas urbanas es debido al tráfico. Al menos cien millones de personas están expuestas a niveles de ruido por encima de 55dB(A), y otros 40 están sometidos a niveles superiores a 65 dB(A), límite a partir del cual se considera gravemente perjudicial. En España se estima que un 74% de la población se encuentra afectada, y un 23% sometida a niveles superiores a los admisibles establecidos por la OMS. La [figura 23](#) refleja gráficamente esta circunstancia para diversas capitales europeas ([EEA, 2013](#)). España es uno de los países más ruidosos del mundo, segundo en el ranking después de Japón. Dos de cada tres residentes en ciudades españolas medias o grandes viven en ambientes sonoros considerados generalmente como inaceptables ([García & Garrido, 2003](#)).



**Figura 23** Exposición nocturna al ruido del tráfico (EEA, 2013)

Aunque la percepción del ruido sea algo subjetivo y en nuestro país exista tolerancia social, las repercusiones sobre la salud y la vida de los ciudadanos son reales. El efecto del ruido en la salud es función del nivel de exposición, y afecta a las actividades básicas, como dormir y descansar, y puede afectar a la concentración y la productividad así como causar tensiones nocivas a la salud. En casos extremos puede provocar problemas en la audición, estrés e insomnio ([Miller y Moffet,](#)

1993). La [tabla 4](#) resume los efectos nocivos del ruido, su umbral, y los relaciona con situaciones que se producen en las ciudades ([T & E, 2008](#)).

La importancia del ruido se ha considerado extensamente. Es un problema de las ciudades actuales, muy estudiado ([Sheng & Wa, 2011](#); [Urban & Vojtech, 2013](#)), con leyes específicas a nivel europeo ([Comisión Europea, 2002](#)).

**Tabla 4 Efectos del ruido (T & E, 2008)**

Umbral	Inicio efectos	Referencia en ciudad	Nivel dB(A)
45	Probable interrupción del sueño	Aire acondicionado (exterior)	45
50	Malestar diurno Moderado	Calle urbana tranquila	50
55	Malestar diurno importante	Interior de coche	60
65	Conversación muy difícil	Calle tráfico normal	70
		Metro	80
75	Pérdida de oído a largo plazo	Camión arrancado a 10 m	95
		Moto acelerando	90
		Coche a 100 km/h	100
110 - 140	Pérdida de oído a corto plazo	Moto a escape libre	110

El ruido del tráfico es debido al funcionamiento del motor y al rozamiento de las ruedas con el pavimento. En ciudad, donde la velocidad está limitada, la fuente principal es el funcionamiento del motor. El ruido que se genera es muy dispar, dependiendo de numerosos factores, tales como el tipo de calzada y el estado de conservación de la misma, así como el estado de los vehículos. El tranvía genera 46 veces menos ruido que los coches y los autobuses 11 veces menos que el número equivalente de automóviles. En las principales capitales se ha elaborado extensa documentación como mapas de ruido, que identifican las zonas más expuestas. Las [figuras 24 y 25](#) están extraídas del mapa del ruido de Valencia del año 2012 ([Ayuntamiento de Valencia, 2012](#)).

Para referirnos a este subcriterio emplearemos el acrónimo **NOI** procedente del inglés NOISE (ruido).

## 2.- OBJETIVOS PARA ALCANZAR LA MOVILIDAD SOSTENIBLE

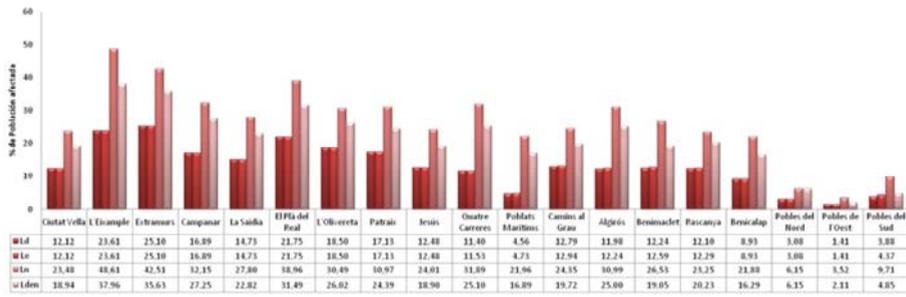


Figura 24 Porcentaje de población de Valencia afectada por el ruido dividida por distritos (Ayuntamiento de Valencia, 2012)

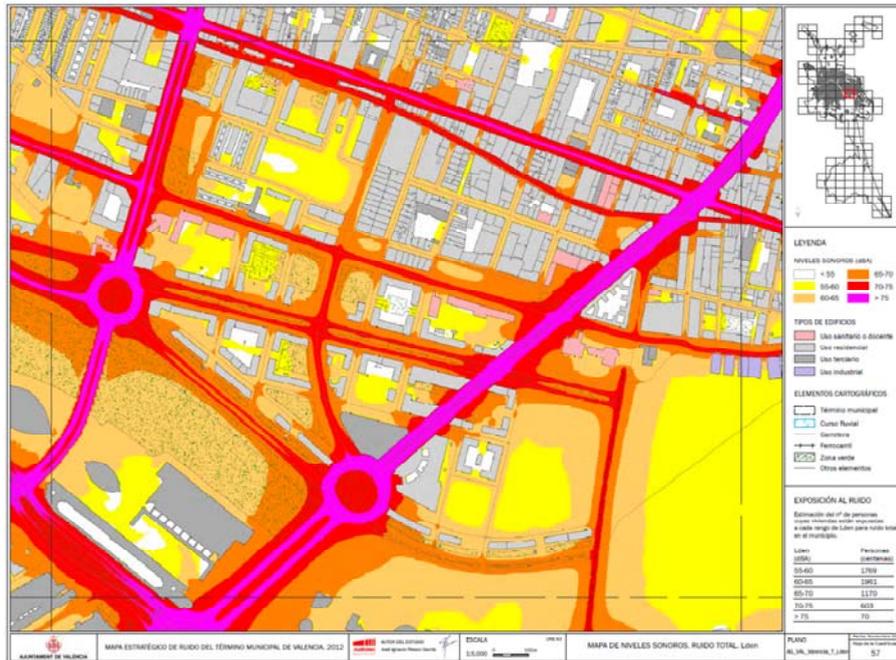


Figura 25 Hoja del mapa de ruido de Valencia (Ayuntamiento de Valencia, 2012)

### 2.3.3 Huella de carbono

Este factor está cobrando importancia en los últimos años. Es la totalidad de gases efecto invernadero emitidos de modo directo o indirecto por las personas, organizaciones o productos. Para medir el impacto de la huella de carbono, se realiza un análisis normalizado de ciclo de vida, midiéndose la huella de carbono como masa de CO<sub>2</sub> equivalente. Un esquema del ciclo de vida se recoge en la [figura 26](#).

Está relacionado con el impacto general de las actividades sobre el medioambiente ([Minx et al, 2013](#); [Creutzig et al., 2012](#)). Este impacto se obtiene calculando las emisiones directas (operación) y las indirectas (producción, stock, transporte hacia los distribuidores finales); la [figura 27](#) representa la relación entre emisiones directas e indirectas para diferentes medios de transporte ([Maibach et al., 1997](#)). En inglés se emplea la expresión *“from well to wheels”*, haciendo referencia al ciclo total del petróleo, desde su extracción de los pozos hasta su uso en los vehículos. La importancia de este tipo de cálculo está relacionada con la estrategia elegida en la política energética de cada país, en la que debe analizarse qué tipo de energía será incentivada al uso.

En las tablas la referencia a este subcriterio se realiza mediante el acrónimo **CAF** procedente del inglés CARBON FOOTPRINT (huella de carbono).



Figura 26 Elementos a considerar en el proceso de producción

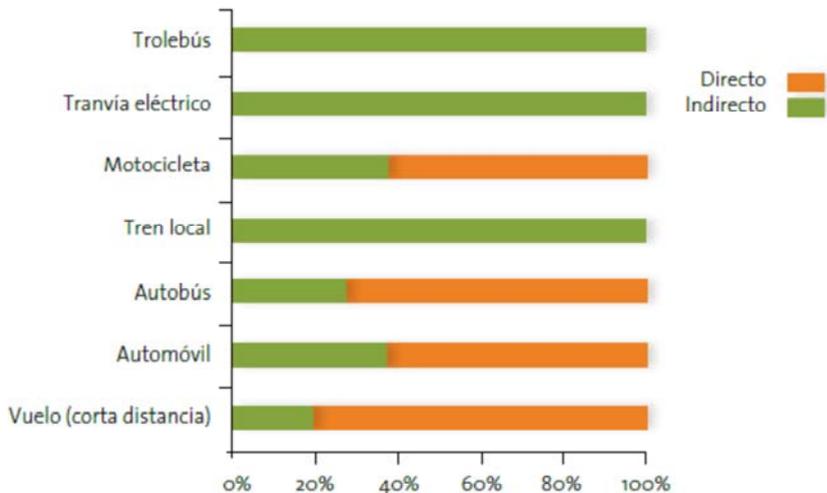


Figura 27 Potencial de producción de gases efecto invernadero (Maibach et al., 1997)

### 2.3.4 Beneficios para la salud

Algunos medios de transporte tienen ventajas para la salud sobre otros (De Hartog et al., 2010; Rojas Rueda et al., 2011). Desplazarse a pie o en bicicleta es muy saludable para el bienestar de los ciudadanos, pues 30 minutos al día (3 km a pie y 9 km en bicicleta), de actividad física se consideran suficientes para una buena salud. Estas distancias son del mismo orden de magnitud que los desplazamientos cotidianos en coche en áreas urbanas.

En las tablas emplearemos el acrónimo **HEA** procedente del inglés HEALTH (salud) para referirnos a este subcriterio.

## 2.4 Otros criterios

Se incluyen a continuación otros objetivos que persigue la movilidad sostenible, que, aunque en el caso concreto estudiado en esta tesis no han sido tan influyentes como los introducidos anteriormente, pueden ser determinantes en otros casos de estudio, por lo que se estima conveniente introducirlos a continuación.

### 2.4.1 Consumo de espacio

El sistema de transporte necesita espacio para desarrollarse. Por un lado, se necesita espacio para las infraestructuras construidas, como calles, aceras, vías, carriles bici, paradas de autobús, aparcamientos, etc. y también se consume espacio con el uso de las infraestructuras de transporte. No hay que considerar únicamente el espacio ocupado por la red viaria, sino también el que ocupan las instalaciones complementarias, tales como estaciones, aeropuertos, gasolineras, etc. Además también hay que considerar el espacio necesario para el estacionamiento de los diferentes vehículos.

Es importante el estudio del uso del espacio vial. Se divide el uso del espacio en dos categorías: en movimiento y estacionado. El espacio ocupado por una persona en movimiento depende del modo de transporte, su velocidad y el tiempo que permanece parado, en el caso de un vehículo particular. El medio de transporte que más espacio requiere es el automóvil, que consume 30 veces más área que un autobús y 5 veces más que una bicicleta.

El espacio consumido depende del vehículo utilizado y a la cantidad de personas que circulan dentro del mismo. El espacio público es un bien escaso, por lo que es fundamental un empleo racional del mismo. Se desprende por tanto que los modos de transporte públicos son los que más eficazmente gestionan el espacio viario. La [figura 28](#) presenta el espacio que consumen diferentes tipos de vehículos ([Alcántara, 2010](#)).

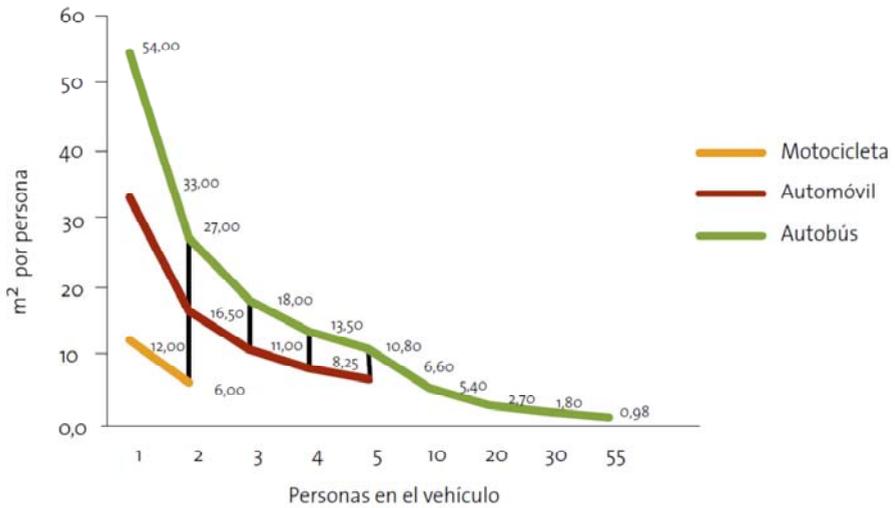


Figura 28 Espacio viario consumido por persona según modo de transporte (Alcántara, 2010)

Además del espacio en circulación, debe considerarse el espacio que ocupan los vehículos cuando están estacionados. Los automóviles están estacionados gran parte del día. Principalmente el estacionamiento se realiza en la trama viaria de la ciudad, por lo que se están empleando recursos públicos para satisfacer demandas individuales. La [tabla 5](#) recoge el espacio que consumen los diferentes vehículos, tanto en circulación como cuando están estacionados (Alcántara 2010).

Tabla 5 Espacio necesario por modo de transporte (Alcántara 2010)

Modo	Estacionamiento m <sup>2</sup> /h	Circulación m <sup>2</sup> /h	Total m <sup>2</sup> /h
Autobús	< 0,5	3	3,5
Bicicleta	12	8	20
Automóvil	72	18	90

### 2.4.2 Efecto barrera

Cuando el sistema de transporte de las ciudades se polariza hacia el transporte motorizado individual se generan impactos negativos a nivel socio-cultural. Los otros medios de transporte quedan relegados a un papel secundario, debiendo adaptarse a situaciones inadecuadas. Se entiende que se produce efecto barrera cuando el tráfico impide la interacción social y el desarrollo de los medios de transporte no motorizados. El transporte motorizado influye notablemente en la reorganización de las ciudades.

Actualmente los ciudadanos se dividen entre los que disponen de acceso al automóvil y quiénes no. Estos últimos se ven perjudicados por el deterioro de los servicios locales, incapaces de competir con los espacios orientados a los conductores. Conforme el espacio se adapta a los conductores, se crean zonas incapaces de satisfacer las necesidades de quienes no tienen acceso al vehículo propio. Se generan vías rápidas que expulsan a los peatones, pues el tráfico es demasiado peligroso, y andar se convierte en una actividad desagradable.

El impacto del efecto barrera se puede clasificar en tres niveles:

- Primario: los problemas para desplazarse hacen que se reduzca el número de desplazamientos cortos, aumentando la distancia de los recorridos y el peligro de accidentes.
- Secundario: se generan cambios en el espacio como consecuencia de la separación de las comunidades y la reducción de las relaciones sociales y los desplazamientos.
- Terciario: se cambia la funcionalidad del espacio debido a los cambios producidos en su uso.

### 2.4.3 Siniestralidad

Los accidentes de tráfico son un gran problema, asociado al impacto producido por el uso del automóvil. Este problema comenzó a tener entidad en Estados Unidos en las primeras décadas del siglo XX, y en Europa y Japón después de la Segunda guerra Mundial, coincidiendo con el crecimiento del uso del automóvil.

Los accidentes de tráfico están considerados como un grave problema a la salud pública, siendo la principal causa de fallecimiento entre los hombres de 15 a 44 años, siendo el coste de estos accidentes una cifra relevante del PIB de los países desarrollados.

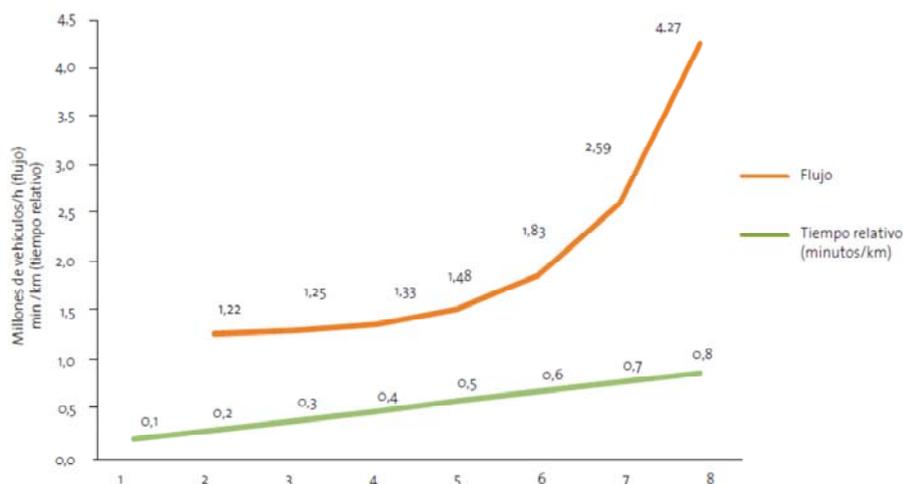
Cada medio de transporte tiene un riesgo intrínseco diferente a los demás. El riesgo aumenta para los modos más vulnerables. Por ejemplo, los peatones están indefensos frente a los vehículos motorizados en caso de accidente. Lo mismo ocurre con la bicicleta, agravado por el hecho de que los choques ocurren a mayor velocidad. Por la misma razón las motocicletas son especialmente vulnerables, al alcanzar velocidades similares a los automóviles, pero sin la protección que ofrecen éstos. Los vehículos motorizados son mucho más peligrosos para la seguridad, debido a su mayor potencial para causar daños. El número de muertes y el número de automóviles en un país están directamente relacionados. El riesgo de los diferentes medios de transporte se encuentra recogido en la [tabla 6](#).

**Tabla 6 Riesgo de los medios de transporte en Europa (WHO, 2004)**

<b>Modo</b>	<b>Muertes/ 100 millones pasajero·km</b>	<b>Índice relativo respecto al tren</b>	<b>Índice relativo respecto al autobús</b>
<b>Moto</b>	13,800	394	197
<b>A pie</b>	6,400	183	91
<b>Bicicleta</b>	5,400	154	77
<b>Automóvil</b>	0,700	20	10
<b>Autobús</b>	0,070	2	1
<b>Tren - Metro</b>	0,035	1	0,5

### 2.4.4 Congestión

Se puede definir la congestión con el desfase del tiempo realmente empleado en la circulación en comparación con el tiempo de circulación en condiciones ideales. La velocidad de circulación y la densidad de vehículos están íntimamente relacionadas. Conforme aumenta la densidad y se acerca a la capacidad de la vía, el tráfico se vuelve inestable, llegando a colapsar. Se puede decir que existe congestión cuando el flujo de vehículos alcanza al 70% de la capacidad de la vía. La [figura 29](#) representa la relación entre el flujo y el aumento en el tiempo de recorrido ([Mayres et al., 1996](#)).



**Figura 29** Relación entre el flujo en la vía y el tiempo de recorrido ([Mayres et al., 1996](#))

La congestión es un problema con efectos en varios aspectos ([Vermote et al., 2014](#); [Firnkorn & Müller, 2015](#); [EEA, 2013](#)). Influye en el tiempo, el confort, el coste del viaje, la polución y el ruido, por lo que las respuestas de los panelistas se han realizado considerando la influencia de la congestión. El método AHP requiere enfrentar conceptos individuales, por lo que la congestión, como parte de varios problemas, debe estudiarse de un modo descompuesto.

# **CAPÍTULO 3. ALTERNATIVAS PARA ALCANZAR LA MOVILIDAD SOSTENIBLE**



## Capítulo 3. Alternativas para alcanzar la movilidad sostenible

Existen múltiples alternativas para mejorar la movilidad en las ciudades; el empleo combinado de estas soluciones permitirá mejorar la calidad de vida de los ciudadanos. En primer lugar se indican las medidas que permiten reducir la contaminación sin que sea necesario cambiar los hábitos de uso. Gracias al desarrollo tecnológico y a la reducción del peso de los vehículos se ha mejorado la eficiencia en el consumo, como se aprecia en la [figura 30](#) y en las emisiones de contaminantes, principalmente en los vehículos diésel, unido al empleo de catalizadores y filtros, que también han contribuido a disminuir la emisión de contaminantes ([Casanova, 2005](#)).

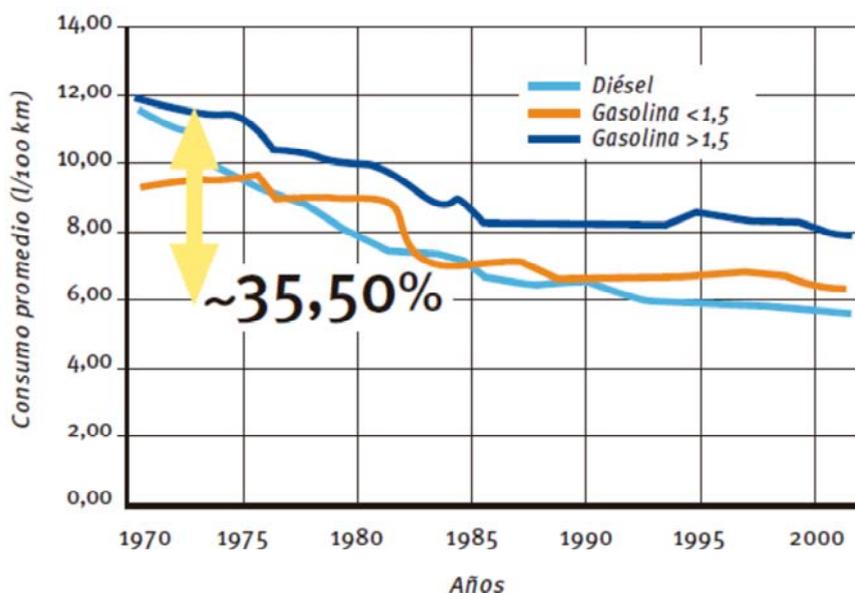


Figura 30 Evolución del consumo promedio (Casanova, 2005)

Además de la reducción de contaminación de los sistemas de propulsión convencional, existen vehículos que sustituyen los combustibles fósiles por biocombustibles como bioalcoholes o biodiesel, mucho más respetuosos con el medioambiente.

Mención aparte merecen los coches híbridos y eléctricos, que integran la propulsión eléctrica, mejorando aún más la eficiencia y el impacto ambiental. La [figura 31](#) incluye un esquema del funcionamiento de ambos tipos de vehículos. La [figura 32](#) es una imagen del Renault Twizy, vehículo 100% eléctrico, diseñado para la circulación urbana ([REVE, 2012](#)).

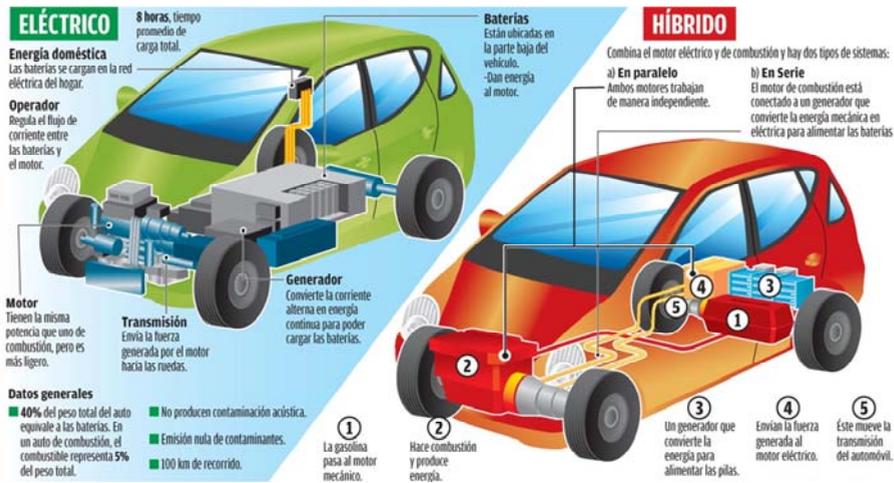


Figura 31 Funcionamiento de los vehículos híbridos y eléctricos (Mauricio Ledesma)



Figura 32 Renault Twizy, vehículo 100% eléctrico (Reve, 2012)

En la actualidad existe un abuso del empleo de los desplazamientos mediante vehículos privados. El índice de motorización de Valencia en 2011 era de 468 turismos cada 1000 habitantes. El empleo de estos vehículos es en muchas ocasiones ineficiente, pues en la mayoría de desplazamientos tienen una ocupación muy escasa, como por ejemplo al trabajo, mientras que en otras ocasiones, como en viajes o mudanzas, resultan pequeños. El carsharing puede solucionar este problema; es una modalidad en la que varios usuarios comparten los vehículos, normalmente a través de una empresa de alquiler, pudiendo emplear en cualquier momento y lugar el tipo de vehículo deseado, por el tiempo que necesiten. Esta alternativa consigue un uso más racional del coche y supone ahorros individuales y sociales en los costes de transporte.

Otro sistema en auge es el viaje compartido en coche (también conocido como carpooling) que consiste en coordinar a los empleados que vivan cerca para que acudan juntos al trabajo empleando un sólo automóvil. Se reduce así el número de vehículos en circulación, reduciéndose el coste del transporte al repartirse los gastos. Con el desarrollo de internet y las redes sociales este sistema se emplea también entre desconocidos que quieren compartir gastos en sus desplazamientos. La [figura 33](#) recoge datos de este sistema de viajes compartidos ([Carpooling, 2015](#)).

Otras alternativas empleadas en la actualidad son políticas de gestión de la demanda, que combinan el estímulo y la disuasión, llamadas en inglés "*push and pull*". Estas políticas penalizan el uso de ciertos modos de transporte, habitualmente el coche (push), mientras que hacen más atractivos otros modos de transporte mediante incentivos y mejoras (pull). Las más habituales consisten en restringir ciertas áreas de la ciudad al vehículo privado, o el empleo del estacionamiento con tiempo limitado. A continuación se desarrollan las mejoras a la movilidad mejor valoradas por el panel de expertos.



Figura 33 Perfil de los usuarios de los sistemas de "Carpooling" (Carpooling, 2015)

### 3.1 Modos de transporte no motorizados

Los modos de transporte no motorizados son aquellos que sólo requieren energía de tipo biológico. Son, por tanto, los más respetuosos con el medio ambiente al no presentar prácticamente impactos negativos. Además, como valor añadido, son beneficiosos para la salud de las personas que los emplean. Entre los modos no motorizados se encuentran los desplazamientos realizados a pie o en bicicleta.

#### 3.1.1 Peatonalización del centro urbano

Históricamente andar ha sido un sistema de movilidad infravalorado y marginado en las políticas de transporte, urbanismo y seguridad vial. Esto ha tenido como resultado modelos de ciudad “hostiles” para los peatones, con el agravante que es uno de los medios principales de la movilidad en la ciudad. El método AHP se ha empleado con anterioridad para evaluar los niveles de satisfacción de los peatones (Zainol et al., 2014). Fomentar los desplazamientos a pie es una de las mejoras alternativas al transporte motorizado. Andar está considerado como el modo de transporte más empleado, al mismo tiempo que es el método más barato y con más beneficios para la salud, como se muestra en la figura 34.



Figura 34 Beneficios sobre el organismo que se producen al andar

La peatonalización es una medida extendida en los centros históricos de numerosas ciudades; permite preservarlos del deterioro producido por el tráfico rodado. Políticas con restricciones al tráfico se han desarrollado con éxito previamente, por ejemplo en Londres y en Estocolmo. En Londres se instauró un sistema de peaje urbano, por el que se efectúa un pago por acceder a la ciudad en vehículo privado. En la [figura 35](#) se muestra el área de actuación de esta medida ([Transport for London, 2011](#)). Esta medida puede venir impuesta por una necesidad de preservar el medio ambiente urbano, o por la necesidad de reducir la congestión en la zona centro. Estas acciones se tradujeron en un descenso del 30% de la congestión, mejorando la fluidez del tráfico. En Estocolmo se realizó una prueba de un año, en el cual el tráfico se redujo hasta un 15% en hora punta, aumentó un 4% el empleo de medios de transporte público, y los accidentes de tráfico se redujeron hasta un 10%. Como contrapartida, se debe tener en cuenta el efecto que puede producir sobre el comercio local la prohibición del acceso a los centros urbanos. El promocionar el andar consigue un entorno libre de gases emisores de carbono, a la vez que se consigue un paisaje más amigable.

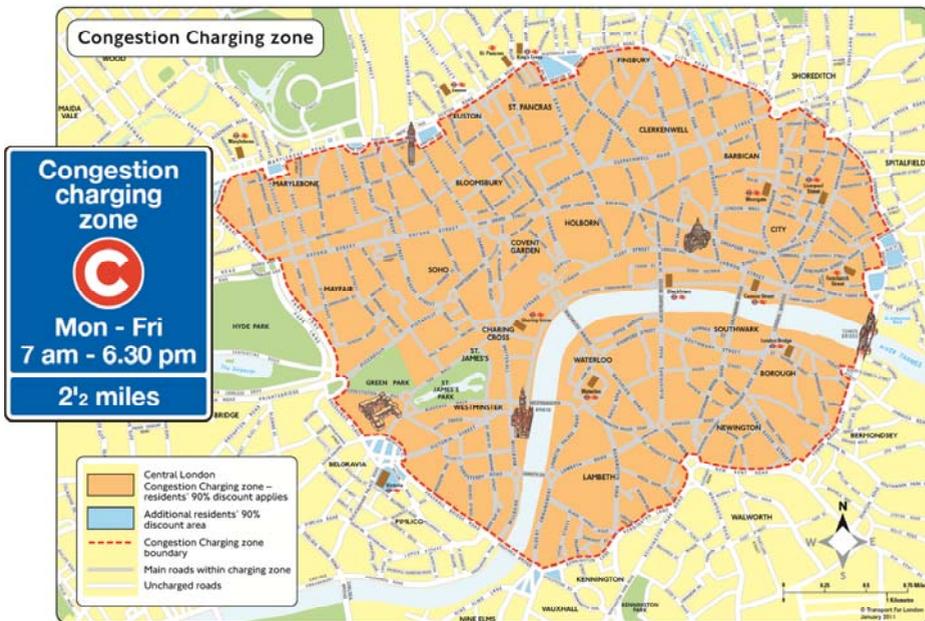


Figura 35 Zona de Londres con tráfico restringido (Transport for London, 2011)

En la actualidad parte del centro histórico se ha peatonalizado, como por ejemplo la Plaza del patriarca (figura 36), pero existen numerosas calles en las que no existen restricciones al tráfico. El caso más sintomático es el de la Lonja de la Seda, edificio declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, y que sufre el deterioro producido por el tráfico pesado que circula diariamente por su delante de su fachada principal (figura 37).



Figura 36 Plaza del Patriarca

La solución propuesta prohíbe el tráfico con vehículos privados en el centro de la ciudad, permitiendo únicamente el paso al transporte público, bicicletas, peatones y mercancías; el área de actuación de esta medida se muestra en la figura 38. En las tablas se empleará el acrónimo **WAL** procedente del inglés WALKING (andar) para referirnos a esta mejora propuesta.



Figura 37 Vial de gran capacidad frente a la Lonja de la Seda

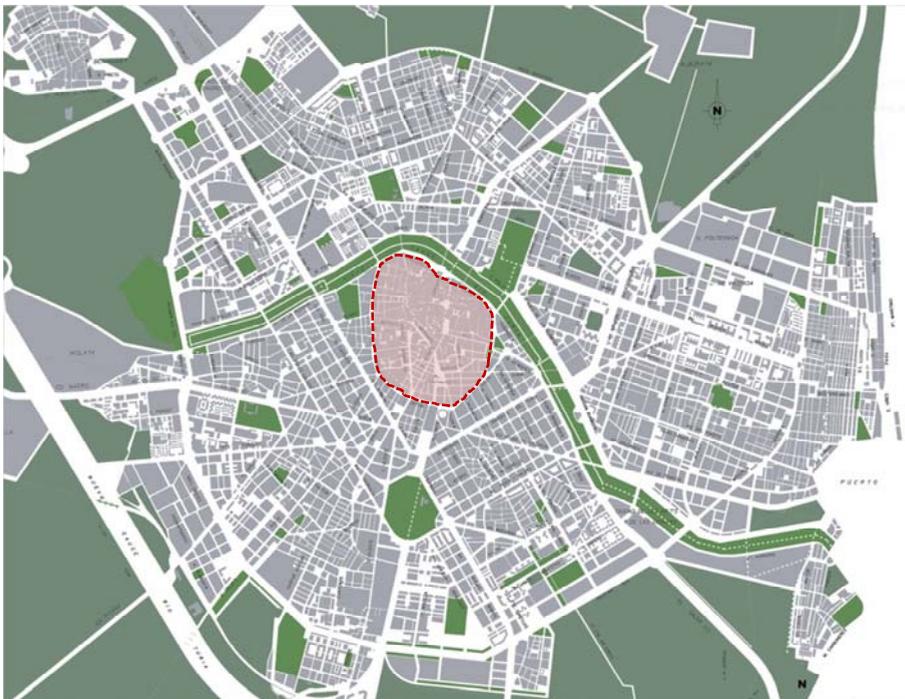


Figura 38 Área de actuación de la peatonalización del centro urbano

### 3.1.2 Mejora de la red de carriles bici

La bicicleta tiene enormes ventajas en comparación con otros medios de transporte. Además, constituye una alternativa real al vehículo privado en distancias medias, que son la mayor parte de los desplazamientos urbanos. La bicicleta tiene un bajo coste de compra y mantenimiento, y no existen pérdidas de tiempo en atascos. El transporte por bicicleta es una forma eficaz de prevenir la obesidad y otro tipo de enfermedades relacionadas con escasa actividad física. En la [figura 39](#) se muestran diversos beneficios asociados al uso de la bicicleta. Para la ciudad presenta múltiples beneficios al ser un medio de transporte no contaminante, silencioso, y con poca ocupación de superficie urbana.



Figura 39 Beneficios de la bicicleta sobre la salud (lemi.com.mx)

En países como Holanda, Dinamarca o Alemania, el peso de este modo de transporte es del 28, el 20 y el 12%. Sin embargo, en España la movilidad en bicicleta está poco consolidada. Esto es debido en parte a la escasez de infraestructuras, debido principalmente a la falta de espacio para las mismas. Además, el compartir la calzada representa un problema de seguridad para el ciclista, debido a la vulnerabilidad del ciclista frente a colisiones con otros vehículos, que suponen el 72% de los accidentes de ciclistas en área urbana. La educación es primordial, pues en los países con mayor implantación de la bicicleta se adquiere el hábito en etapas tempranas. Cada año este medio de transporte aumenta. Se han realizado varios estudios relacionados con la movilidad en bicicleta (Wahlgren & Schantz, 2014; Ragetti et al., 2014).

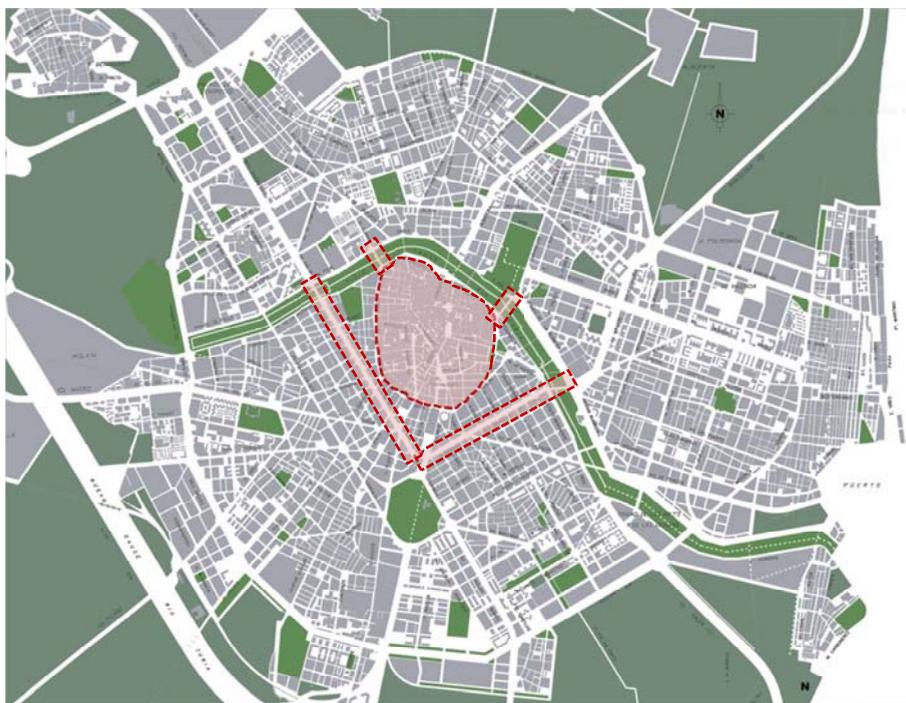


Figura 40 Red de carril bici y estaciones de Valenbisi en la ciudad (Valenbisi, 2015)

Las características morfológicas y climatológicas de Valencia son óptimas para los desplazamientos en bicicleta. La ciudad tiene una superficie llana, sin cuestas, y la climatología es suave, con pocos días

lluviosos. Sin embargo, aunque la red de carriles bici está bien extendida en las afueras, el carril bici de la zona centro está mal diseñado, al ser muy estrecho y tener curvas muy cerradas, así como falta de conexiones con las zonas de la periferia.

Recientemente se ha implantado en la ciudad un sistema de alquiler público de bicicletas, llamado Valenbisi, con vistas a fomentar el uso entre los ciudadanos. Este sistema ha tenido gran aceptación, superándose con creces el número de abonados estimado. La red de estaciones de este sistema constituye la [figura 40](#) (Valenbisi, 2015).



**Figura 41** Área de actuación de la mejora de la red de carriles bici

La mejora propuesta extiende la red, principalmente en el centro de la ciudad y en las avenidas principales, uniendo las afueras con el centro, solventando el principal problema de la red actual; el área de actuación de esta mejora se muestra en la [figura 41](#). En las tablas se empleará el acrónimo **BIC** procedente del inglés BICYCLE (bicicleta) para referirnos a esta mejora propuesta.

## 3.2 Mejoras en el transporte público

El transporte público presenta ventajas comparativas claras con respecto al transporte privado, pues al compartir vehículo la contaminación, congestión, ruido y ocupación de vía se reduce al reducirse el número de vehículos en circulación. Los medios de transporte públicos más empleados en Valencia son los autobuses y el metro. Siempre que un trayecto puede resolverse mediante el transporte público, con menor impacto, debe fomentarse esa opción sobre el transporte privado, principalmente el coche. La capacidad de viajeros que pueden gestionar los transportes públicos es directamente proporcional a la velocidad comercial, a la capacidad de los vehículos y a la frecuencia máxima disponible.

### 3.2.1 Mejora de la red de autobuses

El transporte por autobús juega un papel vital en la movilidad de las ciudades ([Huang & Liu, 2014](#)). Sus grandes ventajas son sus bajos costes de implantación y su versatilidad, pues se pueden adaptar fácilmente los trayectos en función de la demanda. Por el contrario, presenta problemas de puntualidad y variación en el tiempo de los recorridos debido al tráfico, por lo que no es la mejor alternativa cuando se exige el cumplimiento de un horario. Los autobuses son el medio de transporte público que menos energía total necesita. Sin embargo, presenta niveles de contaminación atmosférica, ruido y siniestralidad mayores que el metro. En Valencia, en comparación con otras ciudades, el índice de uso del transporte público es menor, como se muestra en la [figura 42](#), por lo que deberán potenciarse estos sistemas ([Ministerio de Medioambiente, 2003](#)). Una forma de potenciar su uso es mejorando sus prestaciones. Cualquier mejora en el sistema, ya sea por la ampliación de la red, mejora de frecuencias, renovación de flotas,... es una forma clara y directa de fomentar su uso.

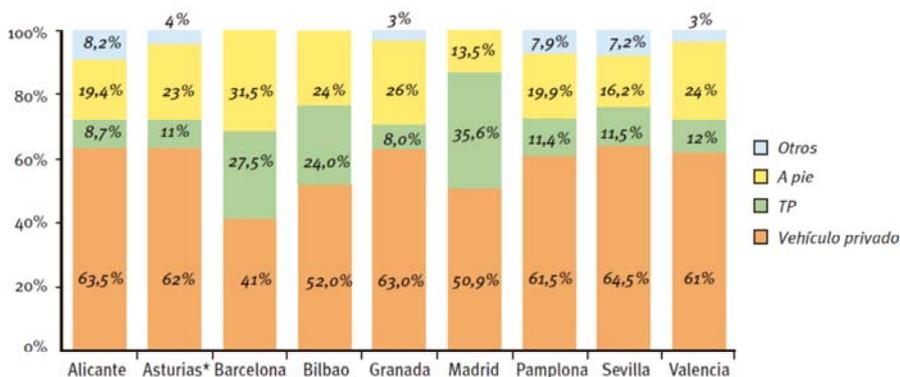


Figura 42 Reparto modal por motivo del trabajo en las principales áreas metropolitanas españolas (Ministerio de Medio Ambiente, 2003)

La mejora propuesta consiste en ampliar la flota de autobuses, con el objeto de abrir nuevas líneas, aumentar la frecuencia y proporcionar servicio nocturno, principalmente en los fines de semana. El ámbito geográfico de esta mejora abarca toda el área urbana de Valencia, el mismo que tiene la red de autobuses actual mostrado en la figura 43 (EMT Valencia, 2015).

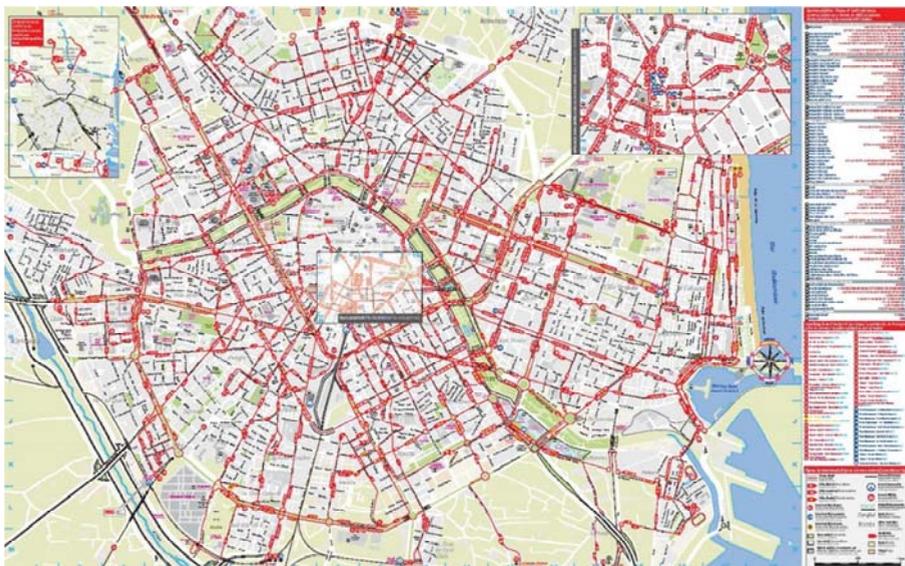


Figura 43 Red actual de autobuses (EMT Valencia, 2015)

En las tablas se empleará el acrónimo **BUS** procedente del inglés BUS (autobús) para referirnos a esta mejora propuesta.

### 3.2.2 Finalización de la red de metro

El metro es uno de los medios de transporte con mayor desarrollo en las últimas décadas, al ocupar muy poca superficie de la ciudad. Dispone de mayor capacidad de transporte que tranvía y autobuses, por lo que es más eficiente en la gestión de los recursos. Así mismo, el metro ofrece grandes niveles de calidad en puntualidad, frecuencia y velocidad comercial, al disponer de la infraestructura en exclusiva, por lo que no depende de factores externos. La principal desventaja del metro es el elevado coste de implantación y mantenimiento, al ser necesaria una infraestructura propia subterránea que es necesario iluminar, ventilar, así como gestionar su acceso. Es por ello que para que el metro sea rentable debe conectar zonas con gran demanda de uso. El transporte subterráneo tiene múltiples ventajas en ciudades con gran población y su relación con la sostenibilidad ha sido bien estudiada (Jackson & Holden, 2013; Gong et al., 2014). A nivel medioambiental presentan la ventaja de la nula emisión de gases a la atmósfera, así como no generar ruidos, y ser el medio de transporte con menor siniestralidad y que menos espacio urbano ocupa.

Observando el plano de la red de metro actual (figura 44), se observa que existe una línea inacabada en la zona sureste de la ciudad, actualmente desabastecida de este medio de transporte. La mejora propuesta consiste en finalizar esta línea para poder conectar el área sureste de Valencia con el centro de la ciudad (figura 45).

En las tablas se empleará el acrónimo **MET** procedente del inglés METRO (metro) para referirnos a esta mejora propuesta.



### 3.3 Subvenciones a la movilidad

Las medidas que se introducen a continuación no requieren de infraestructuras adicionales a las existentes, por lo que tienen la ventaja de poder implementarse de un modo inmediato, sin costes iniciales. Como contrapartida estas soluciones requieren de aportación económica durante todo el periodo de empleo de estas medidas.

#### 3.3.1 Descuento en el transporte público

Aunque la gran mayoría de los sistemas de transporte público necesitan subvenciones para cubrir los costes de operación, como se muestra en la [figura 46](#), en las ciudades españolas el porcentaje de cobertura de los costes mediante ingresos es alto, en comparación con otras ciudades europeas.

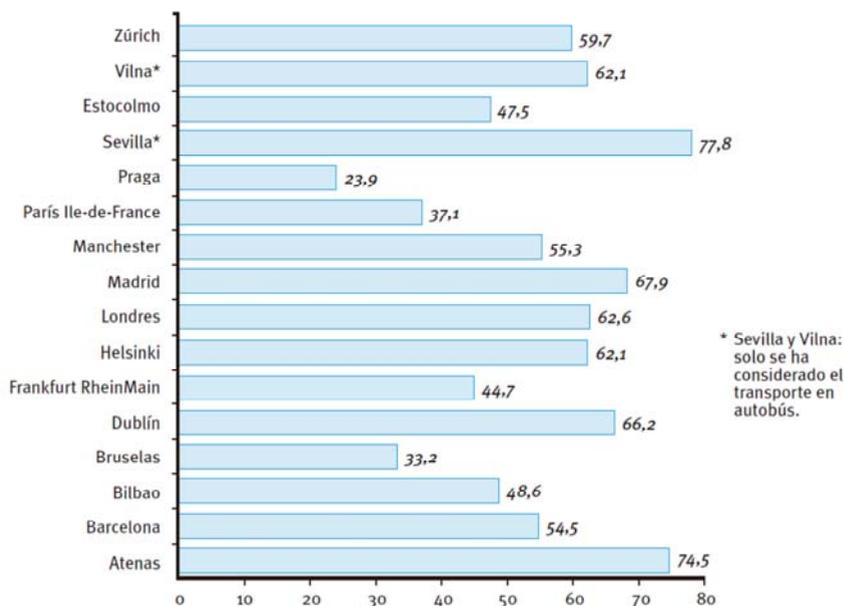
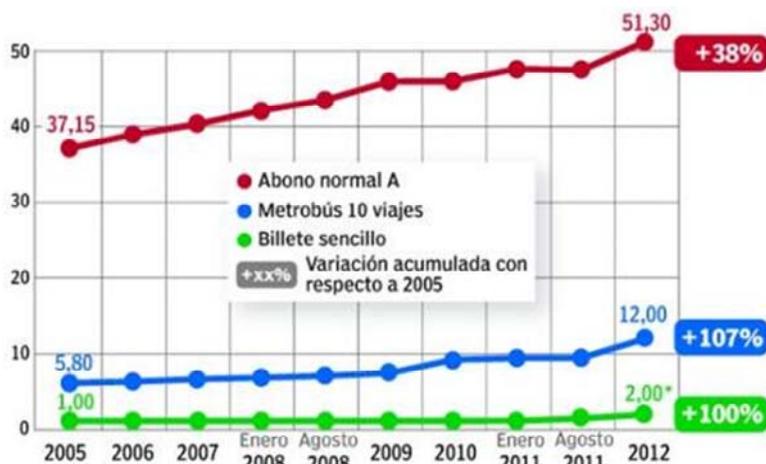


Figura 46 Cobertura de gastos de explotación por ingresos tarifarios (Melero & Pinto, 2004)

Se pretende emplear políticas de precios para aumentar el atractivo del transporte público, al contrario de lo que ha sucedido en los últimos tiempos (figura 47) (20 Minutos, 2012). Esta solución viene acompañada de una política integrada de venta de billetes multimodal, en otras palabras, un billete único. Esta mejora a la movilidad consiste en subvencionar el sistema de transporte público mediante descuentos a los viajes en metro y autobús. Con esta mejora el transporte público se convierte en una alternativa más atractiva para los ciudadanos. Procesos similares relacionados con los medios de transporte se están desarrollando en otros países (Holtsmark & Skonhoft, 2014, Laverty & Millett, 2015, De Borger & Proost, 2015, Holmgren, 2014).

En las tablas se empleará el acrónimo **DIS** procedente del inglés DISCOUNT (descuento) para referirnos a esta mejora propuesta.



FUENTE: Elaboración propia a partir de los datos del Consorcio de Transportes

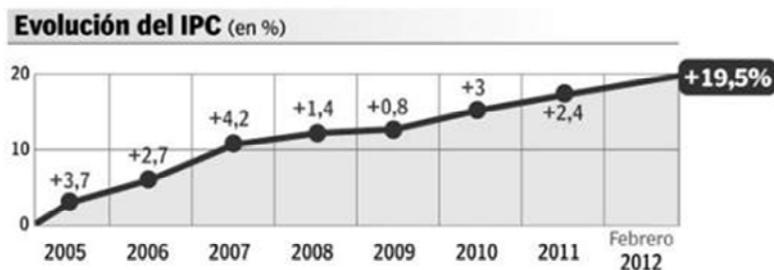


Figura 47 Evolución del precio de los transportes en Madrid (20 Minutos, 2012)

### 3.3.2 Primera hora de aparcamiento gratuito

Un problema constante en la ciudad es la costumbre instaurada de aparcar en doble fila. Esta situación arraigada en la ciudad afecta gravemente a la circulación al colapsar los carriles de las calles reduciendo la capacidad de las mismas, al mismo tiempo que aumenta el riesgo de atropellos, por el bloqueo visual que producen en peatones y conductores los coches mal aparcados, como se aprecia en la [figura 48](#).



**Figura 48 Vehículos estacionados en doble fila**

Las políticas que se realicen en los aparcamientos públicos influyen en la movilidad urbana ([Mingardo et al., 2015](#); [Marcucci, Gatta & Scaccia, 2015](#)). En los centros comerciales se emplean soluciones que permiten el aparcamiento gratuito las primeras horas ([Chang et al., 2014](#)).

La mejora propuesta consiste en la bonificación de la primera hora de aparcamiento para el vehículo privado en los aparcamientos públicos del centro de Valencia indicados en la [figura 49](#) ([RACC, 2012](#)). En teoría esta medida no aumenta número de desplazamientos de vehículos privados, por la limitación temporal al aparcamiento subvencionado. El objeto de esta medida es que los conductores que vayan a realizar gestiones puntuales en el centro urbano vayan directamente a los aparcamientos en lugar de estacionar en doble fila, u ocupar las calles mientras circulan hasta encontrar una plaza libre.

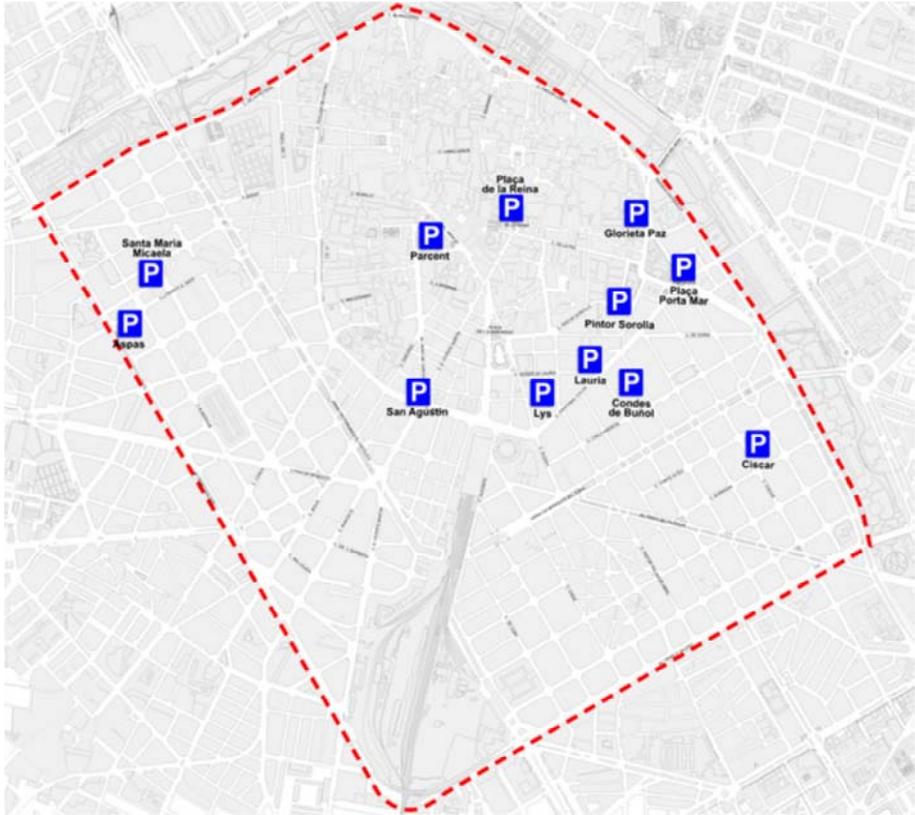


Figura 49 Ubicación de los aparcamientos públicos de la zona centro (RACC, 2012)

En las tablas se empleará el acrónimo **PAR** procedente del inglés PARKING (parking) para referirnos a esta mejora propuesta.



## **CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA EMPLEADA**



## Capítulo 4. Metodología empleada

### 4.1 Estructura del proceso metodológico propuesto

En esta tesis se desarrolla un sistema experto de ayuda a la toma de decisiones que permita la selección de la mejora óptima para la movilidad. La metodología será capaz de evaluar las distintas opciones al albor de diferentes criterios de decisión, concurriendo criterios tangibles e intangibles. El objetivo de la metodología propuesta es desarrollar un procedimiento estructurado y científico que permita la toma de decisiones compleja de un modo eficaz y reproducible para otros casos similares.

Como se ha indicado en los apartados anteriores, la movilidad urbana sostenible es un problema complejo, en el que hay que tener en cuenta simultáneamente múltiples actores, con distintos intereses y puntos de vista, muchas veces contradictorios. Además los parámetros a estudiar son muchos, y su importancia puede variar de un observador a otro. Además, parte de estos parámetros corresponden a criterios tangibles mientras que otros son intangibles, es decir, no se pueden acotar mediante magnitudes físicas.

Toda esta complejidad intrínseca a este tipo de los problemas dificulta la correcta toma de decisiones. Es por tanto que se deberá emplear un método de ayuda a la toma de decisiones, pues no existe ninguna decisión que sea mejor simultáneamente desde todos los puntos de vista.

El sistema propuesto es un método híbrido que combina simultáneamente el método Delphi, el Proceso Analítico Jerárquico, conocido por sus siglas en inglés AHP (Analytic Hierarchy Process) y el método VIKOR.

El método Delphi se empleará para realizar cuestionarios anónimos a los expertos. Se realizarán tres encuestas en dos fases. Las encuestas definirán la estructura jerárquica, el peso de los criterios a valorar, y la evaluación de las mejoras de la movilidad según los criterios. La realización de las encuestas en dos fases tiene una fase “ciega”, en la cual los expertos responden a las cuestiones, y una segunda fase en la que los expertos refinan sus respuestas conociendo las respuestas de sus colegas en la primera fase.

El método AHP combinará las respuestas de los expertos en un sistema matricial estructurado, que proporcionará como resultado final el vector con los pesos de los subcriterios, y la matriz de preferencias con los resultados de cada mejora a la movilidad con respecto a los criterios.

El método VIKOR se aplicará a los resultados obtenidos anteriormente, obteniéndose la ordenación de las mejoras a la movilidad según su importancia. Además este método indica si la alternativa que ha obtenido los mejores resultados, también llamada solución de compromiso es suficientemente mejor que la segunda opción.

La metodología propuesta se resume en las [figuras 50 - 53](#).

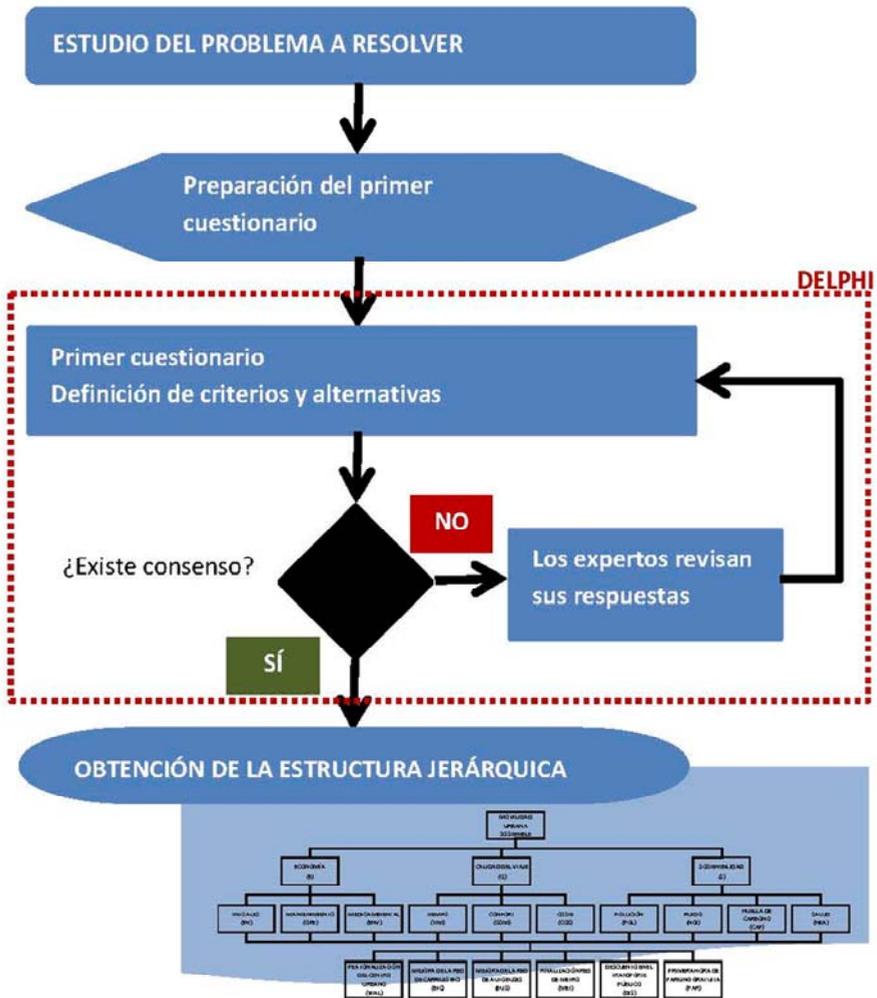


Figura 50 Pasos necesarios para obtener la estructura jerárquica

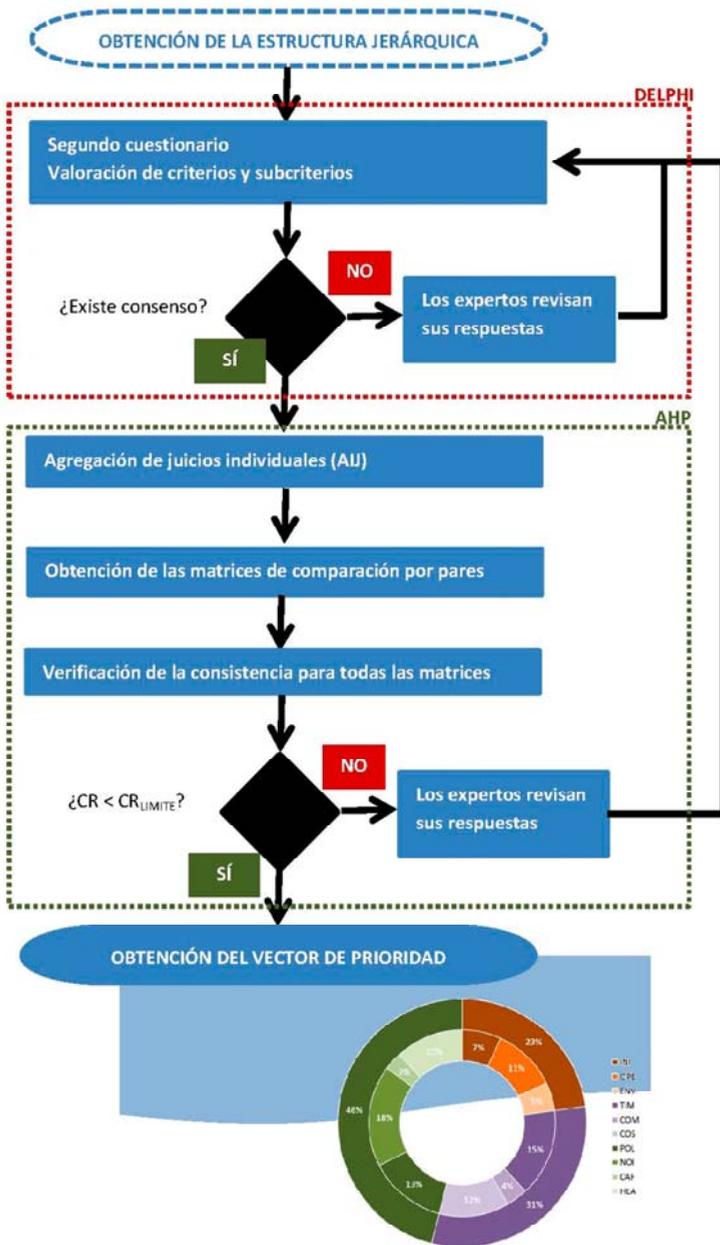


Figura 51 Pasos para obtener el vector de prioridad de criterios y subcriterios

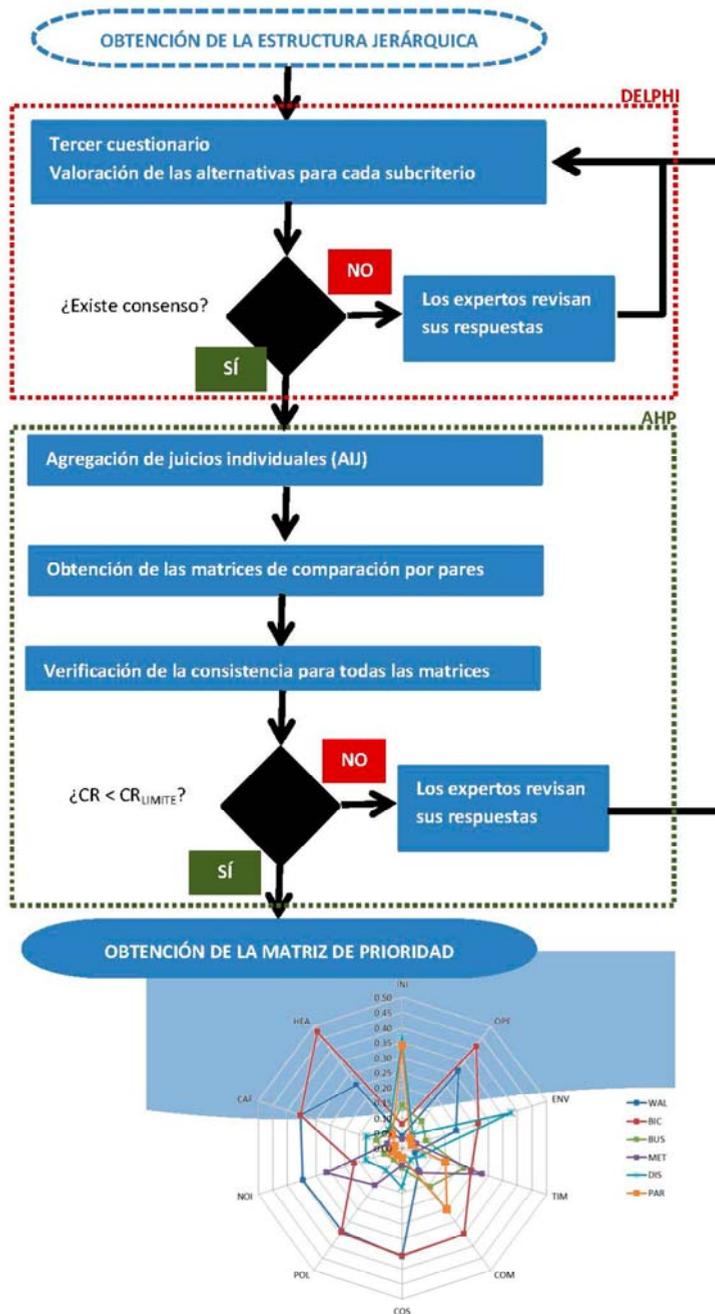


Figura 52 Pasos para obtener la matriz de prioridad de alternativas para subcriterios

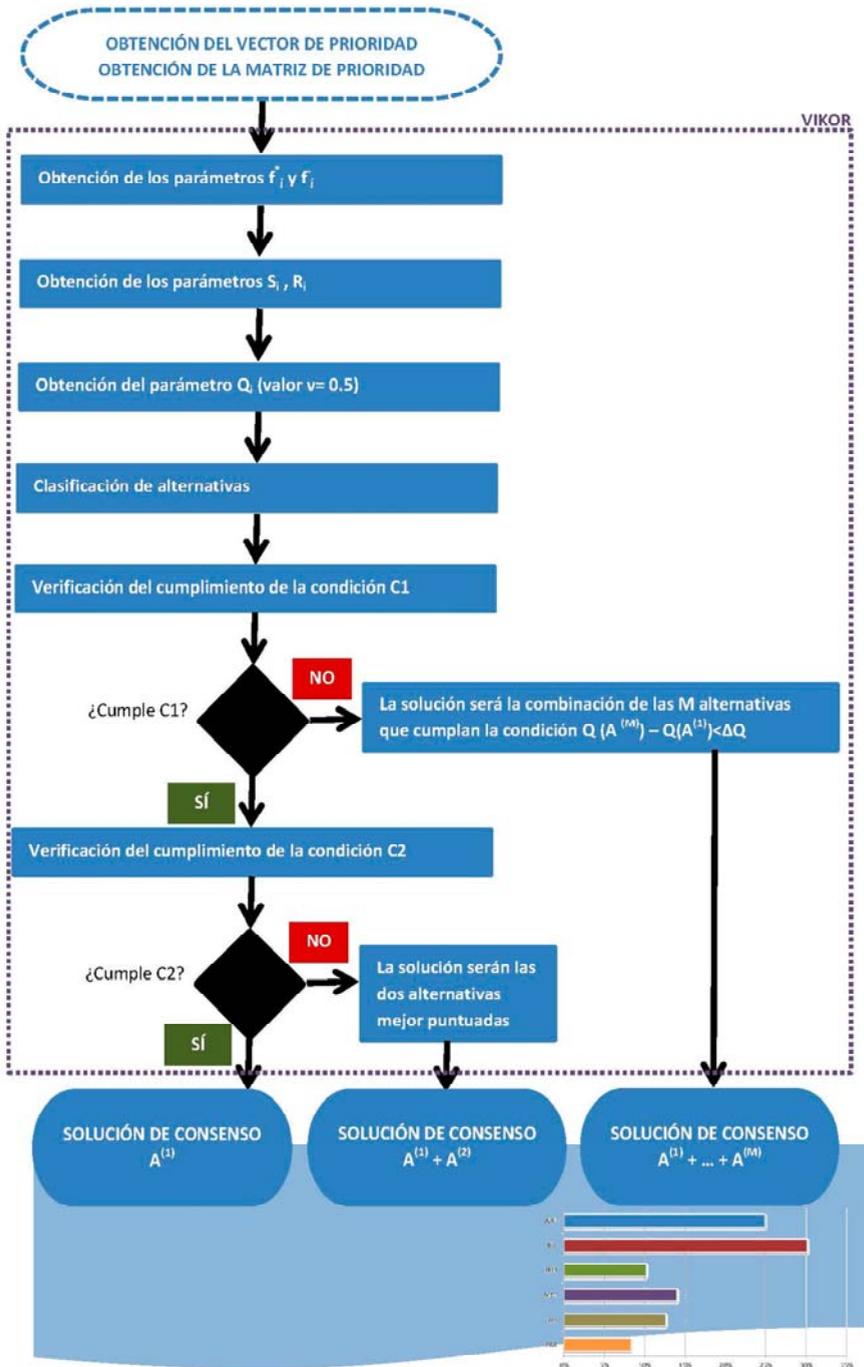


Figura 53 Pasos para obtener la solución de compromiso

## 4.2 El Método Delphi

Es una metodología que define el proceso de comunicación grupal efectivo entre un grupo de expertos para tratar un problema complejo (Linstone & Turoff, 1975). El primer estudio de Delphi fue realizado en 1950 por la Rand (Research and Development) Corporation, por Olaf Helmer-Hischberg y Theodore J. Gordon, para la fuerza aérea de Estados Unidos, y se le dio el nombre de Proyecto Delphi, tomando el nombre del oráculo de Delfos, en el Templo de Apolo en Grecia (Gordon & Helmer, 1964).

El método Delphi pretende extraer y maximizar las ventajas que presentan los métodos basados en grupos de expertos y minimizar sus inconvenientes, aprovechando la sinergia del debate en el grupo y eliminando interacciones sociales indeseables, para obtener un consenso lo más fiable posible del grupo de expertos. Se basa en el principio de la inteligencia colectiva y trata de lograr consenso de opiniones expresadas anónimas e individualmente por un grupo de expertos calificados en torno al tema que se investiga. Por lo tanto, la capacidad de predicción del Delphi se basa en la utilización sistemática de un juicio intuitivo, emitido por un grupo de expertos, denominado panel, pues la información será más veraz que la obtenida de un único experto (Roubelat, 2011).

Esta técnica mejora la eficiencia del proceso dinámico del panel de expertos. Es un proceso de encuestas a un panel de expertos seleccionados (Hsu & Sandord, 2007; Ma et al., 2011; Marchais-Roubelat & Roubelat, 2011), en sucesivas rondas anónimas, con el objetivo de tratar de conseguir consenso, pero con la máxima autonomía de los participantes; la calidad de los resultados de la encuesta depende, sobre todo, del cuidado que se ponga en la elaboración del cuestionario y en la elección de los expertos consultados.

Por medio de la interrogación con la ayuda de cuestionarios sucesivos se ponen de manifiesto convergencias de opiniones y se deducen eventuales consensos. En la mayoría de los estudios revisados se realizan entre dos y cuatro rondas, en dependencia del consenso. Se puede aplicar una primera ronda exploratoria, que permite agrupar los elementos comunes y el diseño del instrumento que se utilizará en la segunda ronda. A partir de la segunda ronda se calculan medidas de tendencia central y dispersión, se ofrece la información al panel de expertos en la tercera ronda y si en esta no se llega a consenso se repite el procedimiento, hasta lograrlo. En la mayoría de los casos con tres iteraciones es suficiente (Hsu & Sandford, 2007), sobre todo teniendo en cuenta que esos datos son tratados posteriormente.

Los expertos seleccionados deben ser personas con alto conocimiento en la materia, con estimaciones internamente consistentes y estables (Helmer & Rescher, 1959). Sobre el tamaño del grupo, el error en la estimación desciende notablemente conforme aumenta el número de expertos, hasta llegar a siete expertos, por lo que se considera que éste es el número mínimo de panelistas (Dalkey et al. 1969).

#### 4.2.1 Características básicas

Según Landeta & Barrutia (Landeta & Barrutia, 2011), las principales características del método son:

- 1.- Proceso iterativo. Los procesos de encuestas del método Delphi tienen dos fases, una primera en la que los expertos expresan su opinión, y una segunda fase en la que los expertos reconsideran sus respuestas conociendo las respuestas de sus colegas. De este modo, la dispersión de las respuestas se reduce.
- 2.- Anonimato. Los expertos no se comunican entre ellos, ningún experto conoce la identidad de los otros, para impedir la posibilidad de que un miembro del grupo sea influenciado por la reputación de otro de los miembros o por el peso que supone oponerse a la mayoría. El

anonimato permite que un miembro pueda cambiar sus opiniones sin que eso suponga una pérdida de imagen, y que los expertos defiendan sus argumentos con la tranquilidad que da saber que en caso de que sean erróneos, su equivocación no va a ser conocida por los otros expertos.

3.- Retroalimentación controlada. Se ha demostrado que los resultados del grupo son superiores a los individuales, por lo que en cada cuestionario se produce la ronda de reconsideración de respuestas con la información del resto de panelistas. Los expertos van conociendo los distintos puntos de vista y pueden ir modificando su opinión si los argumentos presentados le parecen más apropiados que los suyos.

4.- Respuesta estadística de grupo. Se persigue el consenso, pero si no se produce se pueden emplear métodos estadísticos para determinar cuáles son las respuestas más aceptadas. (Dalkey & Helmer, 1963). La información que se presenta a los expertos no es sólo el punto de vista de la mayoría, sino que se presentan todas las opiniones indicando el grado de acuerdo que se ha obtenido.

#### 4.2.2 Criterios de eficacia

El método tiene como ventajas que al desarrollarse por expertos, se presentan un gran número de ideas, de alta calidad, y orientadas al objeto del problema. El anonimato consigue que la presión social y la posibilidad de conflicto interpersonal sean mínimas. Como inconvenientes se presenta la lentitud del proceso, debido a los cuestionarios iterativos, así como que el anonimato impide que los expertos se comprometan con la solución. Así mismo, al trabajar de modo independiente, no se producen fenómenos sinérgicos de cohesión por pertenecer a un grupo.

### 4.2.3 Limitaciones

Las principales limitaciones del método son:

- Poca seguridad
- Sensibilidad de resultados debido a ambigüedad de las preguntas.
- Dificultad para establecer el grado de experiencia de los miembros del panel.
- Imposibilidad de tomar en cuenta lo inesperado.
- Grandes retrasos por las repeticiones del proceso.
- Los expertos pueden equivocarse.
- El consenso no garantiza que la elección sea la buena.

### 4.2.4 Fases del método Delphi

En la aplicación del método Delphi se debe iniciar con una etapa preliminar y de dos a cuatro circulaciones, o cuestionarios al grupo de expertos:

- 1.- Etapa preliminar: se delimita el contexto y el horizonte temporal del estudio. También se selecciona el panel de expertos, buscando grandes conocedores del tema a tratar, y que presenten pluralidad de opinión, para evitar sesgos en los resultados. Se debe explicar el método a los expertos, a fin de que conozcan el objetivo de cada fase del proceso.
- 2.- Primer cuestionario (circulación): es desestructurado, sin un guion prefijado, para que los expertos establezcan libremente los eventos y tendencias más importantes referentes al área en estudio. Cuando los cuestionarios son devueltos, se realiza una labor de síntesis

y selección, generándose un nuevo cuestionario definido de la forma más clara posible.

3.- Segunda circulación: los expertos reciben los cuestionarios y, una vez contestados, son devueltos al moderador, que realiza un análisis estadístico. El moderador confecciona el cuestionario de la tercera circulación que comprende la lista de eventos y los estadísticos calculados para cada evento.

4.- Tercera circulación: los expertos reciben el tercer cuestionario y se les solicita que realicen nuevas previsiones. Si se reafirman en su previsión anterior y ésta queda fuera de los márgenes entre los cuartiles inferior y superior, deben dar una explicación del motivo por el que creen que su previsión es correcta y la del resto del panel no, estos argumentos se realimentarán al panel en la siguiente circulación. Al ser estos comentarios anónimos, los expertos pueden expresarse con total libertad sin estar sometidos a los problemas que aparecen en las reuniones cara a cara. Cuando el moderador recibe las respuestas realiza de nuevo el análisis estadístico y organiza los argumentos dados por los expertos cuyas previsiones se salen de los márgenes intercuartiles. El cuestionario de la cuarta circulación va a contener el análisis estadístico y el resumen de los argumentos.

5.- Cuarta circulación: se solicita a los expertos que hagan nuevas previsiones, teniendo en cuenta las explicaciones dadas por los expertos, se pide a todos los expertos que den su opinión en relación con las discrepancias que han surgido en el cuestionario, cuando el moderador recibe los cuestionarios, realiza un nuevo análisis y sintetiza los argumentos utilizados por los expertos.

Finalmente se elabora un informe a partir de las respuestas de los expertos y los comentarios realizados por los panelistas. Sin embargo, si no se hubiese llegado a un consenso, existiendo posturas muy distantes, el moderador debería confrontar los distintos argumentos para averiguar si se ha cometido algún error en el proceso. El esquema del método Delphi se indica en la [figura 54](#).

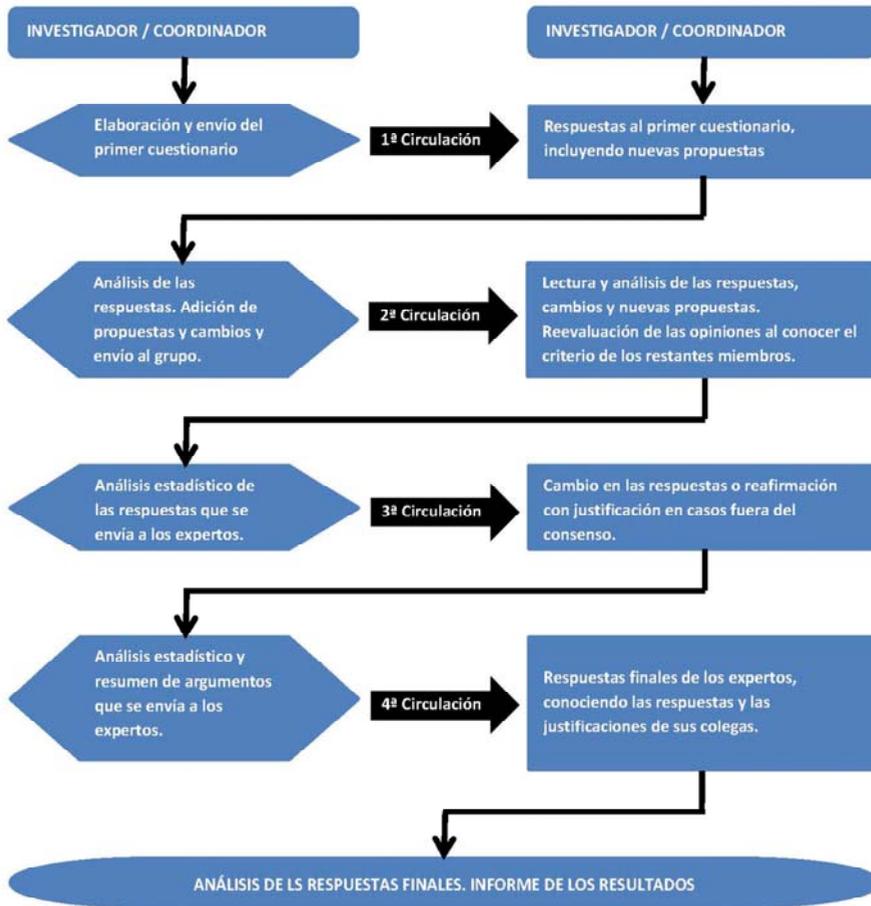


Figura 54 Proceso de redacción de los cuestionarios según el método Delphi

### 4.3 El Método AHP

El proceso analítico jerárquico (AHP) es un método de análisis multicriterio para la selección de la mejor opción de entre otras muchas consideradas (Saaty, 1980). El método se ha empleado en multitud de problemas de todo tipo, principalmente en procesos de toma de decisiones donde interactúan simultáneamente criterios tangibles e intangibles. El empleo del método AHP para tomar decisiones en una gran variedad de áreas distintas (Canto-Perello et al., 2013; Curiel-Esparza & Canto-Perello, 2013; Martin-Utrillas et al., 2015a) sugiere la idoneidad de este método para estructurar el conocimiento relevante en lo relacionado con el consenso en problemas complejos multicriterio (Syamsuddin & Hwang, 2010).

#### 4.3.1 Fundamento teórico

Normalmente los procesos de elección son subjetivos, dependiendo arbitrariamente de las personas que están participando en el proceso. Es preferible emplear criterios claros, objetivos y, a ser posible, matemáticos (Haas & Meixner, 2005). El mundo está formado por elementos interconectados, interviniendo multitud de factores que dificultan la predicción de los efectos que se producen alterando ciertas causas. Cuando la cantidad de causas y efectos se multiplican, nuestra mente no es capaz de analizar eficazmente las relaciones que se producen, por lo que no puede resolver rápidamente problemas complejos. El resultado final depende en gran medida de la importancia subjetiva de criterios o prioridades personales, así como de influencias de los consejos y la opinión del entorno. Es difícil averiguar si los cambios en la valoración de la situación pueden afectar en mayor o menor medida en las opiniones y los juicios. Es necesario cambiar el proceso de toma de decisiones mediante pensamientos intuitivos, sobre todo cuando el problema se hace mucho más complejo, con opiniones mucho más variadas y con consecuencias más imprevisibles a largo

plazo. Para ello es necesario estructurar los problemas de una forma más eficaz, de manera que se permita la interacción entre los factores manteniendo la sencillez de los pensamientos. La toma de decisiones estructurada constituye un factor crítico para el desarrollo y la supervivencia de las organizaciones, siendo el análisis multicriterio una herramienta necesaria para tomar decisiones teniendo en cuenta las distintas dimensiones y necesidades del conjunto ([Triantaphyllou, 2002](#)).

El método AHP de análisis multicriterio es una técnica de toma de decisiones en entornos complejos, mezclando elementos tangibles e intangibles en la selección de proyectos o alternativas. El método proporciona un marco en el que se pueden tomar decisiones eficaces en problemas complejos, aprovechando los procesos naturales de nuestro cerebro en la toma de decisiones. El método descompone una situación no estructurada y compleja en sus partes, de forma que éstas pueden ser imbuidas en una estructura jerárquica, cuantificando numéricamente evaluaciones subjetivas en la comparación entre las variables. De este modo se consigue discernir las variables prioritarias, para que, actuando sobre estas, se pueda influir en el resultado final. El método también racionaliza el proceso de toma de decisiones en grupo al exigir de cada integrante la necesidad de la asignación de un valor numérico a cada variable que interviene en el problema. Esta condición hace que el grupo sea consistente en su forma de pensar y en sus conclusiones, aumentando la congruencia de los juicios.

El método AHP descompone el objetivo final en una serie de niveles que pueden ser estudiados de forma independiente. Los elementos que aparecen en cada uno de esos niveles deben ser homogéneos para que la evaluación se pueda realizar mediante comparaciones entre pares en cada uno de los niveles considerados ([Saaty, 2012](#)). La evaluación entre pares puede hacerse mediante datos concretos de los ítems considerados o mediante opiniones subjetivas de los expertos que intervienen ([Saaty, 2008](#)). La [figura 55](#) muestra un esquema de una estructura jerárquica de objetivos, criterios y alternativas.

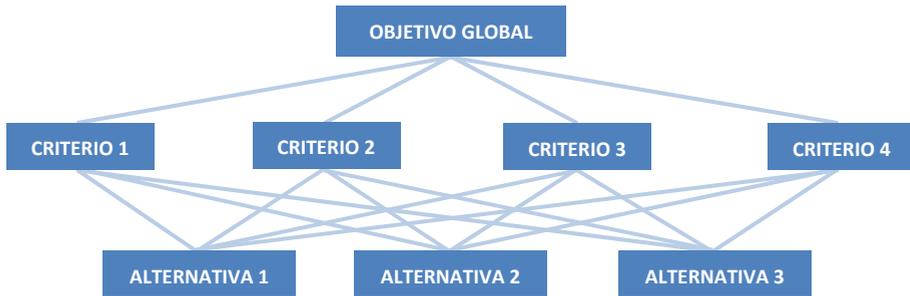


Figura 55 Ejemplo de una estructura jerárquica de objetivos / criterios / alternativas

La comparación entre pares se puede hacer de diferentes formas (Triantaphyllou & Mann, 1995) aunque se emplea principalmente la escala de importancia relativa sugerida por Saaty (Saaty, 2012), en la que se atribuyen valores que van del 1 al 9 para determinar la importancia relativa de una opción cuando se compara con otra de su mismo nivel. La escala verbal utilizada en el AHP permite al decisor incorporar subjetividad, experiencia y conocimiento en un camino intuitivo y natural. Otros autores (Vargas, 1990), representan la misma escala de modo distinto para enfatizar los valores intermedios que pueden plantearse en el proceso de toma de decisiones (tabla 7). Normalmente se emplean sólo los números impares de la tabla, reservando los números pares para ofrecer un punto de consenso entre dos posturas muy cercanas (Saaty, 1980). La experiencia en la aplicación de esta escala de nueve unidades, mostrada en la tabla 8, ha confirmado que es razonable. Gracias a ella se puede reflejar el grado de discriminación entre los pares comparados.

Tabla 7 Escala para comparaciones por parejas (Vargas, 1990).

Escala	Calificación numérica	Recíproco
<b>Muy recomendado</b>	<b>9</b>	<b>1/9</b>
De muy fuerte a extremadamente	8	1/8
<b>Muy fuertemente preferido</b>	<b>7</b>	<b>1/7</b>
De fuertemente a muy fuertemente	6	1/6
<b>Fuertemente preferido</b>	<b>5</b>	<b>1/5</b>
De moderadamente a fuertemente	4	1/4
<b>Moderadamente preferido</b>	<b>3</b>	<b>1/3</b>
De igualmente a moderadamente	2	1/2
<b>Igualmente preferido</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

Tabla 8 Escala fundamental de Saaty para comparaciones por parejas (Saaty, 2012).

Intensidad de la importancia	Definición	Explicación
1	Igual Importancia	Las dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo
3	Importancia Moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre otra
5	Fuerte Importancia	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Una actividad se ve favorecida con mucha fuerza sobre la otra. Su dominio se demuestra en la práctica
9	Extrema importancia	La evidencia a favor de una actividad sobre la otra es de mayor orden posible
2,4,6,8	Para interpolar entre los valores anteriores	A veces es necesario interponer numéricamente un juicio de transacción, puesto que no hay una palabra apropiada para describirlo
Recíprocos de los anteriores	Si a la actividad i se le ha asignado uno de los números distintos de cero mencionados cuando se compara con la actividad j, entonces j tiene el valor recíproco cuando se compara con i	Una comparación que surge de elección del elemento más pequeño como unidad, para estimar el mayor como múltiplo de esa unidad

Las comparaciones se pueden transformar en valores numéricos comparables, aunque hagan referencia a cuestiones intangibles. Esta capacidad del método para convertir datos empíricos en valores numéricos distingue la técnica del AHP frente a otras técnicas de comparación de variables. Los juicios traducidos numéricamente serán sometidos a una prueba de consistencia, ya que no dejan de ser aproximaciones de la realidad.

Los resultados de la comparación entre pares conforman una matriz de comparación. En esta matriz la diagonal principal estará compuesta por números 1, pues la comparación de un criterio evaluado consigo mismo no puede sino responder a la opción “Las dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo” de la escala de Saaty.

Tabla 9 Construcción de la matriz de juicio

Pares	P1	P2	../..	Pn
P1	1			
P2		1		
../..			1	
Pn				1

Pares	P1	P2	../..	Pn
P1	1	3		
P2	1/3	1		
../..			1	
Pn				1

A continuación se completa la matriz. Para ello se comparan por filas los criterios de la primera columna con los del resto de columnas, situando el valor de la comparación en la posición correspondiente de la matriz. Así, si el evaluador decide que el criterio 1 tiene moderada importancia sobre el criterio 2, se rellenará el elemento  $A_{12}$  con el valor 3, y el recíproco en la casilla correspondiente del elemento  $A_{21}$ . En otras palabras, si el elemento 1 pesa tres veces más que el elemento 2, el elemento 2 pesa un tercio del primero.

Sólo es necesario realizar las comparaciones de los elementos de la matriz que están por encima de la diagonal, puesto que los elementos de la diagonal tienen como valor la unidad, y por debajo de la diagonal su valor es el recíproco de los de la parte superior. La [tabla 9](#) resume el proceso de la construcción de la matriz. La comparación entre pares se hace más compleja cuando deben hacerse compensaciones entre varias opciones, ya que no se podrán asignar números de forma arbitraria; los números utilizados expresarán la fuerza con la que cada elemento contribuye a la propiedad en cuestión, para asegurar que las prioridades finales sean correctas para los distintos elementos.

Aunque la entrada de datos es laboriosa, las características del método matemático y la simplicidad de la comparación por pares de las alternativas hacen que este método se emplee extensamente ([Triantaphyllou & Mann, 1995](#)).

### 4.3.2 Fundamento matemático

Los juicios de valor generan una matriz diagonal de comparación, con número de filas y columnas igual al número de opciones o criterios evaluados. Está formada por números enteros situados en ciertas posiciones y su recíproco en el elemento traspuesto de esa posición. Normalizando la matriz se podrán obtener las prioridades relativas de las diferentes opciones respecto a la propiedad considerada. Obteniendo la media por filas de cada opción, obtendremos la prioridad de cada una de ellas respecto a la característica estudiada.

En una matriz consistente, la normalización da resultados iguales por columnas, pues las relaciones entre las opciones se mantienen en todos y cada uno de los juicios emitidos. Multiplicando la matriz por sí misma, el resultado obtenido será igual al que se obtiene multiplicando la matriz por un entero elevado a una potencia. Toda potencia de la matriz es igual a una constante multiplicada por la matriz, pues la matriz misma tiene toda la información de coeficiente necesaria.

Sin embargo, debido a la subjetividad, la mayor parte de las matrices de juicios presentan cierto grado de inconsistencia, por lo que al multiplicarlas por sí mismas, el producto no será la matriz multiplicada por un entero elevado a una potencia. Será necesario obtener el vector propio principal de la matriz original, cuyos valores son los que indican el peso de cada una de las opciones consideradas en el objetivo final.

Durante el proceso de evaluación entre pares se pueden cometer errores. Es necesario tener información para determinar si los tomadores de decisiones han sido consistentes en esa labor ([Teknomo, 2006](#)). La medida de la consistencia indicará la necesidad de mejorar los juicios o de rediseñar la jerarquías, teniendo en cuenta que la consistencia es perfecta si los juicios de valor se relacionan entre ellos de una manera perfecta. Si todas las relaciones pareadas se verificaran correctamente, tendríamos una consistencia perfecta.

Cuando la matriz es consistente, la suma normalizada por filas indica la dominancia de un elemento respecto a los otros en términos relativos.

La suma por columnas indica cuánto es dominado cada elemento por el resto. Los dos deben ser recíprocos uno del otro, de manera que el producto de los valores correspondientes sea igual a uno. Si se suman los elementos de cada columna y se multiplica cada valor por el valor correspondiente normalizado de la suma de filas, si se suma luego los resultados para todas las columnas, se puede observar que, puesto que las sumas de las columnas y las sumas de las filas normalizadas son recíprocas, su producto es igual a uno y la suma de  $n$  de estos productos da un total de  $n$ .

Si, por el contrario, los juicios son inconsistentes y, por lo tanto lo será la matriz de resultados, este valor, que es conocido como  $\lambda_{\max}$ , sería mayor que  $n$  y cuánto mayor es, nos da una medida del grado de inconsistencia. Para medirla, se divide la diferencia entre este valor y " $n$ ", exigiendo que sea inferior al 10%, para matrices de grado mayor o igual que 5, del 9% para orden 4 y del 5% si el orden de la matriz es 3. Las matrices de orden 2 son siempre consistentes. Si el valor  $\lambda_{\max}$  es mayor que los expresados, los juicios se consideran aleatorios, por lo que los resultados obtenidos no tendrían ninguna credibilidad.

No es necesario que la consistencia sea perfecta, siempre que no afecte a la cohesión entre los objetos. Tras realizar las comparaciones por pares, la consistencia se determina utilizando el valor propio,  $\lambda_{\max}$ , para calcular el índice de consistencia (consistency index CI en inglés), de la siguiente manera:

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)} \quad (1)$$

Donde;

$n$  es el tamaño de la matriz (número de criterios evaluados).

La consistencia se puede comprobar mediante el ratio de consistencia (consistency ratio CR en inglés), que es la relación entre el índice de consistencia (CI) y el índice de consistencia aleatorio (Random Consistency Index RCI en inglés), cuyos valores recoge la [tabla 10](#).

$$CR = \frac{CI}{RCI} \quad (2)$$

donde el valor de RCI viene fijado por el número de criterios evaluados,

**Tabla 10 Índice de consistencia aleatorio (RCI) (Saaty, 2012).**

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RCI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

Para obtener una matriz coherente, los juicios deben ser revisados. Una vez calculado el valor de la consistencia, se debe comprobar que es menor que el máximo admitido para que la matriz pueda usarse en fases posteriores.

### 4.3.3 Pasos que definen la metodología

Los pasos básicos en los que se descompone el proceso del método AHP son los siguientes:

- 1.- Definición del problema, especificando el objetivo final del mismo.
- 2.- Obtención de la estructura jerárquica, desde el nivel superior hasta el nivel en el cual se pueden realizar las comparaciones.
- 3.- Construcción de una matriz de comparación por pares de la contribución o impacto que cada elemento ejerce sobre cada criterio del nivel inmediato superior.
- 4.- Construcción del resto de matrices, revisando la consistencia, repitiendo el proceso para todos los niveles.
- 5.- Construcción de los vectores de prioridad mediante la ponderación de los criterios, obteniendo un vector global de prioridades para el nivel más bajo de la jerarquía.

6.- Evaluación de la consistencia para toda la jerarquía, multiplicando cada índice de consistencia por la prioridad del criterio correspondiente y sumando los productos. El resultado se divide por el mismo tipo de expresión, usando el índice de coherencia aleatorio correspondiente a las dimensiones de cada matriz ponderada por las prioridades, como se hizo previamente.

## 4.4 El Método VIKOR

El método VIKOR ([Duckstein & Opricovic, 1980](#)), es un método de decisión multicriterio (Multicriteria Decision Making, MCDM por sus siglas en inglés) desarrollado para resolver problemas de decisión con criterios intangibles en conflicto, definiendo una solución de compromiso como solución aceptable. El método VIKOR clasifica las alternativas según los criterios estudiados y determina la solución llamada “de compromiso” que es la más cercana al ideal. El nombre del método procede del Serbio ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje, que significa: Optimización Multicriterio y Solución de Compromiso. Se introdujo por primera vez en 1990 ([Opricovic, 1990](#)).

El método se basa en una función de adición que representa la cercanía al ideal. La clasificación de compromiso se realiza comparando la proximidad de la alternativa a la alternativa ideal según cada criterio ([Sayadi et al. 2009](#); [Opricovic y Tzeng, 2007](#); [Opricovic, 2009](#)); la solución de compromiso es la más cercana al ideal. El concepto de solución de compromiso se introdujo en el MCDM en 1973 ([Yu, 1973](#); [Zeleny, 1973](#)).

Para cada una de las alternativas se obtienen dos parámetros: utilidad de la mayoría y rechazo individual. Estos dos parámetros se fusionan al albur del consenso, obteniendo la mejor solución, llamada de compromiso. La mejor solución es aquella que proporciona máxima utilidad y mínimo rechazo. Este método se ha empleado en diferentes campos con buenos resultados ([Martin-Utrillas et al., 2015b](#); [Curiel-Esparza et al., 2014](#)).

#### 4.4.1 Fundamentos del método

El método plantea el problema de determinar la mejor solución (o de compromiso) en sentido multicriterio del conjunto de  $j$  alternativas viables  $A_1, A_2, \dots, A_j$ , evaluada de acuerdo con el conjunto de funciones del criterio  $n$ . Los datos de entrada son los elementos  $f_{ij}$  de la matriz de decisión, donde  $f_{ij}$  es el valor de la función de criterio  $i$ -ésimo para la alternativa  $A_j$ .

El desarrollo del método VIKOR se inicia con la siguiente forma de métrica-Lp:

$$L_{pj} = \left\{ \sum_{i=1}^m [\omega_i (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-)]^p \right\}^{1/p} \quad (3)$$

donde

$$1 \leq p \leq \infty;$$

$i = 1, 2, \dots, m$  (número de subcriterios, 10 en este caso)

$j = 1, 2, \dots, n$  (número de alternativas, 6 en este caso)

Se emplean dos métricas para medir las distancias a la solución ideal, que corresponden a los valores de  $p = 1$  y  $p = \infty$ , con lo que se obtienen dos listas,  $S_j$  y  $R_j$  respectivamente (Opricovic & Tzeng, 2004). La alternativa que presenta el máximo consenso es la que obtiene un mínimo valor de  $S_j$ , y la solución que presenta un menor rechazo por parte del oponente es la que obtiene un valor mínimo de  $R_j$ . El método permite la introducción de un parámetro  $v$  para controlar el equilibrio entre las dos métricas, según sea la estrategia que quiera seguirse, con lo que se obtiene una tercera lista  $Q_j$  que es la que proporciona la solución de compromiso.

#### 4.4.2 Pasos que definen la metodología

##### 4.4.2.1 Obtención de los parámetros $f_j^*$ y $f_j^-$ .

Para cada subcriterio se obtienen los valores de  $f_j^*$  y de  $f_j^-$ . Estos valores son los valores máximo y mínimo de las mejoras, y corresponden con la mejor y la peor respuesta para el subcriterio dado.

$$f_j^* = \max_i \{x_{ij}\} \quad (4)$$

$$f_j^- = \min_i \{x_{ij}\} \quad (5)$$

##### 4.4.2.2 Obtención de los valores $S$ y $R$ .

La mejora óptima se obtiene mediante el empleo de la jerarquización por compromiso. El método mide la concordancia, con el parámetro  $S$ , que es la mayor utilidad para el grupo, y también mide el desacuerdo, con el parámetro  $R$ , desaprobación del oponente. Los valores de  $S_i$  y de  $R_i$  vienen dados por las siguientes ecuaciones:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (6)$$

$$R_i = \max_j \left[ w_j \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right] \quad (7)$$

Donde  $w_j$  es la prioridad de cada subcriterio.

#### 4.4.2.3 Obtención del valor $Q_i$ .

Finalmente, el valor de  $Q_i$  se obtiene de la siguiente ecuación:

$$Q_i = v \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \quad (8)$$

donde,

$$S^* = \min_i S_i$$

$$S^- = \max_i S_i$$

$$R^* = \min_i R_i$$

$$R^- = \max_i R_i$$

El parámetro  $v$  es el peso del valor de utilidad del mayor grupo. Los parámetros  $S_i$ ,  $R_i$  y  $Q_i$  se calculan considerando el valor de consenso de  $v$  que es 0.5.

#### 4.4.2.4 Clasificación de las mejoras

Las mejoras a la movilidad se ordenan por su valor en los parámetros  $S$ ,  $R$  y  $Q$  en orden ascendente. La mejor solución para la movilidad es aquella que presenta un menor valor en  $Q$ , que es la solución de compromiso.

#### 4.4.2.5 Comprobación de la idoneidad de la mejora propuesta

La solución de compromiso debe satisfacer dos condiciones:

Condición 1. Ventaja aceptable.

La solución de compromiso debe tener una distancia significativa de la segunda mejor situada en el ranking.

$$Q_2 - Q_1 \geq \Delta Q \quad (9)$$

Siendo:

$$\Delta Q = 1/(J - 1) \quad (10)$$

Donde J es el número de mejoras evaluadas.

Condición 2. Estabilidad aceptable en la toma de decisiones.

La solución de compromiso debe ser la mejor clasificada en los parámetros S y/o R. En este caso es estable dentro de un proceso de toma de decisiones, lo que podría ser la estrategia de máxima utilidad grupo ( $v > 0.5$ ), por consenso ( $v \sim 0.5$ ), o "con veto" ( $v < 0.5$ ), siendo  $v$  es el peso de la estrategia de la toma de decisiones de la máxima utilidad del grupo. Si una de las condiciones no se cumple, entonces se propone un conjunto de soluciones de compromiso, que consiste en:

- Alternativas  $A^{(1)}$  y  $A^{(2)}$  si solo la condición C2 no se satisfice, o
- Alternativas  $A^{(1)}, A^{(2)}, \dots, A^{(M)}$  si la condición C1 no se satisfice;  $A^{(M)}$  es determinada por la relación  $Q(A^{(M)}) - Q(A^{(1)}) < \Delta Q$  para el máximo valor M (la posición de esas alternativas están "en cercanía" o "in closeness" en inglés).

La solución de compromiso obtenido podría ser aceptada por los tomadores de decisiones, ya que proporciona una utilidad máxima de la mayoría (representado por  $S_{\min}$ ), y un rechazo mínimo individual del oponente o del resto del grupo (representado por  $R_{\min}$ ). Las medidas  $S$  y  $R$  están integrados en  $Q$  para una solución de compromiso, la base de un acuerdo establecido por concesiones mutuas. La [figura 56](#) muestra como la solución de compromiso será la solución posible más cercana a la solución óptima.

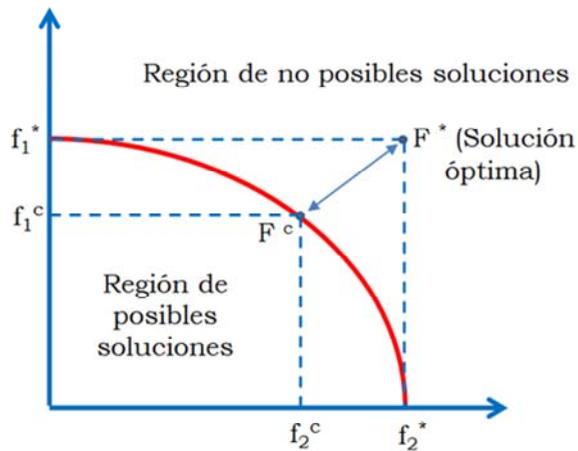


Figura 56 Solución de compromiso frente a la solución ideal



**CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DE LA  
METODOLOGÍA A LA MOVILIDAD  
SOSTENIBLE**



## Capítulo 5. Aplicación de la metodología a la movilidad sostenible

Se ha expuesto anteriormente la gran cantidad de elementos que conforman la movilidad, así como los diferentes tipos de actores que influyen en la misma. Para la correcta consideración de estos factores se recurrirá a un sistema híbrido formado por el método Delphi, el AHP y el VIKOR. La combinación de estos métodos proporciona un enfoque sistemático para el análisis multicriterio de las alternativas a la movilidad.

### 5.1 Obtención de la estructura jerárquica

El primer paso en el proceso es la obtención de los criterios y de las mejoras de movilidad relevantes. Para obtener la mejor solución se deberán considerar los criterios que más se ajusten al objetivo global. Se descompondrá el problema en numerosas partes más pequeñas, que se analizan con mayor eficacia que menos elementos más complejos. La solución estará basada en el peso relativo que se les haya asignado a los criterios individuales (Stanikov et al., 2005). El proceso proporciona una solución estructurada a los problemas descomponiendo el problema en pares sencillos de cuestiones, que son capaces de ordenar las soluciones propuestas, según su validez (Kamal et al., 2001).

El método Delphi se empleará para la obtención de la estructura jerárquica. Este método se basa en las opiniones de expertos, proporcionando resultados agregados (Faucheux & Hue, 2001). Este método tiene un doble objetivo, por un lado recoge las opiniones de los expertos, y por otro busca que los expertos afinen sus opiniones tras conocer las del resto de expertos. Un cuestionario anónimo se mandó al panel de expertos, con una batería de criterios y soluciones a la movilidad.

Aunque hay controversia en cuanto al número óptimo de panelistas, hay cierto consenso en la literatura de que el número debe estar entre ocho y doce expertos por panel (Okoli & Pawlowski, 2004; Novakowski & Wellar, 2008; Alvarez et al., 2015). Algunos expertos consideran que un pequeño panel es suficiente cuando las soluciones se obtienen mediante consenso, como en el caso que nos ocupa (Richey et al., 1985).

Este panel está formado por diez personas, ingenieros y profesionales españoles del sector del urbanismo, el transporte, y la ingeniería medioambiental. Los expertos elegidos no sólo deben ser grandes conocedores del tema, para garantizar la bondad de los resultados, sino que debe buscarse que existan puntos de vista alternativos para evitar que las respuestas sean sesgadas. Un aspecto a destacar es que los expertos se comprometan a participar de modo responsable, estimulando sus respuestas. Dado que las respuestas de los expertos son la base del método, existen autores que han desarrollado sistemas para medir el grado de experticia, tales como el coeficiente de competencia de expertos, que es un método de autoselección (Oñate & Martínez, 1990). Para este estudio se ha empleado el método TZ, en la que es el propio panel el que reconoce la experiencia profesional de sus pares (García, et al., 2012).

Se estimó no incluir el aspecto participativo, con el objeto de identificar convergencias de opinión y evitar posibles fuentes de conflicto. Los panelistas contestaron añadiendo las alternativas o criterios que consideraron adecuados al problema. Esta información se acumuló y se reenvió a los expertos, que reconsideraron sus respuestas y las proporcionadas por sus colegas. Los criterios y alternativas considerados como menos importantes fueron retirados, pues comparar demasiados elementos simultáneamente puede generar confusión en los panelistas (Saaty & Ozdemir, 2003). Este proceso de realimentación define la estructura jerárquica, generada por consenso con los panelistas.

El panel de expertos eligió como criterios principales el coste, la calidad del viaje y la sostenibilidad. Estos criterios también están divididos en subcriterios englobados en la jerarquía, de modo que puedan compararse entre ellos con el elemento del nivel superior (Saaty & Sagir, 2012). El análisis se descompone en una estructura jerárquica multinivel. El primer nivel indica el objetivo principal, en este caso la movilidad sostenible. El segundo y tercer niveles muestran los criterios y subcriterios subordinados. El cuarto nivel indica las mejoras a la movilidad. La definición de los elementos que componen la estructura del problema se ha desarrollado en detalle en los capítulos 2 y 3 de esta tesis. La [figura 57](#) muestra la estructura jerárquica del análisis propuesto.

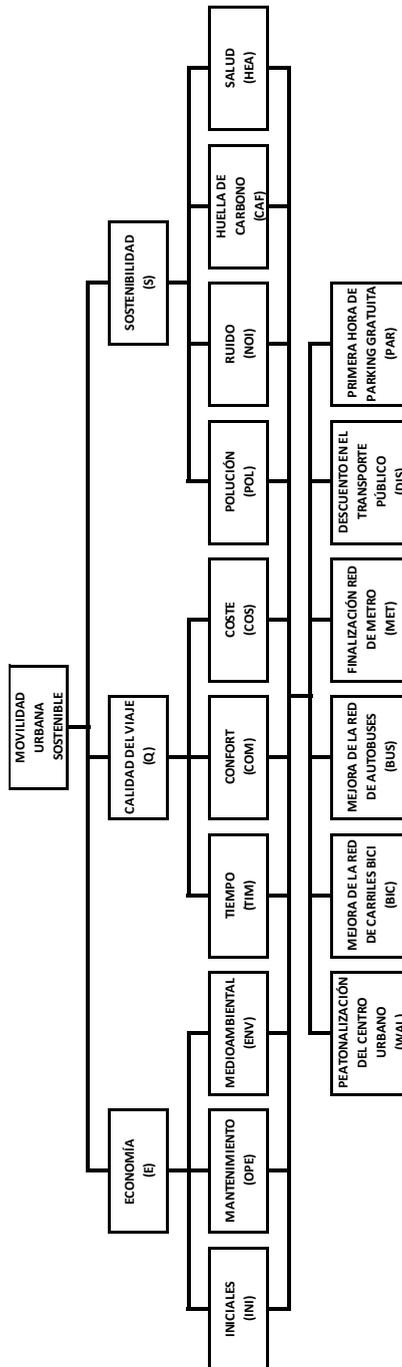


Figura 57 Estructura jerárquica para seleccionar las mejoras para la movilidad sostenible

## 5.2 Ponderación de la estructura de criterios y subcriterios

### 5.2.1 Segundo cuestionario

Una vez se ha definido la estructura jerárquica, el proceso continúa con el envío de un segundo cuestionario al panel de expertos, que interactúa con comentarios anónimos, siguiendo el proceso Delphi. El cuestionario y la plantilla de respuestas enviados constituyen las [tablas 11 y 12](#) respectivamente. El sistema de ayuda a la decisión recopila datos de las preguntas, buscando información consistente y fidedigna. El objetivo del segundo cuestionario es evaluar los criterios mediante el empleo del método AHP. Este método se desarrolla en tres pasos: desarrollar las matrices de comparación, calcular las prioridades y analizar la consistencia. La base del método AHP es obtener una decisión global a partir de decisiones básicas, reduciendo la complejidad del problema. Únicamente dos elementos se comparan simultáneamente, mediante comparaciones entre pares, evaluando elementos entre sí con respecto a una característica. En este proceso se emplea una escala de 9 puntos. Los valores más altos corresponden con mayor preferencia de una de las opciones sobre la otra. Esta escala, desarrollada por Saaty, se ha usado de modo eficaz en múltiples aplicaciones ([Martín-Utrillas et al., 2014](#)), y comparada de modo teórico con muchas otras escalas ([Saaty, 2008](#)). Si el elemento preferido es el primero, el valor es el numeral correspondiente; si el elemento preferido es el segundo, el valor es el del inverso del numeral.

Cada experto realiza comparación por pares de los criterios respecto al objetivo final. Las respuestas se transforman en valores, tal como se ha descrito, que componen una matriz de comparaciones entre pares, también llamada matriz de juicios. El mismo proceso se repite con los subcriterios para cada criterio.

**Tabla 11 Cuestionario para evaluar los criterios (P01-P03) y subcriterios (P04-P15).**

Respecto al objetivo global, la movilidad sostenible	
P01	¿Qué importancia tiene la <b>economía (E)</b> comparada con la <b>calidad del viaje (Q)</b> ?
P02	¿Qué importancia tiene la <b>economía (E)</b> comparada con la <b>sostenibilidad (S)</b> ?
P03	¿Qué importancia tiene la <b>calidad del viaje (Q)</b> comparada con la <b>sostenibilidad (S)</b> ?
Respecto al criterio economía	
P04	¿Qué importancia tienen los <b>costes iniciales (INI)</b> comparados con <b>costes de mantenimiento (OPE)</b> ?
P05	¿Qué importancia tienen los <b>costes iniciales (INI)</b> comparados con <b>costes medioambientales (ENV)</b> ?
P06	¿Qué importancia tienen los <b>costes de mantenimiento (OPE)</b> comparados con los <b>costes medioambientales (ENV)</b> ?
Respecto al criterio calidad de viaje	
P07	¿Qué importancia tiene el <b>tiempo (TIM)</b> comparado con el <b>confort (COM)</b> ?
P08	¿Qué importancia tiene el <b>tiempo (TIM)</b> comparado con los <b>costes de viaje (COS)</b> ?
P09	¿Qué importancia tiene el <b>confort (COM)</b> comparado con los <b>costes de viaje (COS)</b> ?
Respecto al criterio sostenibilidad	
P10	¿Qué importancia tiene la <b>polución (POL)</b> comparada con el <b>ruido (NOI)</b> ?
P11	¿Qué importancia tiene la <b>polución (POL)</b> comparada con la <b>huella de carbono (CAF)</b> ?
P12	¿Qué importancia tiene la <b>polución (POL)</b> comparada con la <b>salud (HEA)</b> ?
P13	¿Qué importancia tiene el <b>ruido (NOI)</b> comparada con la <b>huella de carbono (CAF)</b> ?
P14	¿Qué importancia tiene el <b>ruido (NOI)</b> comparado con la <b>salud (HEA)</b> ?
P15	¿Qué importancia tiene la <b>huella de carbono (CAF)</b> comparada con la <b>salud (HEA)</b> ?

Tabla 12 Plantilla para las respuestas del cuestionario.

Respecto al objetivo global, la movilidad sostenible						
		Más importante	Igual	Menos importante		
P01	ECONOMÍA (E)	9 7 5 3	1	3 5 7 9	CALIDAD DEL VIAJE (Q)	
P02	ECONOMÍA (E)	9 7 5 3	1	3 5 7 9	SOSTENIBILIDAD (S)	
P03	CALIDAD DEL VIAJE (Q)	9 7 5 3	1	3 5 7 9	SOSTENIBILIDAD (S)	
Respecto al criterio economía						
		Más importante	Igual	Menos importante		
P04	COSTES INICIALES (INI)	9 7 5 3	1	3 5 7 9	COSTES MANTENIMIENTO (OPE)	
P05	COSTES INICIALES (INI)	9 7 5 3	1	3 5 7 9	COSTES MEDIOAMBIENTALES (ENV)	
P06	COSTES MANTENIMIENTO (OPE)	9 7 5 3	1	3 5 7 9	COSTES MEDIOAMBIENTALES (ENV)	
Respecto al criterio calidad de viaje						
		Más importante	Igual	Menos importante		
P07	TIEMPO (TIM)	9 7 5 3	1	3 5 7 9	CONFORT (COM)	
P08	TIEMPO (TIM)	9 7 5 3	1	3 5 7 9	COSTES DE VIAJE (COS)	
P09	CONFORT (COM)	9 7 5 3	1	3 5 7 9	COSTES DE VIAJE (COS)	
Respecto al criterio sostenibilidad						
		Más importante	Igual	Menos importante		
P10	POLUCIÓN (POL)	9 7 5 3	1	3 5 7 9	RUIDO (NOI)	
P11	POLUCIÓN (POL)	9 7 5 3	1	3 5 7 9	HUELLA DE CARBONO (CAF)	
P12	POLUCIÓN (POL)	9 7 5 3	1	3 5 7 9	SALUD (HEA)	
P13	RUIDO (NOI)	9 7 5 3	1	3 5 7 9	HUELLA DE CARBONO (CAF)	
P14	RUIDO (NOI)	9 7 5 3	1	3 5 7 9	SALUD (HEA)	
P15	HUELLA DE CARBONO (CAF)	9 7 5 3	1	3 5 7 9	SALUD (HEA)	

Los resultados del cuestionario para cada uno de los expertos se encuentran recogidos en la [tabla 13](#).

**Tabla 13 Resultados del segundo cuestionario. Evaluación de los criterios con respecto al objetivo final (P01-P03), y de los subcriterios con respecto a cada uno de los criterios (P04-P15).**

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	MG
P01 E vs. Q	3	1/3	5	1/3	1	1/5	1/3	5	1/3	1/5	<b>0.7192</b>
P02 E vs. S	1/3	1/5	9	1/7	1/3	1	1/5	3	1/5	1/3	<b>0.5079</b>
P03 Q vs. S	1/5	1/3	5	1/7	1/5	5	1/3	1	1/3	3	<b>0.6608</b>
P04 INI vs. OPE	9	1/7	1/3	1	1/5	1	1/5	1/9	3	5	<b>0.7008</b>
P05 INI vs. ENV	9	1	1/5	1/9	1/3	5	5	1	9	1/3	<b>1.1746</b>
P06 OPE vs. ENV	1	7	1/3	1/9	3	5	9	9	9	5	<b>2.6011</b>
P07 TIM vs. COM	9	9	5	1	1/3	7	5	3	3	5	<b>3.4101</b>
P08 TIM vs. COS	5	1/7	7	1/3	1/5	7	5	1/3	3	5	<b>1.5017</b>
P09 COM vs. COS	1/5	1/9	1	1/5	1/5	1/3	1/3	1/7	1/3	1/3	<b>0.2627</b>
P10 POL vs. NOI	9	1/5	5	3	1/5	1/7	1/5	3	1/3	1	<b>0.8295</b>
P11 POL vs. CAF	9	9	9	9	5	1	5	1/3	5	5	<b>4.1075</b>
P12 POL vs. HEA	9	1	1	3	1/3	1/5	1/5	5	1/5	7	<b>1.0968</b>
P13 NOI vs. CAF	5	9	5	9	9	9	9	1/5	5	7	<b>5.0283</b>
P14 NOI vs. HEA	1	5	1/5	5	3	5	1	3	1/5	9	<b>1.8228</b>
P15 CAF vs. HEA	1/5	1/9	1/9	1/5	1/5	1/5	1/9	7	1/9	1/5	<b>0.2256</b>

### 5.2.2 Agregación de Juicios Individuales

En el método analítico jerárquico (AHP), a las relaciones de preferencia multiplicativas se les llama matrices de juicio, y se emplean para expresar las preferencias de los decisores. Para combinar las respuestas del panel de expertos se pueden emplear diferentes métodos. En nuestro caso el método elegido es la combinación de juicios individuales, o AIJ por sus siglas en inglés. Este método emplea al grupo como un nuevo individuo usando el método de la media geométrica, pues mantiene la estructura recíprocamente simétrica de las matrices de juicio (Forman & Peniwati, 1998). El proceso AIJ empleado se resume de modo esquemático en la figura 58.

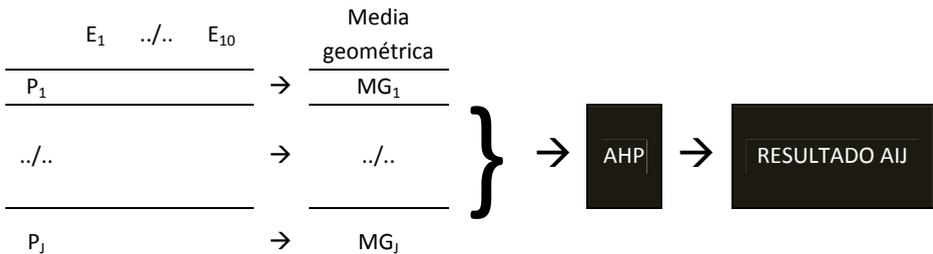


Figura 58 Esquema del procedimiento AIJ (Elaboración propia)

### 5.2.3 Matrices de comparación por pares

Partiendo de la media geométrica de las respuestas se construye la matriz de los criterios, y las tres matrices de los subcriterios. Para su confección la diagonal estará formada por valores 1, ocupando las respuestas las posiciones encima de la diagonal. Las posiciones de la matriz inferiores a la diagonal son los valores inversos de los anteriores.

### 5.2.4 Ponderación de los criterios

Una vez se han establecido las matrices de los criterios y subcriterios, se determinará la prioridad relativa de estos elementos. Los pesos se obtienen mediante el autovector principal de cada una de las matrices, que, de acuerdo con Saaty, es el vector de prioridades (Saaty, 2012). Para encontrar el vector de prioridad  $\omega$ , debe resolverse el sistema lineal  $A\omega = \lambda \omega$ . Esto se traduce en resolver la ecuación  $\det[A - \lambda \cdot I] = 0$ . Una vez se han obtenido los valores propios de la matriz de criterios y de las tres matrices de subcriterios, se puede construir el vector de criterios. Los pesos de cada subcriterio se multiplican por el peso del correspondiente criterio en la jerarquía.

### 5.2.5 Análisis de consistencia

Para obtener resultados correctos en problemas de toma de decisiones, las respuestas del panel de expertos deben ser consistentes. La adecuación de las respuestas se analizará mediante un test de consistencia. Una de las principales virtudes del método AHP es que permite la evaluación de la consistencia de las respuestas mediante un índice denominado ratio de consistencia (CR). Los valores máximos del CR dependen del orden de la matriz. El CR es el cociente entre el índice de consistencia (CI) y el índice de consistencia aleatorio (RCI):

$$CR = \frac{CI}{RCI} \quad (11)$$

El índice de consistencia (CI) se obtiene de la ecuación:

$$CI = \frac{\lambda_{max}-1}{n-1} \quad (12)$$

Donde:

- $\lambda_{max}$  es el máximo valor propio de la matriz.
- $n$  es el orden de la matriz.

Si el valor de CR excede 0.05 para matrices de orden (3), 0.09 para orden de la matriz (4) y 0.10 para orden de matrices (n) mayor que cuatro, las opiniones de los expertos pueden no ser válidas, y las respuestas deben re-examinarse. Una vez los valores de consistencia están dentro de los límites de tolerancia, el proceso para determinar la preferencia relativa de los criterios está completo.

### 5.2.6 Resumen de resultados

Las [tablas 14 y 15](#) y la [figura 59](#) recogen los resultados de la metodología aplicada en los apartados 5.2.3, 5.2.4 y 5.2.5

**Tabla 14** Vector de prioridad y análisis de consistencia de las matrices de comparación por pares de los criterios y subcriterios para los juicios colectivos.

	<b>E</b>	<b>Q</b>	<b>S</b>	<b>Vector de prioridad</b>	
<b>E</b>	1.0000	0.7192	0.5079	0.2287	
<b>Q</b>	1.3904	1.0000	0.6608	0.3110	
<b>S</b>	1.9688	1.5133	1.0000	0.4603	
$\lambda_{\max} = 3.0005$ , CI = 0.0002, CR = 0.0005 < 0.05 OK					
	<b>INI</b>	<b>OPE</b>	<b>ENV</b>	<b>Vector de prioridad</b>	
<b>INI</b>	1.0000	0.7008	1.1746	0.2952	
<b>OPE</b>	1.4269	1.0000	2.6011	0.4877	
<b>ENV</b>	0.8513	0.3845	1.0000	0.2171	
$\lambda_{\max} = 3.0215$ , CI = 0.0108, CR = 0.0207 < 0.05 OK					
	<b>TIM</b>	<b>COM</b>	<b>COS</b>	<b>Vector de prioridad</b>	
<b>TIM</b>	1.0000	3.4101	1.5017	0.4907	
<b>COM</b>	0.2933	1.0000	0.2627	0.1211	
<b>COS</b>	0.6659	3.8060	1.0000	0.3881	
$\lambda_{\max} = 3.0298$ , CI = 0.0149, CR = 0.0286 < 0.05 OK					
	<b>POL</b>	<b>NOI</b>	<b>CAF</b>	<b>HEA</b>	<b>Vector de prioridad</b>
<b>POL</b>	1.0000	0.8295	4.1075	1.0968	0.2910
<b>NOI</b>	1.2055	1.0000	5.0283	1.8228	0.3841
<b>CAF</b>	0.2435	0.1989	1.0000	0.2256	0.0679
<b>HEA</b>	0.9117	0.5486	4.4327	1.0000	0.2571
$\lambda_{\max} = 4.0224$ , CI = 0.0075, CR = 0.0084 < 0.09 OK					

Tabla 15 Pesos de los criterios y subcriterios

Criterio	Subcriterio	Nivel 1 (criterios)	Nivel 2 (subcriterios)	V. Propio (peso)	% (peso)	Posición
E	INI		0.2952	0.0675	6.75%	7
	OPE	0.2287	0.4877	0.1115	11.15%	6
	ENV		0.2171	0.0496	4.96%	8
Q	TIM		0.4907	0.1526	15.26%	2
	COM	0.3110	0.1211	0.0377	3.77%	9
	COS		0.3881	0.1207	12.07%	4
S	POL		0.2910	0.1339	13.39%	3
	NOI	0.4603	0.3841	0.1768	17.68%	1
	CAF		0.0679	0.0313	3.13%	10
	HEA		0.2571	0.1183	11.83%	5

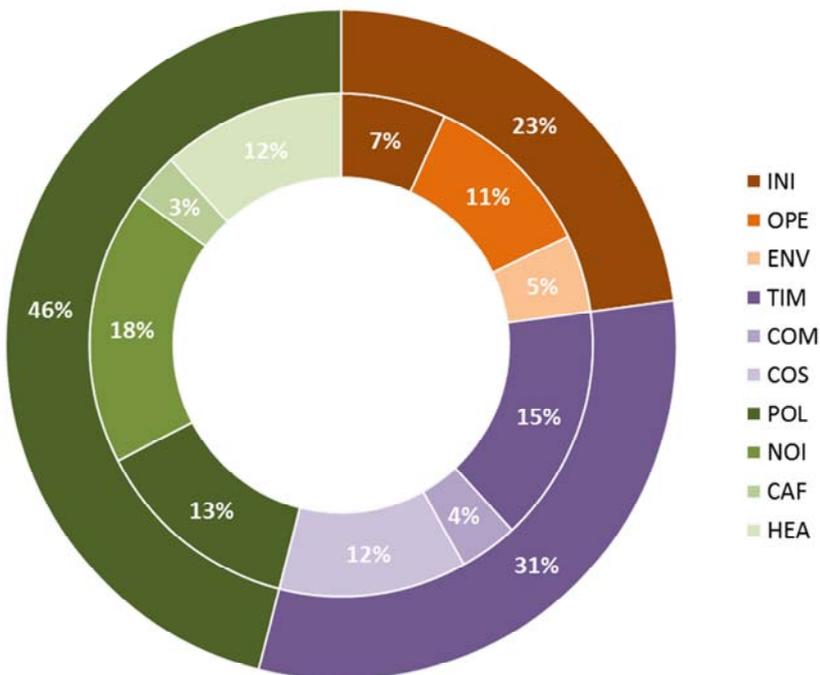


Figura 59 Diagrama de la ponderación de los criterios y subcriterios dentro de la jerarquía

## 5.3 Obtención de la matriz de prioridades

Una vez se han obtenido los pesos de criterios y subcriterios, se puede calcular la prioridad de cada mejora respecto a cada uno de los subcriterios.

### 5.3.1 Tercer cuestionario

Se envió un tercer cuestionario al panel de expertos, que indicaron sus preferencias mediante comparaciones por pares. Este cuestionario analiza las diferentes mejoras de movilidad para cada subcriterio. Al haber 6 mejoras, son necesarias 15 preguntas por subcriterio, por tanto, al haber 10 subcriterios, el tercer cuestionario se compone de 150 preguntas. Las [tablas 16 y 17](#) recogen el cuestionario y la plantilla de respuestas, respectivamente, de las 15 primeras preguntas. Se repite el mismo proceso empleado para crear el vector de criterios. Para cada subcriterio se obtiene una matriz de comparación por pares, generada a partir de las respuestas de los expertos, empleando la media geométrica. El vector de prioridades de cada matriz se obtiene usando el método del autovector. Finalmente se realizará un análisis de consistencia, para validar el método.

**Tabla 16 Cuestionario para evaluar las mejoras para el subcriterio costes iniciales (INI)**

P01	¿Qué preferencia tiene <b>peatonalizar el centro de la ciudad (WAL)</b> comparado con <b>red de carriles bici (BIC)</b>
P02	¿Qué preferencia tiene <b>peatonalizar el centro de la ciudad (WAL)</b> comparado con <b>red de autobuses (BUS)</b>
P03	¿Qué preferencia tiene <b>peatonalizar el centro de la ciudad (WAL)</b> comparado con <b>nueva línea de metro (MET)</b>
P04	¿Qué preferencia tiene <b>peatonalizar el centro de la ciudad (WAL)</b> comparado con <b>descuento en los billetes (DIS)</b>
P05	¿Qué preferencia tiene <b>peatonalizar el centro de la ciudad (WAL)</b> comparado con <b>aparcamiento gratuito (PAR)</b>
P06	¿Qué preferencia tiene <b>red de carriles bici (BIC)</b> comparado con <b>red de autobuses (BUS)</b>

- P07 ¿Qué preferencia tiene **red de carriles bici (BIC)** comparado con **nueva línea de metro (MET)**
- P08 ¿Qué preferencia tiene **red de carriles bici (BIC)** comparado con **descuento en los billetes (DIS)**
- P09 ¿Qué preferencia tiene **red de carriles bici (BIC)** comparado con **aparcamiento gratuito (PAR)**
- P10 ¿Qué preferencia tiene **red de autobuses (BUS)** comparado con **nueva línea de metro (MET)**
- P11 ¿Qué preferencia tiene **red de autobuses (BUS)** comparado con **descuento en los billetes (DIS)**
- P12 ¿Qué preferencia tiene **red de autobuses (BUS)** comparado con **aparcamiento gratuito (PAR)**
- P13 ¿Qué preferencia tiene **nueva línea de metro (MET)** comparado con **descuento en los billetes (DIS)**
- P14 ¿Qué preferencia tiene **nueva línea de metro (MET)** comparado con **aparcamiento gratuito (PAR)**
- P15 ¿Qué preferencia tiene **descuento en los billetes (DIS)** comparado con **aparcamiento gratuito (PAR)**

Tabla 17 Plantilla para las respuestas del cuestionario.

Respecto al subcriterio Costes iniciales (INI)		Más importante	Igual	Menos importante	
P01	WAL	9 7 5 3	1	3 5 7 9	BIC
P02	WAL	9 7 5 3	1	3 5 7 9	BUS
P03	WAL	9 7 5 3	1	3 5 7 9	MET
P04	WAL	9 7 5 3	1	3 5 7 9	DIS
P05	WAL	9 7 5 3	1	3 5 7 9	PAR
P06	BIC	9 7 5 3	1	3 5 7 9	BUS
P07	BIC	9 7 5 3	1	3 5 7 9	MET
P08	BIC	9 7 5 3	1	3 5 7 9	DIS
P09	BIC	9 7 5 3	1	3 5 7 9	PAR
P10	BUS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	MET
P11	BUS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	DIS
P12	BUS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	PAR
P13	MET	9 7 5 3	1	3 5 7 9	DIS
P14	MET	9 7 5 3	1	3 5 7 9	PAR
P15	DIS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	PAR

### 5.3.2 Agregación de Juicios Individuales

Al igual que en el caso del segundo cuestionario, las respuestas de los expertos se agruparan mediante la media geométrica. Las [tablas 18 – 27](#) recogen las respuestas de los expertos comparando las mejoras en relación a cada subcriterio.

**Tabla 18 Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Costes Iniciales (INI)**

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	GM
P01 WAL vs. BIC	1/3	1	1/5	1	1/5	1/3	1	1/7	1/5	1	0.4077
P02 WAL vs. BUS	1/5	1/5	1/5	1/3	1/5	1/7	1/3	1/5	1/7	1/5	0.2071
P03 WAL vs. MET	3	1	5	1	5	3	1	1	3	1	1.9184
P04 WAL vs. DIS	1/7	1/9	1/9	1/5	1/9	1/5	1/7	1/9	1/7	1/9	0.1348
P05 WAL vs. PAR	1/7	1/9	1/7	1/5	1/9	1/7	1/7	1/5	1/7	1/9	0.1417
P06 BIC vs. BUS	1/3	1/5	1	1/3	1	1	1/5	3	1/3	1/7	0.4789
P07 BIC vs. MET	5	1	9	1	9	5	1	9	7	1	3.2402
P08 BIC vs. DIS	1/5	1/9	1/5	1/5	1/5	1/5	1/7	1/3	1/5	1/9	0.1809
P09 BIC vs. PAR	1/5	1/9	1/3	1/5	1/5	1/5	1/7	3	1/3	1/9	0.2497
P10 BUS vs. MET	7	5	9	3	9	7	5	7	9	5	6.2691
P11 BUS vs. DIS	1/3	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	1/5	1/5	1/3	1/7	0.2497
P12 BUS vs. PAR	1/3	1/5	1/3	1/3	1/3	1/3	1/5	1/5	1/3	1/7	0.2627
P13 MET vs. DIS	1/9	1/9	1/9	1/5	1/9	1/7	1/7	1/9	1/9	1/9	0.1239
P14 MET vs. PAR	1/9	1/9	1/9	1/5	1/9	1/9	1/7	1/9	1/9	1/9	0.1208
P15 DIS vs. PAR	1	1	3	1	1	1/3	1	1	1	1	1.0000

**Tabla 19 Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Costes de Mantenimiento (OPE)**

	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>	<b>E5</b>	<b>E6</b>	<b>E7</b>	<b>E8</b>	<b>E9</b>	<b>E10</b>	<b>GM</b>
P16 <b>WAL vs. BIC</b>	1	1/3	1/3	1	1/3	1	1/3	1	1/3	1	<b>0.5774</b>
P17 <b>WAL vs. BUS</b>	9	1	3	1	9	5	3	5	5	7	<b>3.8060</b>
P18 <b>WAL vs. MET</b>	9	1	7	1	9	9	5	7	9	9	<b>5.2004</b>
P19 <b>WAL vs. DIS</b>	9	1	3	9	9	9	7	7	5	7	<b>5.6602</b>
P20 <b>WAL vs. PAR</b>	9	7	7	9	7	9	9	7	7	7	<b>7.7403</b>
P21 <b>BIC vs. BUS</b>	9	5	5	1	9	5	5	5	7	3	<b>4.7050</b>
P22 <b>BIC vs. MET</b>	9	7	9	1	9	9	7	7	9	5	<b>6.3175</b>
P23 <b>BIC vs. DIS</b>	9	5	5	9	9	9	9	7	7	3	<b>6.8178</b>
P24 <b>BIC vs. PAR</b>	9	5	9	9	7	9	9	7	9	3	<b>7.2306</b>
P25 <b>BUS vs. MET</b>	1	5	5	1	1	5	3	3	5	3	<b>2.6468</b>
P26 <b>BUS vs. DIS</b>	1	3	1	9	1	5	5	3	1	1	<b>2.1411</b>
P27 <b>BUS vs. PAR</b>	1	5	5	9	1/3	5	7	3	5	1	<b>2.8809</b>
P28 <b>MET vs. DIS</b>	1	1	1/5	9	1	1	3	1	1/5	1/3	<b>0.9029</b>
P29 <b>MET vs. PAR</b>	1	3	1	9	1/3	1	5	1	1/3	1/3	<b>1.1746</b>
P30 <b>DIS vs. PAR</b>	1	3	5	1	1/3	1	3	1	5	1	<b>1.5399</b>

Tabla 20 Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Costes Ambientales (ENV)

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	GM
P31 WAL vs. BIC	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1	1	1/5	1	0.5486
P32 WAL vs. BUS	5	3	7	5	3	5	1	1	3	3	3.0553
P33 WAL vs. MET	7	5	9	7	5	7	1	1	5	5	4.2515
P34 WAL vs. DIS	1	1/3	1	1/3	1	1	1/9	1/5	1/3	1	0.4915
P35 WAL vs. PAR	9	5	7	9	7	5	1	5	3	7	5.0325
P36 BIC vs. BUS	5	7	5	7	3	5	1	1	7	9	4.0398
P37 BIC vs. MET	7	9	7	5	5	7	1	1	9	9	4.7819
P38 BIC vs. DIS	1	1	1	1	1/3	1	1/9	1/5	1	1	0.6123
P39 BIC vs. PAR	9	9	9	9	7	9	1	5	7	9	6.4783
P40 BUS vs. MET	3	3	3	3	5	3	1	1	3	1	2.2708
P41 BUS vs. DIS	1/5	1/7	1/5	1/7	1/3	1/7	1/9	1/5	1/7	1/5	0.1735
P42 BUS vs. PAR	5	7	1	5	3	5	1	5	7	5	3.6831
P43 MET vs. DIS	1/7	1/9	1/7	1/9	1/5	1/9	1/9	1/5	1/9	1/7	0.1348
P44 MET vs. PAR	3	5	1/3	3	1	5	1	5	1	5	2.1247
P45 DIS vs. PAR	9	9	9	9	7	9	9	9	9	7	8.5588

Tabla 21 Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Tiempo (TIM)

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	GM
P46 WAL vs. BIC	1/5	1/3	1/5	1/5	1/7	1/3	1/5	1/9	1/7	1/7	0.1888
P47 WAL vs. BUS	1/5	1/5	1/7	1/5	1/7	1	1/3	1/5	1/3	1/5	0.2433
P48 WAL vs. MET	1/7	1/5	1/7	1/7	1/9	1/3	1/5	1/5	1/5	1/9	0.1692
P49 WAL vs. DIS	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	3	1	1/3	1	1/3	0.5173
P50 WAL vs. PAR	1/5	1	1	1/3	1/5	1/3	1/5	1/5	1/9	1/5	0.2882
P51 BIC vs. BUS	1	1	1/3	3	1	3	1/3	5	5	1	1.3797
P52 BIC vs. MET	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	3	5	3	1	0.8448
P53 BIC vs. DIS	3	1	3	3	5	3	5	7	7	1	3.1598
P54 BIC vs. PAR	1	3	1	1	3	3	1	5	1/5	1	1.3904
P55 BUS vs. MET	1/3	3	1	1/3	1/3	1	3	1	1	1	0.8960
P56 BUS vs. DIS	3	5	7	3	5	1	3	3	1	7	3.1598
P57 BUS vs. PAR	1	3	5	3	3	1	3	1	1/7	3	1.6747
P58 MET vs. DIS	5	3	5	5	7	5	5	3	3	3	4.2154
P59 MET vs. PAR	3	3	5	3	5	3	1	1	1/5	3	2.0345
P60 DIS vs. PAR	1/3	1	3	1	1/3	1/3	1/5	1/3	1/9	1/3	0.4404

Tabla 22 Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Confort (COM)

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	GM
P61 WAL vs. BIC	1/5	1/3	1/3	1/5	1/5	1/5	1/7	1/5	1/3	1/3	0.2372
P62 WAL vs. BUS	1/5	1/5	3	1	1/5	1	1/3	3	1/3	1	0.6170
P63 WAL vs. MET	1/5	1	3	1	1/5	1	3	3	3	1/3	1.0077
P64 WAL vs. DIS	1	1	3	3	1	3	3	7	3	3	2.3485
P65 WAL vs. PAR	1/5	1/9	1/3	1/5	1/7	1/3	1/3	3	1/3	1/3	0.3086
P66 BIC vs. BUS	1	1/3	5	3	1	5	5	7	1	5	2.3126
P67 BIC vs. MET	1	3	5	5	1	5	9	7	5	1	3.2154
P68 BIC vs. DIS	5	3	5	5	5	7	9	9	5	7	5.7156
P69 BIC vs. PAR	1	1/7	1	3	3	3	5	7	1	1	1.6332
P70 BUS vs. MET	1	5	1	3	1	3	5	1	5	1/3	1.8089
P71 BUS vs. DIS	5	5	1	3	5	3	5	5	5	3	3.6519
P72 BUS vs. PAR	1	1/5	1/5	1	1/3	1	1	1	1	1/3	0.5818
P73 MET vs. DIS	5	1	1	3	5	3	1	5	1	3	2.2533
P74 MET vs. PAR	1	1/9	1/5	1	1/3	1	1/5	1	1/5	1	0.4438
P75 DIS vs. PAR	1/5	1/9	1/5	1/5	1/7	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	0.1823

**Tabla 23 Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Costes del Viaje (COS)**

	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>	<b>E5</b>	<b>E6</b>	<b>E7</b>	<b>E8</b>	<b>E9</b>	<b>E10</b>	<b>GM</b>
P76 <b>WAL vs. BIC</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	<b>1.0000</b>
P77 <b>WAL vs. BUS</b>	5	5	7	9	5	7	7	5	5	5	<b>5.8659</b>
P78 <b>WAL vs. MET</b>	7	5	7	9	5	7	7	7	7	5	<b>6.4889</b>
P79 <b>WAL vs. DIS</b>	3	3	7	7	3	3	5	3	1	3	<b>3.3511</b>
P80 <b>WAL vs. PAR</b>	9	9	9	9	5	9	9	9	9	9	<b>8.4862</b>
P81 <b>BIC vs. BUS</b>	5	5	7	9	5	5	7	5	5	5	<b>5.6718</b>
P82 <b>BIC vs. MET</b>	7	5	7	9	5	7	7	5	5	5	<b>6.0666</b>
P83 <b>BIC vs. DIS</b>	3	3	7	7	3	5	5	3	1	3	<b>3.5267</b>
P84 <b>BIC vs. PAR</b>	9	9	9	9	5	9	9	9	9	9	<b>8.4862</b>
P85 <b>BUS vs. MET</b>	3	1	1	1	1	1	1	3	3	1	<b>1.3904</b>
P86 <b>BUS vs. DIS</b>	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/3	<b>0.4152</b>
P87 <b>BUS vs. PAR</b>	5	3	3	1	1	3	3	3	3	5	<b>2.6673</b>
P88 <b>MET vs. DIS</b>	1/5	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1/5	1/3	<b>0.3749</b>
P89 <b>MET vs. PAR</b>	3	3	3	1	1	3	3	3	3	5	<b>2.5344</b>
P90 <b>DIS vs. PAR</b>	7	5	3	3	3	5	5	5	5	7	<b>4.5882</b>

Tabla 24 Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Polución (POL)

	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>	<b>E5</b>	<b>E6</b>	<b>E7</b>	<b>E8</b>	<b>E9</b>	<b>E10</b>	<b>GM</b>
P91 <b>WAL vs. BIC</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.0000
P92 <b>WAL vs. BUS</b>	7	5	5	7	9	7	7	7	5	7	6.4889
P93 <b>WAL vs. MET</b>	5	3	5	5	7	3	5	5	3	3	4.2154
P94 <b>WAL vs. DIS</b>	5	3	3	3	7	1	3	7	3	3	3.3511
P95 <b>WAL vs. PAR</b>	9	5	9	9	9	9	9	9	9	9	8.4862
P96 <b>BIC vs. BUS</b>	7	5	5	5	9	5	7	7	5	7	6.0666
P97 <b>BIC vs. MET</b>	5	3	5	5	7	3	5	5	5	3	4.4364
P98 <b>BIC vs. DIS</b>	5	3	3	3	7	1	5	7	3	3	3.5267
P99 <b>BIC vs. PAR</b>	9	5	9	9	9	9	9	9	9	9	8.4862
P100 <b>BUS vs. MET</b>	1/5	1/5	1/5	1/5	1/7	1/7	1/3	1/5	1/5	1/7	0.1903
P101 <b>BUS vs. DIS</b>	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/3	0.4152
P102 <b>BUS vs. PAR</b>	3	1	5	3	1	3	3	3	3	5	2.6673
P103 <b>MET vs. DIS</b>	3	7	1	3	5	3	3	5	3	3	3.2402
P104 <b>MET vs. PAR</b>	5	3	7	5	3	5	5	5	5	5	4.6689
P105 <b>DIS vs. PAR</b>	5	3	7	5	3	5	5	3	5	7	4.5882

Tabla 25 Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Ruido (NOI)

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	GM
P106 WAL vs. BIC	3	3	3	1	5	1	1	5	5	3	2.5150
P107 WAL vs. BUS	5	7	5	7	7	7	7	5	7	9	6.4889
P108 WAL vs. MET	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.0000
P109 WAL vs. DIS	3	1	3	3	5	3	7	3	3	7	3.3511
P110 WAL vs. PAR	5	9	9	9	9	9	9	9	9	9	8.4862
P111 BIC vs. BUS	3	3	3	1	3	5	3	1	3	3	2.5344
P112 BIC vs. MET	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1.1161
P113 BIC vs. DIS	1	1/3	1	3	1	1	3	1/3	1	1	1.0000
P114 BIC vs. PAR	3	7	7	3	5	7	5	3	5	3	4.5089
P115 BUS vs. MET	1/3	1/5	1/7	1/5	1/3	1/9	1/9	1	1/9	1/9	0.1989
P116 BUS vs. DIS	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1/3	0.4152
P117 BUS vs. PAR	1	3	3	3	3	5	3	5	3	1	2.6673
P118 MET vs. DIS	7	3	3	3	3	3	5	1	3	5	3.2402
P119 MET vs. PAR	3	5	5	5	5	5	5	7	5	3	4.6689
P120 DIS vs. PAR	3	5	5	5	5	7	3	7	5	3	4.5882

Tabla 26 Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Huella de Carbono (CAF)

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	GM
P121 WAL vs. BIC	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.0000
P122 WAL vs. BUS	7	5	7	5	3	7	7	7	1	5	4.7858
P123 WAL vs. MET	7	7	5	5	7	9	7	7	7	5	6.4889
P124 WAL vs. DIS	5	5	3	3	5	7	3	5	3	5	4.2154
P125 WAL vs. PAR	9	9	7	9	9	9	9	9	9	9	8.7766
P126 BIC vs. BUS	7	3	3	5	5	7	5	7	3	5	4.7452
P127 BIC vs. MET	7	5	5	5	7	9	7	7	5	5	6.0666
P128 BIC vs. DIS	5	5	3	5	5	7	3	5	3	5	4.4364
P129 BIC vs. PAR	9	9	7	9	9	9	9	9	9	9	8.7766
P130 BUS vs. MET	5	3	1	3	1	3	1	3	5	5	2.5150
P131 BUS vs. DIS	1	1/3	1/3	1	1/3	1/5	1/3	1/3	1	1	0.4915
P132 BUS vs. PAR	3	5	3	5	5	3	7	5	5	7	4.5882
P133 MET vs. DIS	1/5	1/5	1/5	1	1/3	1/7	1/5	1/3	1/7	1	0.2857
P134 MET vs. PAR	3	3	3	5	3	1	5	5	3	5	3.2972
P135 DIS vs. PAR	5	5	3	7	5	3	7	7	5	7	5.1648

**Tabla 27 Evaluación de los expertos de las mejoras de movilidad con respecto del subcriterio Beneficios para la salud (HEA)**

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	GM
P136 WAL vs. BIC	1/3	1/3	1/3	1	1/5	1/5	1/3	1	1	1/7	0.3845
P137 WAL vs. BUS	3	1	7	3	3	5	7	5	9	3	3.9363
P138 WAL vs. MET	3	1	7	5	5	5	7	5	9	3	4.3597
P139 WAL vs. DIS	3	1	7	3	3	5	7	5	9	3	3.9363
P140 WAL vs. PAR	3	3	7	5	5	5	7	5	9	3	4.8660
P141 BIC vs. BUS	5	3	9	3	7	9	9	5	9	9	6.2640
P142 BIC vs. MET	5	3	9	5	9	9	9	5	9	9	6.7600
P143 BIC vs. DIS	5	3	9	3	7	9	9	5	9	9	6.2640
P144 BIC vs. PAR	5	5	9	5	9	9	9	5	9	9	7.1143
P145 BUS vs. MET	1	1	1	3	3	1	1	1	1	1	1.2457
P146 BUS vs. DIS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.0000
P147 BUS vs. PAR	1	3	1	3	3	1	1	1	1	1	1.3904
P148 MET vs. DIS	1	1	1	1/3	1/3	1	1	1	1	1	0.8027
P149 MET vs. PAR	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1.1161
P150 DIS vs. PAR	1	3	1	3	3	1	1	1	1	1	1.3904

### 5.3.3 Matriz de comparación por pares

Se repite el proceso empleado para la estructura de criterios y subcriterios.

### 5.3.4 Análisis de consistencia

Se aplica el mismo proceso que con los criterios. Al ser todas las matrices de orden 6 la razón de consistencia (CR) deberá ser menor que 0.10. Las [tablas 28 – 37](#) recogen la aplicación del método AHP a las respuestas del panel de expertos.

**Tabla 28 Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Costes Iniciales (INI)**

<i>INI</i>	<i>WAL</i>	<i>BIC</i>	<i>BUS</i>	<i>MET</i>	<i>DIS</i>	<i>PAR</i>	<b>Vector Propio</b>
<b>WAL</b>	1.0000	0.4077	0.2071	1.9184	0.1348	0.1417	0.0417
<b>BIC</b>	2.4526	1.0000	0.4789	3.2402	0.1809	0.2497	0.0804
<b>BUS</b>	4.8287	2.0880	1.0000	6.2691	0.2497	0.2627	0.1418
<b>MET</b>	0.5213	0.3086	0.1595	1.0000	0.1239	0.1208	0.0299
<b>DIS</b>	7.4207	5.5265	4.0055	8.0702	1.0000	1.0000	0.3659
<b>PAR</b>	7.0569	4.0055	3.8060	8.2756	1.0000	1.0000	0.3402
$\lambda_{\max} = 6.2057$ , CI = 0.0411, CR = 0.0329 < 0.10 OK							

**Tabla 29 Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Costes de Mantenimiento (OPE)**

<i>OPE</i>	<i>WAL</i>	<i>BIC</i>	<i>BUS</i>	<i>MET</i>	<i>DIS</i>	<i>PAR</i>	<b>Vector Propio</b>
<b>WAL</b>	1.0000	0.5774	3.8060	5.2004	5.6602	7.7403	0.3165
<b>BIC</b>	1.7321	1.0000	4.7050	6.3175	6.8178	7.2306	0.4173
<b>BUS</b>	0.2627	0.2125	1.0000	2.6468	2.1411	2.8809	0.1109
<b>MET</b>	0.1923	0.1583	0.3778	1.0000	0.9029	1.1746	0.0536
<b>DIS</b>	0.1767	0.1467	0.4670	1.1076	1.0000	1.5399	0.0581
<b>PAR</b>	0.1292	0.1383	0.3471	0.8513	0.6494	1.0000	0.0434
$\lambda_{\max} = 6.0784$ , CI = 0.0157, CR = 0.0125 < 0.10 OK							

**Tabla 30 Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Costes Ambientales (ENV)**

<i>ENV</i>	<b>WAL</b>	<b>BIC</b>	<b>BUS</b>	<b>MET</b>	<b>DIS</b>	<b>PAR</b>	<b>Vector Propio</b>
<b>WAL</b>	1.0000	0.5486	3.0553	4.2515	0.4915	5.0325	0.1880
<b>BIC</b>	1.8228	1.0000	4.0398	4.7819	0.6123	6.4783	0.2657
<b>BUS</b>	0.3273	0.2475	1.0000	2.2708	0.1735	3.6831	0.0834
<b>MET</b>	0.2352	0.2091	0.4404	1.0000	0.1348	2.1247	0.0501
<b>DIS</b>	2.0345	1.6332	5.7645	7.4207	1.0000	8.5588	0.3798
<b>PAR</b>	0.1987	0.1544	0.2715	0.4707	0.1168	1.0000	0.0329
$\lambda_{\max} = 6.1390$ , CI = 0.0278, CR = 0.0222 < 0.10 OK							

**Tabla 31 Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Tiempo (TIM)**

<i>TIM</i>	<b>WAL</b>	<b>BIC</b>	<b>BUS</b>	<b>MET</b>	<b>DIS</b>	<b>PAR</b>	<b>Vector Propio</b>
<b>WAL</b>	1.0000	0.1888	0.2433	0.1692	0.5173	0.2882	0.0447
<b>BIC</b>	5.2962	1.0000	1.3797	0.8448	3.1598	1.3904	0.2395
<b>BUS</b>	4.1108	0.7248	1.0000	0.8960	3.1598	1.6747	0.2157
<b>MET</b>	5.9112	1.1837	1.1161	1.0000	4.2154	2.0345	0.2777
<b>DIS</b>	1.9332	0.3165	0.3165	0.2372	1.0000	0.4404	0.0720
<b>PAR</b>	3.4700	0.7192	0.5971	0.4915	2.2708	1.0000	0.1503
$\lambda_{\max} = 6.0339$ , CI = 0.0068, CR = 0.0054 < 0.10 OK							

**Tabla 32 Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Confort (COM)**

<i>COM</i>	<b>WAL</b>	<b>BIC</b>	<b>BUS</b>	<b>MET</b>	<b>DIS</b>	<b>PAR</b>	<b>Vector Propio</b>
<b>WAL</b>	1.0000	0.2372	0.6170	1.0077	2.3485	0.3086	0.0931
<b>BIC</b>	4.2154	1.0000	2.3126	3.2154	5.7156	1.6332	0.3493
<b>BUS</b>	1.6207	0.4324	1.0000	1.8089	3.6519	0.5818	0.1588
<b>MET</b>	0.9923	0.3110	0.5528	1.0000	2.2533	0.4438	0.1003
<b>DIS</b>	0.4258	0.1750	0.2738	0.4438	1.0000	0.1823	0.0466
<b>PAR</b>	3.2402	0.6123	1.7188	2.2533	5.4842	1.0000	0.2520
$\lambda_{\max} = 6.0391$ , CI = 0.0078, CR = 0.0063 < 0.10 OK							

**Tabla 33 Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Costes del Viaje (COS)**

<i>COS</i>	<i>WAL</i>	<i>BIC</i>	<i>BUS</i>	<i>MET</i>	<i>DIS</i>	<i>PAR</i>	<b>Vector Propio</b>
<b>WAL</b>	1.0000	1.0000	5.8659	6.4889	3.3511	8.4862	0.3581
<b>BIC</b>	1.0000	1.0000	5.6718	6.0666	3.5267	8.4862	0.3557
<b>BUS</b>	0.1705	0.1763	1.0000	1.3904	0.4152	2.6673	0.0670
<b>MET</b>	0.1541	0.1648	0.7192	1.0000	0.3749	2.5344	0.0571
<b>DIS</b>	0.2984	0.2835	2.4082	2.6673	1.0000	4.5882	0.1307
<b>PAR</b>	0.1178	0.1178	0.3749	0.3946	0.2180	1.0000	0.0315
$\lambda_{\max} = 6.0948$ , CI = 0.0190, CR = 0.0152 < 0.10 OK							

**Tabla 34 Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Polución (POL)**

<i>POL</i>	<i>WAL</i>	<i>BIC</i>	<i>BUS</i>	<i>MET</i>	<i>DIS</i>	<i>PAR</i>	<b>Vector Propio</b>
<b>WAL</b>	1.0000	1.0000	6.4889	4.2154	3.3511	8.4862	0.3391
<b>BIC</b>	1.0000	1.0000	6.0666	4.4364	3.5267	8.4862	0.3438
<b>BUS</b>	0.1541	0.1648	1.0000	0.1903	0.4152	2.6673	0.0463
<b>MET</b>	0.2372	0.2254	5.2556	1.0000	3.2402	4.6689	0.1528
<b>DIS</b>	0.2984	0.2835	2.4082	0.3086	1.0000	4.5882	0.0901
<b>PAR</b>	0.1178	0.1178	0.3749	0.2142	0.2180	1.0000	0.0279
$\lambda_{\max} = 6.3992$ , CI = 0.0798, CR = 0.0639 < 0.10 OK							

**Tabla 35 Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Ruido (NOI)**

<i>NOI</i>	<i>WAL</i>	<i>BIC</i>	<i>BUS</i>	<i>MET</i>	<i>DIS</i>	<i>PAR</i>	<b>Vector Propio</b>
<b>WAL</b>	1.0000	2.5150	6.4889	1.0000	3.3511	8.4862	0.3458
<b>BIC</b>	0.3976	1.0000	2.5344	1.1161	1.0000	4.5089	0.1672
<b>BUS</b>	0.1541	0.3946	1.0000	0.1989	0.4152	2.6673	0.0610
<b>MET</b>	1.0000	0.8960	5.0283	1.0000	3.2402	4.6689	0.2639
<b>DIS</b>	0.2984	1.0000	2.4082	0.3086	1.0000	4.5882	0.1266
<b>PAR</b>	0.1178	0.2218	0.3749	0.2142	0.2180	1.0000	0.0354
$\lambda_{\max} = 6.221$ , CI = 0.0442, CR = 0.0354 < 0.10 OK							

**Tabla 36 Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Huella de Carbono (CAF)**

<i>CAF</i>	<b>WAL</b>	<b>BIC</b>	<b>BUS</b>	<b>MET</b>	<b>DIS</b>	<b>PAR</b>	<b>Vector Propio</b>
<b>WAL</b>	1.0000	1.0000	4.7858	6.4889	4.2154	8.7766	0.3545
<b>BIC</b>	1.0000	1.0000	4.7452	6.0666	4.4364	8.7766	0.3549
<b>BUS</b>	0.2090	0.2107	1.0000	2.5150	0.4915	4.5882	0.0876
<b>MET</b>	0.1541	0.1648	0.3976	1.0000	0.2857	3.2972	0.0515
<b>DIS</b>	0.2372	0.2254	2.0345	3.4997	1.0000	5.1648	0.1251
<b>PAR</b>	0.1139	0.1139	0.2180	0.3033	0.1936	1.0000	0.0265
$\lambda_{\max} = 6.2771$ , CI = 0.0554, CR = 0.0443 < 0.10 OK							

**Tabla 37 Matriz de comparación por pares, vector de prioridad (propio) y análisis de consistencia de las mejoras respecto al subcriterio Beneficios para la salud (HEA)**

<i>HEA</i>	<b>WAL</b>	<b>BIC</b>	<b>BUS</b>	<b>MET</b>	<b>DIS</b>	<b>PAR</b>	<b>Vector Propio</b>
<b>WAL</b>	1.0000	0.3845	3.9363	4.3597	3.9363	4.8660	0.2584
<b>BIC</b>	2.6011	1.0000	6.2640	6.7600	6.2640	7.1143	0.4775
<b>BUS</b>	0.2540	0.1596	1.0000	1.2457	1.0000	1.3904	0.0734
<b>MET</b>	0.2294	0.1479	0.8027	1.0000	0.8027	1.1161	0.0616
<b>DIS</b>	0.2540	0.1596	1.0000	1.2457	1.0000	1.3904	0.0734
<b>PAR</b>	0.2055	0.1406	0.7192	0.8960	0.7192	1.0000	0.0558
$\lambda_{\max} = 6.0354$ , CI = 0.0071, CR = 0.0057 < 0.10 OK							

### 5.3.5 Ponderación de las alternativas

El paso final del proceso es obtener las prioridades globales. Para ello se conformará la matriz de prioridad (matriz de juicio). Esta matriz es de orden [6x10] en la que cada columna estará formada por los vectores de prioridad de las matrices de comparación por pares de las mejoras a la movilidad respecto a cada subcriterio. La [tabla 38](#) constituye la matriz de juicio. Esta matriz también se puede representar de forma gráfica, como muestra la [figura 60](#).

Tabla 38 Matriz de prioridad de las mejoras a la movilidad respecto a los subcriterios

	INI	OPE	ENV	TIM	COM	COS	POL	NOI	CAF	HEA
<b>WAL</b>	0.0417	0.3165	0.1880	0.0447	0.0931	0.3581	0.3391	0.3458	0.3545	0.2584
<b>BIC</b>	0.0804	0.4173	0.2657	0.2395	0.3493	0.3557	0.3438	0.1672	0.3549	0.4775
<b>BUS</b>	0.1418	0.1109	0.0834	0.2157	0.1588	0.0670	0.0463	0.0610	0.0876	0.0734
<b>MET</b>	0.0299	0.0536	0.0501	0.2777	0.1003	0.0571	0.1528	0.2639	0.0515	0.0616
<b>DIS</b>	0.3659	0.0581	0.3798	0.0720	0.0466	0.1307	0.0901	0.1266	0.1251	0.0734
<b>PAR</b>	0.3402	0.0434	0.0329	0.1503	0.2520	0.0315	0.0279	0.0354	0.0265	0.0558

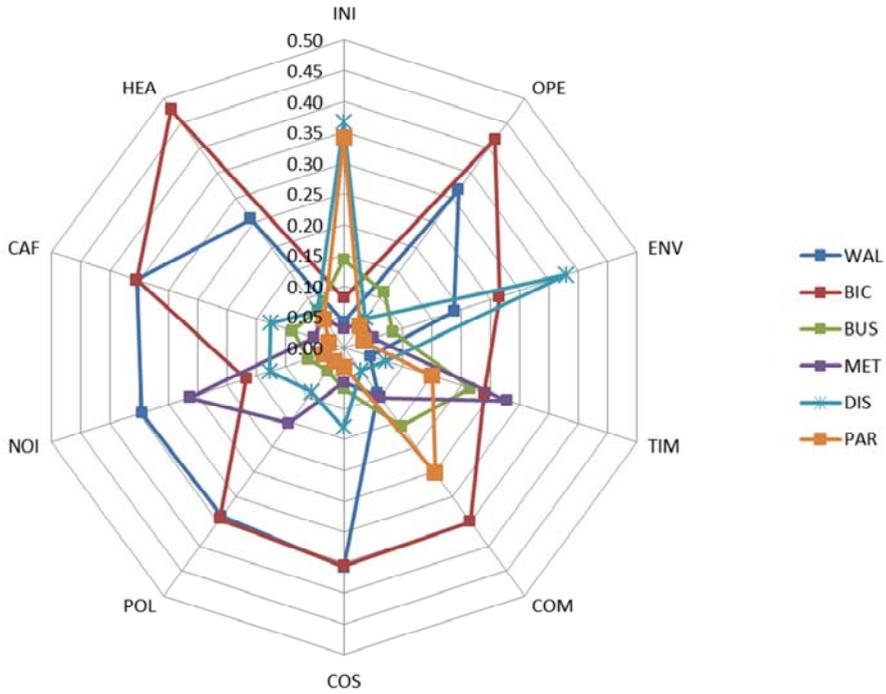


Figura 60 Representación gráfica de la matriz de prioridad

## 5.4 Ponderación de las mejoras a la movilidad aplicando el método VIKOR

A fin de estudiar la estabilidad de la solución, se ha realizado un análisis VIKOR. Tal como se ha indicado anteriormente, a partir de la matriz de los vectores prioritarios se obtiene para cada subcriterio los valores de  $f_j^*$  y de  $f_j^-$ , recogidos en la [tabla 39](#).

Tabla 39 Valores  $f_j^*$  y  $f_j^-$  para las mejoras a la movilidad

	WAL	BIC	BUS	MET	DIS	PAR	$f_j^*$	$f_j^-$
INI	0.0417	0.0804	0.1418	0.0299	0.3659	0.3402	0.3659	0.0299
OPE	0.3165	0.4173	0.1109	0.0536	0.0581	0.0434	0.4173	0.0434
ENV	0.1880	0.2657	0.0834	0.0501	0.3798	0.0329	0.3798	0.0329
TIM	0.0447	0.2395	0.2157	0.2777	0.0720	0.1503	0.2777	0.0447
COM	0.0931	0.3493	0.1588	0.1003	0.0466	0.2520	0.3493	0.0466
COS	0.3581	0.3557	0.0670	0.0571	0.1307	0.0315	0.3581	0.0315
POL	0.3391	0.3438	0.0463	0.1528	0.0901	0.0279	0.3438	0.0279
NOI	0.3458	0.1672	0.0610	0.2639	0.1266	0.0354	0.3458	0.0354
CAF	0.3545	0.3549	0.0876	0.0515	0.1251	0.0265	0.3549	0.0265
HEA	0.2584	0.4775	0.0734	0.0616	0.0734	0.0558	0.4775	0.0558

### 5.4.1 Obtención de los valores S, R y Q.

La mejora óptima se obtiene mediante el empleo de la jerarquización por compromiso. Se emplean 3 parámetros:

- El parámetro S, que es la mayor utilidad para el grupo.
- El parámetro R, que mide el desacuerdo con la desaprobación del oponente.
- El parámetro Q, obtenido de la combinación de los dos anteriores, que mide la solución de compromiso.

Recordamos las ecuaciones que definen  $S_i$  y  $R_i$ :

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (13)$$

$$R_i = \max_j \left[ w_j \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right] \quad (14)$$

Donde  $w_j$  es la prioridad de cada subcriterio.

En la [tabla 40](#) se encuentran los valores de los parámetros  $S_i$  y  $R_i$ .

**Tabla 40** Valores de  $w_j \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-}$ ,  $S_i$  y  $R_i$  para cada mejora en la movilidad

	WAL	BIC	BUS	MET	DIS	PAR
<b>INI</b>	0.0651	0.0574	0.0450	0.0675	0.0000	0.0052
<b>OPE</b>	0.0301	0.0000	0.0914	0.1085	0.1071	0.1115
<b>ENV</b>	0.0274	0.0163	0.0424	0.0472	0.0000	0.0496
<b>TIM</b>	0.1526	0.0250	0.0407	0.0000	0.1347	0.0835
<b>COM</b>	0.0319	0.0000	0.0237	0.0310	0.0377	0.0121
<b>COS</b>	0.0000	0.0009	0.1076	0.1112	0.0840	0.1207
<b>POL</b>	0.0020	0.0000	0.1261	0.0810	0.1076	0.1339
<b>NOI</b>	0.0000	0.1017	0.1622	0.0466	0.1248	0.1768
<b>CAF</b>	0.0000	0.0000	0.0254	0.0289	0.0219	0.0313
<b>HEA</b>	0.0615	0.0000	0.1134	0.1167	0.1134	0.1183
<b><math>S_i</math></b>	0.3707	0.2013	0.7779	0.6386	0.7312	0.8430
<b><math>R_i</math></b>	0.1526	0.1017	0.1622	0.1167	0.1347	0.1768

Finalmente, el valor de  $Q_i$  se obtiene de la siguiente ecuación:

$$Q_i = v \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \quad (15)$$

donde,

$$S^* = \min_i S_i$$

$$S^- = \max_i S_i$$

$$R^* = \min_i R_i$$

$$R^- = \max_i R_i$$

El parámetro  $v$  considerando es el valor de consenso  $v = 0.5$ . La [tabla 41](#) recoge los valores necesarios para obtener el parámetro  $Q_i$ , cuyos valores se indican en la [tabla 42](#) y se representan gráficamente en la [figura 61](#).

Tabla 41 Mejores valores  $S^*$ ,  $R^*$  y peores valores  $S^-$ ,  $R^-$  para las mejoras a la movilidad

$S^*$	0.2013	$S^-$	0.8430
$R^*$	0.1017	$R^-$	0.1768

Tabla 42 Valores de  $Q_i$  para cada mejora en la movilidad ( $v = 0.5$ )

	WAL	BIC	BUS	MET	DIS	PAR
$Q_i$	0.4709	0.0000	0.8520	0.4406	0.6328	1.0000

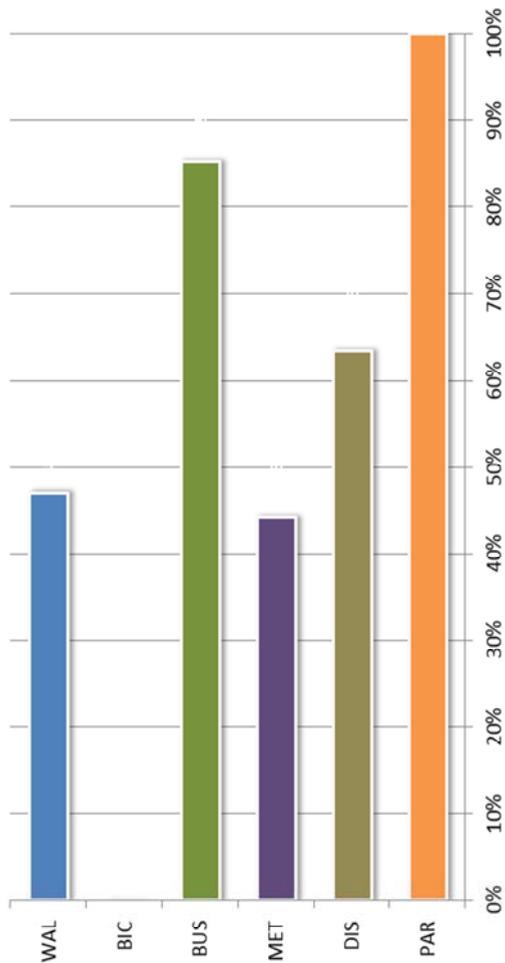


Figura 61 Representación gráfica de los valores Q de las mejoras

## 5.4.2 Clasificación de las mejoras

Las mejoras a la movilidad se ordenan por su valor en los parámetros S, R y Q en orden ascendente. La mejor solución para la movilidad es aquella que presenta un menor valor en Q, que es la solución de compromiso. Las tablas 43 - 45 recopilan los resultados del método VIKOR.

Tabla 43 Valores de  $S_i$ ,  $R_i$  y  $Q_i$  ( $v = 0.5$ ) para cada mejora en la movilidad

	WAL	BIC	BUS	MET	DIS	PAR
$S_i$	0.3707	0.2013	0.7779	0.6386	0.7312	0.8430
$R_i$	0.1526	0.1017	0.1622	0.1167	0.1347	0.1768
$Q_i$	0.4709	0.0000	0.8520	0.4406	0.6328	1.0000

Tabla 44 Clasificación de las mejoras a la movilidad obtenida del método VIKOR

	WAL	BIC	BUS	MET	DIS	PAR
$S_i$	2	1	5	3	4	6
$R_i$	4	1	5	2	3	6
$Q_i$	3	1	5	2	4	6

Tabla 45 Mejoras a la movilidad ordenadas según la clasificación del método VIKOR

Posición	1	2	3	4	5	6
$S_i$	BIC	WAL	MET	DIS	BUS	PAR
$R_i$	BIC	MET	DIS	WAL	BUS	PAR
$Q_i$	BIC	MET	WAL	DIS	BUS	PAR

### 5.4.3 Comprobación de la idoneidad de la mejora propuesta

Se comprueba que la solución de compromiso satisface las dos condiciones del método.

Condición 1. Ventaja aceptable.

$$Q_2 - Q_1 \geq \Delta Q \quad (16)$$

$$\Delta Q = 1/(J - 1) \quad (17)$$

Donde J es el número de mejoras evaluadas.

$$0.4406 - 0.0000 = 0.4406 \geq 0.2 \quad (18)$$

$$\Delta Q = \frac{1}{6-1} = \frac{1}{5} = 0.2 \quad (19)$$

La condición se satisface.

Condición 2. Estabilidad aceptable.

La solución de compromiso debe ser la mejor situada en los parámetros S o/y R.

Esta condición también se satisface, pues la solución BIC es la mejor posicionada en ambos parámetros.

### 5.4.4 Estabilidad frente a variaciones del parámetro $\nu$

Se ha obtenido una solución que cumple las dos condiciones del método VIKOR considerando un valor para el parámetro  $\nu$  igual a 0.5, que es considerado un valor de consenso.

A continuación se va a realizar el estudio suponiendo valores del parámetro  $\nu$  que oscilen entre 0 y 1, para analizar las variaciones en los resultados. Los parámetros  $S_i$  y  $R_i$  permanecen constantes, únicamente varía el parámetro  $Q_i$ . Los resultados obtenidos se muestran en la [tabla 46](#), y se representan gráficamente en la [figura 62](#).

Tabla 46 Variación de  $Q_i$  para distintos valores de  $v$  para cada mejora en la movilidad

$v$	WAL	BIC	BUS	MET	DIS	PAR
0	0.6779	0.0000	0.8054	0.1998	0.4398	1.0000
0.1	0.6365	0.0000	0.8147	0.2480	0.4784	1.0000
0.2	0.5951	0.0000	0.8241	0.2961	0.5170	1.0000
0.3	0.5537	0.0000	0.8334	0.3443	0.5556	1.0000
0.4	0.5123	0.0000	0.8427	0.3925	0.5942	1.0000
<b>0.5</b>	<b>0.4709</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.8520</b>	<b>0.4406</b>	<b>0.6328</b>	<b>1.0000</b>
0.6	0.4295	0.0000	0.8613	0.4888	0.6714	1.0000
0.7	0.3881	0.0000	0.8707	0.5370	0.7101	1.0000
0.8	0.3467	0.0000	0.8800	0.5851	0.7487	1.0000
0.9	0.3053	0.0000	0.8893	0.6333	0.7873	1.0000
1	0.2639	0.0000	0.8986	0.6815	0.8259	1.0000

Se aprecia como a valores bajos de  $v$ , que corresponden a situaciones de veto, la mejora WAL presenta valores muy elevados de  $Q$  (lo cual es malo), pues, aunque es una mejora muy válida, presenta altos desequilibrios al tener unos costes iniciales altos y tiempos de viaje mayores. Conforme aumenta el valor de  $v$ , y empieza a primar la utilidad sobre el veto, esta mejora asciende en el ranking, hasta ocupar la segunda posición.

Caso contrario sucede con las mejoras MET y DIS, que no destacan por su valor en  $S$ , utilidad, sino por ser muy competitivas frente al rechazo. Para valores de  $v$  cercanos a cero, son muy competitivas, ocupando la segunda y la tercera posición. Sin embargo, en cuanto prima la utilidad, pierden posiciones frente a la mejora WAL.

Las mejoras BUS y PAR, a la vista de los resultados son menos competitivas tanto considerando la utilidad como el rechazo, por lo que ocupan siempre las posiciones 5ª y 6ª, respectivamente.

La mejor BIC es la que mejores resultados presenta en los parámetros  $S$  y  $R$ , por lo que, independientemente de los valores de  $v$ , es la mejor considerada.

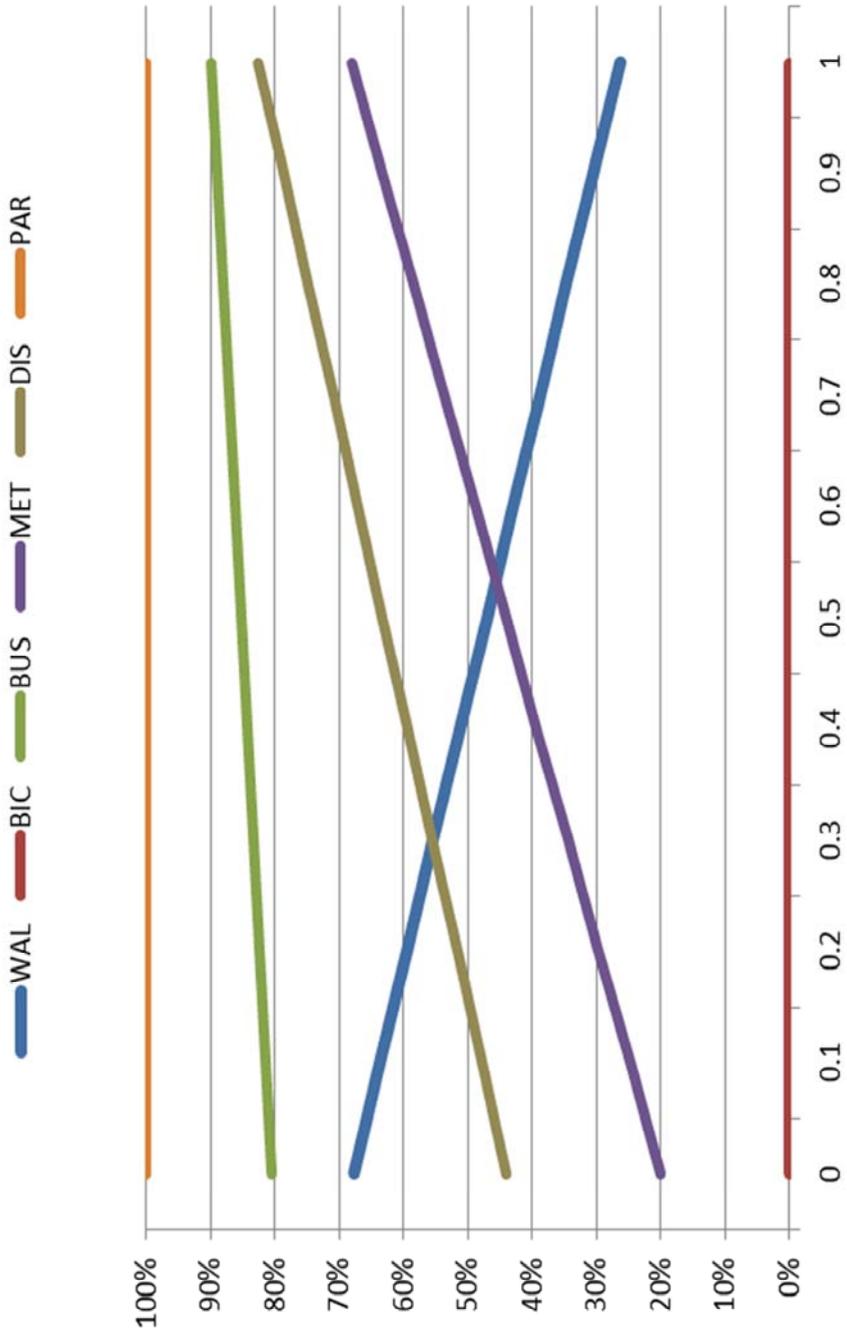


Figura 62 Variación del parámetro Q en función de u

También se puede comprobar si se cumple la condición de ventaja aceptable conforme varía el parámetro  $v$ . Los resultados se muestran en la [tabla 47](#).

**Tabla 47 Comprobación de la condición de ventaja aceptable para distintos valores de  $v$**

$v$	$Q_1$	$Q_2$	$\Delta Q$	$\Delta Q > 0.2?$
<b>0</b>	0.0000	0.1998	0.1998	NO
<b>0.1</b>	0.0000	0.2480	0.2480	SÍ
<b>0.2</b>	0.0000	0.2961	0.2961	SÍ
<b>0.3</b>	0.0000	0.3443	0.3443	SÍ
<b>0.4</b>	0.0000	0.3925	0.3925	SÍ
<b>0.5</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.4406</b>	<b>0.4406</b>	SÍ
<b>0.6</b>	0.0000	0.4295	0.4295	SÍ
<b>0.7</b>	0.0000	0.3881	0.3881	SÍ
<b>0.8</b>	0.0000	0.3467	0.3467	SÍ
<b>0.9</b>	0.0000	0.3053	0.3053	SÍ
<b>1</b>	0.0000	0.2639	0.2639	SÍ

La solución obtenida cumple en todos los casos, salvo para valores de  $v$  iguales a 0, es decir, en situaciones de veto estricto, muy alejadas de la solución de consenso.

## **CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES**



## Capítulo 6. Conclusiones

El automóvil ha sido el elemento principal en la definición de la morfología de las ciudades europeas actuales. Ha sido el medio de transporte en torno al cual se han desarrollado las ciudades. Fruto de este desarrollo urbano se han producido impactos negativos de gran magnitud. El primero a destacar es la dispersión urbana; el uso del automóvil permite mayores distancias entre los centros de actividades, por lo que las ciudades se expanden sin límite, ocupando el territorio. La dispersión urbana produce aumentos en las distancias que deben recorrer los ciudadanos para realizar sus actividades diarias, a la vez que produce otros impactos, como el efecto barrera, que aísla zonas del territorio, rodeadas de vías que no se pueden cruzar si no se dispone de vehículos motorizados.

Para realizar todos estos viajes es necesario el empleo de una gran cantidad de energía, principalmente a través de combustibles fósiles, por lo que el transporte urbano es productor de un porcentaje significativo de los gases de efecto invernadero. El empleo masivo del vehículo privado también genera otros impactos como ruido, polución y congestión en las áreas urbanas, factores que redundan en detrimento de los ciudadanos.

El gestionar una transición correcta hacia un tipo más sostenible de movilidad urbana es un gran reto para la Unión Europea. Las estrategias a la movilidad juegan un papel primordial en el desarrollo de las ciudades. Tienen un impacto directo en el modo de vida de millones de ciudadanos y del medioambiente que los rodea. Sin embargo, la elección de las mejores soluciones a la movilidad no es simple, pues la movilidad es un ecosistema en el cual hay múltiples factores, engarzados entre sí, que afectan a múltiples actores, cada uno de ellos con diferentes motivaciones, a veces contrapuestas a las de los demás. La elección de las mejores estrategias tiene que realizarse teniendo en cuenta múltiples criterios, tangibles e intangibles.

Por tanto, un proceso de toma de decisiones estructurado, capaz de funcionar combinando ambos tipos de criterios cobra especial relevancia. El sistema de ayuda a la toma de decisiones aplicado en esta tesis es un modelo híbrido integrando el método Delphi, el AHP y el método VIKOR.

El método Delphi aporta la interacción entre expertos en varias fases, así como la preservación del anonimato, a fin de conseguir objetividad en los juicios. La automatización del proceso usando los cuestionarios anónimos es fundamental para alcanzar el consenso necesario, obteniendo las conclusiones por medio del trabajo colectivo. El método AHP parte de las respuestas de los expertos, y mediante el análisis jerárquico otorga los pesos correspondientes a los criterios. El AHP además proporciona un análisis de consistencia que permite desechar las respuestas incoherentes, dando un grado adicional de seguridad a los resultados obtenidos.

La estructura jerárquica de los criterios y subcriterios se ha diseñado mediante las respuestas anónimas de los expertos. La movilidad no puede disociarse de la sostenibilidad, por lo que deberá tenerse en cuenta los términos económicos, ambientales y sociales, más conocidos como triple resultado, o triple bottom line (TBL) en inglés.

La importancia relativa de la estructura jerárquica de criterios y subcriterios está gráficamente representada en la [figura 63](#). Según la opinión de los expertos, el subcriterio más importante en la movilidad urbana es el ruido, seguido del tiempo de viaje y de la polución. En cuarto lugar se colocan los costes del desplazamiento, seguido muy de cerca por los beneficios a la salud y por los costes de mantenimiento, considerados más importantes que los costes iniciales y medioambientales. Completan la lista los costes iniciales, los costes medioambientales, el confort y la huella de carbono.

El ruido y la polución son las externalidades más importantes que aprecia el ciudadano, cuyo impacto es conocido, por lo que son razonables las posiciones obtenidas. Del mismo modo, para el usuario los dos parámetros más importantes son el tiempo del viaje y el coste

que supone, que pueden condicionar la elección del medio de transporte empleado. Esto no sucede con el parámetro de confort, que los expertos consideran como accesorio, por lo que ocupa la penúltima posición. Otro parámetro bien considerado, con valores cercanos al 12% son los beneficios a la salud, criterio a tener en cuenta, cada vez más para contrarrestar los problemas del sedentarismo. Los expertos otorgan importancia similar a los costes de mantenimiento, que priman en importancia sobre los costes iniciales y los costes medioambientales. En último lugar se sitúa el impacto de la huella de carbono, quizás este parámetro recibe menos importancia de la que debería. Puede explicarse este aspecto en el hecho de que este concepto no esté completamente implantado en nuestro país. Es necesario indicar que esta metodología depende de la importancia dada a cada criterio por los encuestados.

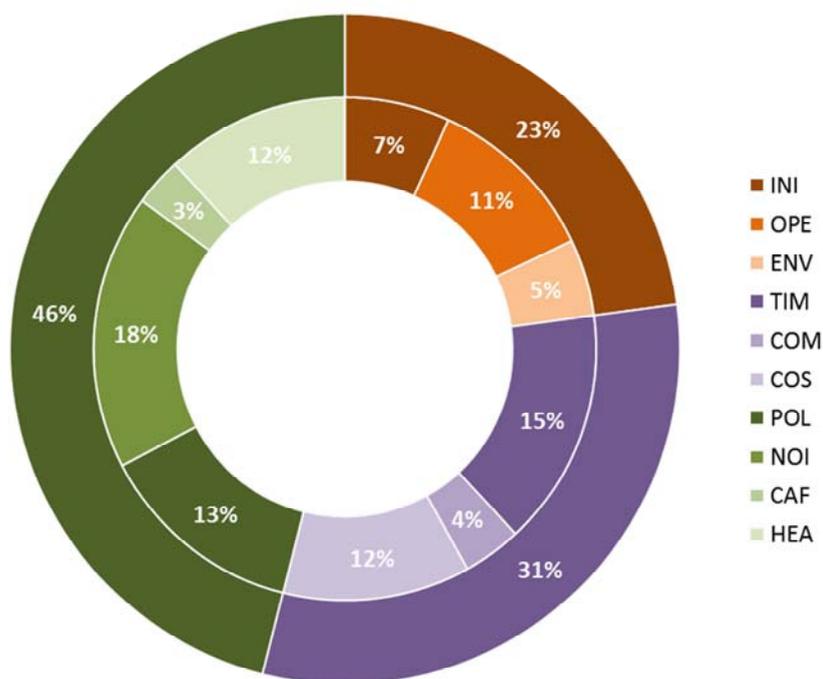


Figura 63 Diagrama de la ponderación de los criterios y subcriterios dentro de la jerarquía

Obtenida la estructura jerárquica se reenvía un tercer cuestionario al panel de expertos, de modo análogo al segundo panel. Las respuestas del tercer cuestionario se recopilan en la matriz de decisión, que recoge la prioridad de cada mejora con respecto a cada subcriterio. La representación gráfica de la matriz, mostrada en la [figura 64](#), es una poderosa herramienta para comparar las mejoras, y para entender los resultados finales del modelo.

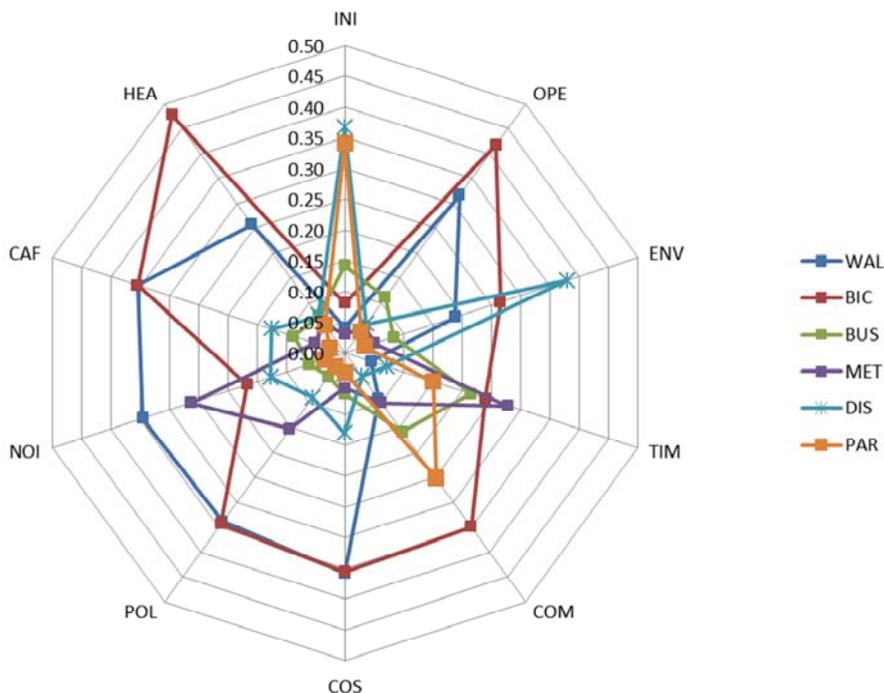


Figura 64 Representación gráfica de la matriz de prioridad

En último lugar toma la palabra el método VIKOR, que aporta al proceso estabilidad y consenso en la toma de decisiones. El método parte de la matriz de decisión resultado del AHP a partir de las respuestas del Delphi, y para cada solución se obtienen dos parámetros "S", utilidad, "R", rechazo, cuya combinación mediante el consenso proporciona el valor "Q", que sirve para clasificar las soluciones.

La mejor solución según el modelo híbrido es la mejora de la red de carriles bici. Inspeccionando el gráfico, esta mejora consigue los mejores resultados en varios subcriterios. Es también una solución muy equilibrada, pues sólo puntúa mal en los costes iniciales. Esta mejora está puntuada la primera en el parámetro S, utilidad de la mayoría, y también en el parámetro R, rechazo individual.

La segunda mejor clasificada es la mejora relacionada con el transporte subterráneo. Esta solución no es tan equilibrada como la anterior. Consigue buenas puntuaciones en criterios relevantes como el tiempo, el ruido y la polución pero falla en los costes de mantenimiento, de viaje y en la salud.

La tercera clasificada es la peatonalización del centro de Valencia. Los resultados son similares para la mejora de los carriles bici, y la peatonalización es la segunda clasificada en el parámetro S, pero esta mejora se ve severamente penalizada por el subcriterio tiempo.

La cuarta mejora es la subvención del transporte público. Esta mejora consigue puntuaciones medias en varios de los subcriterios. Tiene buenos resultados en costes iniciales y medioambientales, pero estos son subcriterios secundarios. Su equilibrio le permite quedar clasificada en el número 3 en el parámetro R.

La quinta mejora es el desarrollo de la red de autobuses, con resultados parecidos a la solución anterior. Esta solución se ve penalizada por los malos resultados en los subcriterios sostenibles (polución, ruido, huella de carbono y salud).

La última mejora es el aparcamiento público gratuito durante la primera hora, que sólo obtiene buenos resultados en subcriterios secundarios (costes iniciales y confort).

Como se ha demostrado, el sistema de ayuda a la toma de decisiones propuesto establece un marco que resuelve problemas de toma de decisiones de movilidad de un modo sistemático, y ayuda en la selección de las estrategias óptimas para alcanzar la movilidad sostenible.

A partir del contenido de esta tesis, se pueden abrir varios campos de investigación:

1. El método híbrido considera como mejor solución la mejora de la red de carriles bici. Una línea de investigación sería el análisis de la red para estimar cuáles serían los recorridos a implantar que produjeran mayor beneficios a la movilidad.
2. Actualmente el empleo de la bicicleta es secundario en comparación con el del transporte motorizado en la ciudad de Valencia. Una línea de investigación consistiría en obtener aplicando esta metodología las acciones necesarias para potenciar este uso.
3. El método es universal y objetivo, por lo que se puede aplicar en cualquier otra ciudad.
4. Las nuevas tecnologías permiten la gestión de un gran número de datos de un modo automático y sin coste, una línea de investigación podría consistir en adaptar el método de realización de encuestas a través de internet para agilizar el proceso.
5. Se puede estudiar la movilidad enfocada a los colectivos más vulnerables, tales como ancianos y personas con movilidad reducida.

## CAPÍTULO 7. REFERENCIAS



## Capítulo 7. Referencias

- Alcantara, E., 2010. *Análisis de la movilidad urbana. Espacio, medio ambiente y equidad Corporación Andina de Fomento*
- Alquères, C. A., Martines, G. L., 1999. *As relações entre o conforto, a capacidade, o desempenho e o consumo no planejamento de sistemas de transporte. Trabajo presentado en El Congreso CLATPU, Caracas, (1999).*
- Alvarez, I., Garayar, A., Calvo, J.A., 2015. *Development of sustainability reports for farming operations in the Basque Country using the Delphi method. Spanish Accounting Review 18, pages 44-54.*
- Armah, F. A., Yawson, D. O., Pappoe, A. N. M., 2010. *A systems Dynamics Approach to Explore Traffic Congestion and air pollution link in the city of Accra, Ghana. Sustainability 2, pages 252-265.*
- AVIS, 2012. <http://www.eleconomista.es/ecomotor/motor/noticias/4412226/11/12/Viajar-en-coche-puede-contaminar-hasta-cinco-veces-mas-que-en-un-avion-.html> (accesed 09.26.15)
- Ayachi, F.S., Dorey, J., Guastavino, C., 2015. *Identifying factors of bicycle comfort: An online survey with enthusiast cyclists. Applied Ergonomics 46, Part A, pages 124-136.*

Ayuntamiento de Valencia, 2012. Mapa estratégico de Ruido del Término Municipal de Valencia 2012.

Banas, C., 2010. <http://www.urbanophile.com/2010/04/27/chuck-banas-this-is-sprawl/> (accesed 09.26.15)

Berrittella, M., Certa, A. Enea, M., Zito, P., 2008. Transport policy and climate change: How to decide when experts disagree. *Environmental Science & Policy 11*, pages 307-314.

Canto-Perello, J., Curiel-Esparza, J., 2013. Criticality and threat analysis on utility tunnels for planning security policies of utilities in urban underground space. *Expert Systems with Applications 40*, pages 4707-4714.

Canto-Perello, J., Martinez-Garcia, M.P., Curiel-Esparza, J., Martin-Utrillas, M., 2015. Implementing Sustainability Criteria for Selecting a Roof Assembly Typology in Medium Span Buildings. *Sustainability 7*, pages 6854-6871.

Carpooling, 2015. <http://www.buenasterapias.es/carpooling-compartir-coche-esta-de-moda/> (accesed 09.26.15)

Carter, D., 2011. <http://www.urbanophile.com/2012/01/04/this-is-sprawl-pittsburgh-edition/> (accesed 09.26.15)

- Casanova, J., 2005. *Jornadas sobre Movilidad y Reducción de Emisiones. Madrid, Ministerio de Medio Ambiente, 2005.*
- Chang, C., Chung, C., Sheu, J., Zhuang, Z., Chen, H., 2014. *The optimal dual-pricing policy of mall parking service. Transportation Research Part A: Policy and Practice 70, Pages 223-243.*
- Chester, M., Horvath, A., 2012. *High-speed rail with emerging automobiles and aircraft can reduce environmental impacts in California's future. Environmental Research Letters 7 034012.*
- Chiesa, M., Perrone, M. G., Cusumano, N., Ferrero, L., Sangiorgi, G., Bolzacchini, E., Lorenzoni, A., Ballarin Denti, A., 2014. *An environmental, economical and socio-political analysis of a variety of urban air-pollution reduction policies for primary PM10 and NO<sub>x</sub>: The case study of the Province of Milan (Northern Italy). Environmental Science & Policy 44, pages 39-50.*
- Commision of The European Communities, 1999. *Cycling. The way ahead for towns and cities.*
- Commision of The European Communities, 2000. *En bici, hacia ciudades sin malos humos.*

Commision of The European Communities, 2007. Green Paper - Towards a new culture for urban mobility.

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52007DC0551> (accessed 07.29.15)

Creutzig, F., Mühlhoff, R., Römer, J., 2012. Decarbonizing urban transport in European cities: four cases show possibly high co-benefits. *Environmental Research Letters* 7 044042.

Cunha, R., Ferreira N., Pires, J., 2015 Measuring the sustainability of urban water services. *Environmental Science & Policy* 54, pages 142-151.

Curiel-Esparza J., Canto-Perello J., Calvo, M.A., 2004. Establishing sustainable strategies in urban underground engineering. *Science and Engineering Ethics* 10, pages 523–530.

Curiel-Esparza, J., Canto-Perello, J., 2013. Selecting utilities placement techniques in urban underground engineering. *Archives of civil and mechanical engineering* 13, pages 276–285.

Curiel-Esparza, J., Cuenca-Ruiz, M. A., Martin-Utrillas, M., Canto-Perello, J., 2014. Selecting a Sustainable Disinfection Technique for Wastewater Reuse Projects. *Water* 6, pages 2732–2747.

- Dalkey, N., Brown, B., Cochran, S., 1969. The Delphi Method III: Use of self-ratings to improve group estimates. *The Rand Corporation (Santa Mónica, California) RM-6115-PR*.
- Dalkey, N., Helmer, O., 1963. An experimental application of the Delphi method to the use of experts. *Management Science* 9 (3), pages 458-467.
- De Borger, B., Proost, S., 2015. The political economy of public transport pricing and supply decisions. *Economics of Transportation* 4, Issues 1-2, pages 95-109.
- De Groot, J.I.M., Schitema, G., 2012. How to make the unpopular popular? Policy characteristics, social norms and the acceptability of environmental policies. *Environmental Science & Policy* 19-20, pages 100-1070
- De Hartog J., Boogaard H., Nijland H., Hoek G., 2010. Do the health benefits of cycling outweigh the risks? *Environmental Health Perspectives* 118, pages 1109-16.
- Duckstein, L., Opricovic, S., 1980. Multiobjective optimization in river basin development. *Water Resources Research* 16 (1), pages 14-20.
- EMT Valencia, 2015. [www.emtvalencia.es](http://www.emtvalencia.es) (accessed 09.26.15)

Enbicipormadrid.es, 2013. <http://www.enbicipormadrid.es/2013/12/por-que-los-planes-de-movilidad-no.html> (accessed 09.26.15)

Ermagun, A., Samimi, A., 2015. Promoting active transportation modes in school trips. *Transport Policy* 37, pages 203-211.

ESPON, 2012. [http://www.espon.eu/main/Menu\\_Publications/Menu\\_MapsOfTheMonth/map1401.html](http://www.espon.eu/main/Menu_Publications/Menu_MapsOfTheMonth/map1401.html) (accessed 09.26.15)

European Commission: Brussels, Belgium, 2002. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise - Declaration by the Commission in the Conciliation Committee on the Directive relating to the assessment and management of environmental noise.

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32002L0049> (accessed 07.29.15)

European Environmental Agency, 2012.

<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/population-growth-and-the-growth-of-built-up-areas-mid-1950s-to-late-1990s-selected-european-cities/figure-04-urban-sprawl.eps> (accessed 09.26.15)

European Environmental Agency, 2012. *The contribution of transport to air quality. EEA Report no. 10/2012.*

<http://www.eea.europa.eu/publications/transport-and-air-quality-term-2012> (accessed 10.17.15)

European Environmental Agency, 2013. *A closer look at urban transport. TERM 2013: transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe. EEA Report no. 11/2013.*

<http://www.eea.europa.eu/publications/term-2013> (accessed 10.17.15)

European Environmental Agency, 2014a. *Air quality in Europe – 2014 report. EEA Report no. 5/2014.*

<http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2014> (accessed 10.17.15)

European Environmental Agency, 2014b. *Focusing on environmental pressures from long-distance transport. TERM 2014: transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe. EEA report no. 7/2014.*

<http://www.eea.europa.eu/publications/term-report-2014> (accessed 10.17.15)

Faucheux, S., Hue, C., 2001. *From irreversibility to participation: towards a participatory foresight for the governance of collective environmental risks. Journal of Hazardous Materials 86 (1-3), pages 223-243.*

Firnkorn, J., Müller, M., 2015. Free-floating electric carsharing-fleets in smart cities: The dawning of a post-private car era in urban environments? *Environmental Science & Policy* 45, pages 30-40

Forman, E., Peniwati, K., 1998. Aggregating individual judgments and priorities with the Analytic Hierarchy Process. *European journal of Operational Research* 108 (1), pages 165-169.

Fosgerau, M., Lindsey, R., 2013. Trip-timing decisions with traffic incidents. *Regional Science and Urban Economics* 43, pages 764-782.

García, B., Garrido, F.J. 2003. La contaminación acústica en nuestras ciudades. *Fundación la Caixa*.

García, V., Aquino, S., Guzmán, A., Medina, A., 2012. El uso del método Delphy como estrategia para la valoración de indicadores de calidad en programas educativos a distancia. *Revista Calidad en la Educación Superior* 3, pages 200-222.

Goldemberg, J., 1998. Energia, Meio ambiente e desenvolvimento. *Edusp/Cesp, Sao Paulo*.

Gong, C., Zhang, S., Zhang, F., Jiang, J., Wang, X., 2014. An Integrated Energy-Efficient Operation Methodology for Metro Systems Based on a Real Case of Shanghai Metro Line One. *Energies* 7 (11), pages 7305-7329.

- Gordon, T., Helmer-Hirschberg, O., 1964. Report on a Long-Range Forecasting Study. Document P-2982 The RAND Corporation, Santa Monica, California.
- Gosse, C. A., Clarens, A. F., 2013. Quantifying the total cost of infrastructure to enable environmentally preferable decisions: the case of urban roadway design. *Environmental Research Letters* 8 015028.
- Hagerstrand, T., 1970. What about people in regional sciences? *Paperes of the Regional Science Association* 24, pages 7-21.
- He, S., 2013. Does flexitime affect choice of departure time for morning home-based commuting trips? *Evidence from two regions in California. Transport Policy* 25, pages 210-221.
- Helmer, O., Rescher, N., 1959. On the epistemology of inexact act sciences. *Management Science* 6 (1), pages 25-52.
- Holmgren, J., 2014 A strategy for increased public transport usage – The effects of implementing a welfare maximizing policy. *Research in Transportation Economics* 48, pages 221-226.
- Holtmark, B., Skonhøft, A., 2014. The Norwegian support and subsidy policy of electric cars. Should it be adopted by other countries? *Environmental Science & Policy* 42, pages 160-168.

- Hsu, C. C., Sandord, B. A., 2007. The Delphi technique: Making sense of consensus. *Practical Assessment. Research and Evaluation* 12 (10), pages 1-7.
- Huang, Z., Liu, X., 2014. A Hierarchical Approach to Optimizing Bus Stop Distribution in Large and Fast Developing Cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 3(2), pages 554-564.
- Huo, J., Yang, D., Zhang, W., Wang, F., Wang, G., Fu, Q. 2015. Analysis of influencing factors of CO<sub>2</sub> emissions in Xinjiang under the context of different policies. *Environmental Science & Policy* 45, pages 20-29.
- Jackson, J., Holden, M., 2013. Sustainable Development Compromise[d] in the Planning of Metro Vancouver's Agricultural Lands—the Jackson Farm Case. *Sustainability* 5(11), pages 4843-4869.
- Jenelius, E., 2012. The value of travel time variability with trip chains, flexible scheduling and correlated travel times. *Transportation Research Part B: Methodological* 46, pages 762-780.
- Kamal, M., Al-Subhi, Al-H., 2001. Application of the AHP in Project management. *International Journal of Project Management* 19, pages 19-27.
- Katoshevski-Cavari, R., Arentze, T., Timmermans, H., 2010. A multi-agent planning support-system for assessing externalities of urban form scenarios: results of case studies. *Sustainability* 2, pages 2253-2278.

- Kim, C., Hong, T., Kim, J., Kim., D., Seo, D., 2015. A Process for the Implementation of New Renewable Energy Systems in a Building by Considering Environmental and Economic Effect. *Sustainability* 2015, 7(9), pages 12870-12890.
- Landeta, J., Barrutia, J., 2011. People consultation to construct the future: a Delphi application. *International Journal of Forecasting* 27 (1), pages 134-151.
- Laverty, A., Millett, C., 2015. Potential impacts of subsidised bus travel for older people. *Journal of Transport & Health* 2, Issue 1, pages 32-34.
- Linstone, H., Turoff, M., 1975. The Delphi method: Techniques and applications. ISBN 0201042940. Addison-Wesley Educational Publishers Inc.
- Loukopoulos, P., Jakobsson, C., Gärling, T., Schneider, C.M., Fujii, S., 2005. Public attitudes towards policy measures for reducing private car use: evidence from a study in Sweden. *Environmental Science & Policy* 8, pages 57-66.
- Lu, X., Liu, T., Huang, H., 2015. Pricing and mode choice based on nested logit model with trip-chain costs. *Transport Policy* 44, pages 76-88.

- Ma, Z., Shao, C., Ma, S., Ye, Z., 2011. Constructing road safety performance indicators using Fuzzy Delphi Method and Grey Delphi Method. *Expert Systems with Applications* 38(3), pages 1509–1514.
- Maibach M., Schenkel P., Peter D., Gehrig S., 1997. Environmental indicators in transport – measures for ecological comparisons between various transport means, *INFRAS, Zurich*.
- Malmgren, L., Mjörnell, K., 2015. Application of a Decision Support Tool in Three Renovation Projects. *Sustainability* 2015 7(9), pages 12521-12538.
- Marchais-Roubelat, A., and Roubelat, F., 2011. The Delphi method as a ritual: Inquiring the Delphi Oracle. *Technological Forecasting and Social Change* 78(9), pages 1491-1499.
- Martin-Utrillas, M., Azorin-Carrion, A., Canto-Perello, J., Curiel-Esparza, J., 2015a. Multi-criteria decision-making model for establishing the optimal typology for clinker storage silos. *ZKG International* 68, pages 50–58.
- Martin-Utrillas, M., Reyes-Medina, M., Curiel-Esparza, J., Canto-Perello, J., 2015b. Hybrid method for selection of the optimal process of leachate treatment in waste treatment and valorization plants or landfills. *Clean Technologies and Environmental Policy* 17 (4), pages 873-885.

- Martin-Utrillas, M., Juan-García, F., Curiel-Esparza, J., Canto-Perello, J., 2015c. Optimal infrastructure selection to boost regional sustainable economy. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 22 (1), pages 30-38.
- Marcucci, E., Gatta, V., Scaccia, L., 2015. Urban freight, parking and pricing policies: An evaluation from a transport providers' perspective. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 74, pages 239-249.
- Mayeres, I., Ochelen S., Proost, S., 1996. The marginal external costs of urban transport. *Transportation Research D, Volume 1*, pages 111-130.
- Melero, T., Pinto, C.C., 2004. Barometer of Public Transport in the European Metropolitan Areas 2002. Paris: *European Metropolitan Transport Authorities (EMTA)*.
- Metrovalencia, 2015. <http://www.metrovalencia.es/page.php?page=145> (accessed 09.26.15)
- Mingardo, G. Van Wee, B., Rye, T., 2015. Urban parking policy in Europe: A conceptualization of past and possible future trends. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 74, pages 268-281.

Ministerio de Fomento, 2009. *Estrategia española de movilidad sostenible. Madrid: Ministerio de Fomento.*

Ministerio de Medio Ambiente, 2005. *Observatorio de la movilidad metropolitana 2003. Madrid: Ministerio de Medio ambiente.*

Ministerio de Medio Ambiente, 2006. *La calidad del aire en España: bases para una estrategia nacional. Madrid: Ministerio de Medio ambiente.*

Minx, J., Baiocchi, G., Wiedman, T., Barrett, J., Creutzig, F., Feng, K., Förster, M., Pichler, P., Weisz, H., Hubacek, K., 2013. *Carbon footprints of cities and other human settlements in the UK. Environmental Research Letters, 8, 035039.*

Morris, E., Guerra, E., 2015. *Are we there yet? Trip duration and mood during travel. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 33, pages 38-47.*

Novakowski, N., Wellar, B., 2008. *Using the Delphi technique in normative planning research: Methodological design considerations. Environment and Planning A 40, pages 1485-1500.*

NSW Government Transport State Transit, 2014. [Environmental fact sheet](#).

<http://www.statetransit.info/bus-fleet/buses-and-the-environment/fact-sheet> (accessed 09.26.15)

Okoli, C., Pawlowski, S., 2004. The Delphi method as a research tool: An example, design considerations and applications. *Information and Management* 42 (1), pages 15–29.

Oñate, N., Martínez, L., 1990. Utilización del método Delphy en la pronosticación: Una experiencia inicial. *Instituto de Investigaciones Económica. Cuba: JUCEPLAN*.

Opricovic, S., Tzeng, G.H., 2004. The Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research* 156 (2), pages 445–455.

Opricovic, S., Tzeng, G.H., 2007. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. *European Journal of Operational Research* 178, pages 514–529.

Opricovic, S., 1990. Programski paket VIKOR za visekriterijumsko kompromisno rangiranje. *SYM-OP-IS*

Opricovic, S., 2009. A Compromise Solution in Water Resources Planning. *Water Resources Management* 23, pages 1549-1561.

Orecchini, F., Santiangeli, A., Valitutti, V., 2011. Sustainability Science: Sustainable Energy for Mobility and Its Use in Policy Making. *Sustainability* 3 (10), pages 1855-1865.

PEW Research,2013. <http://visualizenashua.com/2013/06/11/how-our-cities-are-shaping-us/> (accessed 09.26.15)

RACC, 2012. Auditorías de movilidad. Aparcamientos públicos subterráneos. Valencia. Julio 2012. *Fundación RACC, Barcelona*.

Ragetti, M. S., Tsai M., Braun-Fahrländer, C., De Nazelle, A., Schindler, C., Ineichen, A., Ducret-Stich, R. E., Perez, L., Probst-Hensch, N., Künzli, N., Phuleria, H. C., 2014. Simulation of Population-Based Commuter Exposure to NO<sub>2</sub> Using Different Air Pollution Models. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(5), pages 5049-5068.

REVE, 2012. <http://www.evwind.com/2012/09/03/el-renault-twizy-el-vehiculo-electrico-mas-vendido-en-europa/> (accessed 09.26.15)

Richey, J., Mar, B., Horner, R., 1985. The Delphi technique in environmental assessment: Implementation and effectiveness. *Journal of Environmental Management* 21, pages 135–146.

- Rojas-Rueda D. De Nazelle, A., Tainio, M., Nieuwenhuijsen, M. J., 2011. The health risks and benefits of cycling in urban environments compared with car use: health impact assessment study. *British Medical Journal* 343, d4521.
- Saaty, T.L., 1980. The analytic hierarchy process. ISBN 0070543712. McGraw Hill Higher Education. New York.
- Saaty, T.L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences* 1, pages 83–98.
- Saaty, T.L., 2012. Decision Making for Leaders. In The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World, 3rd ed.; University of Pittsburgh: Pittsburgh, PA, USA.
- Saaty, T.L.; Ozdemir, M., 2003. Why the Magic Number Seven Plus or Minus Two. *Mathematical and Computer Modelling* 38, pages 233–244.
- Saaty, T.L., Sagir, M., 2012. Global awareness, future city design and decision making. *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 21 (3), pages 337-355.
- Schauer, J. J., 2011. Human behavior research and the design of sustainable transport systems. *Environmental Research Letters* 6 031003.

Schmidt-Thomé, K., Haybatollahi, M., Kytta, M., Korpi, J., 2013. The prospects for urban densification: a place-based study. *Environmental Research Letters* 8 025020.

Sheng, N., Wa Tang, U., 2011. Spatial analysis of urban form and pedestrian exposure to traffic noise. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 8, pages 1977-1990.

Spanish Government, 2009. Estrategia española de Movilidad Sostenible.

[http://www.fomento.es/MFOM/LANG\\_CASTELLANO/\\_ESPECIALES/CALIDADAMBIENTAL/](http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/_ESPECIALES/CALIDADAMBIENTAL/) (accessed 07.29.15)

Statnikov, R.B., Bordestsky, A., Statnikov, A., 2005. Multi-criteria analysis of real-life engineering optimization problems: statement & solution. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications* 63, pages 658-696.

Sustainable prosperity, 2013. <http://thecostofsprawl.com/> (accessed 09.26.15)

Syamsuddin, J., Hwang J. 2010. The use of AHP in security policy decision making: an open office calc application. *Journal of Software* 5(10), pages 1162-1169.

- Teknomo, K., 2006 Analytic hierarchy process (AHP) Tutorial. <http://people.revoledu.com/kardi/tutorial/AHP/> (accessed 08.30.2015)
- Tian, L., Huang, H., 2015. Modeling the modal split and trip scheduling with commuters' uncertainty expectation. *European Journal of Operational Research* 244, pages 815-822.
- Tolley, R., Turton, B., 1995. Transport systems, policy and planning, a geographical approach. *Longman, UK*.
- Transport for London, 2011. <http://content.tfl.gov.uk/congestion-charge-zone-map.pdf> (accessed 09.26.15)
- Triantaphyllou, E., 2002. Multi-Criteria Decision Making Methods: A comparative study. *Applied Optimization* 44, pages 5-21.
- Triantaphyllou, E., Mann S. H., 1995. Using the Analytic Hierarchy Process for decision making in engineering applications: Some challenges. *International Journal of Industrial Engineering: Applications & Practice* 2 (1), pages 35-44.
- UITP, 2003. Billete al futuro: las 3 paradas de la movilidad sostenible. *Heather Allen. Bruselas*.

United Nations, 1992. *United Nations Conference on Environment and Development. Rio de Janeiro, Brazil, 3 to 14 June 1992.*

Urban, J., Vojtech, M., 2013. *Linking Traffic Noise, Noise Annoyance and Life Satisfaction: A case Study. International Journal of Environmental Research and Public Health 10, pages 1895-1915.*

U.S. Environmental Protection Agency, 2009. *Inventory of Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2007.*

U.S.Government, 2000. <https://www.bostonfed.org/economic/nerr/rr2000/q1/wass00-1.htm> (accessed 09.26.15)

Valenbisi, 2015. [www.valenbisi.es](http://www.valenbisi.es) (accessed 09.26.15)

Vanderleest, K., 2012. <https://www.behance.net/gallery/3404325/Together-Stop-Urban-Sprawl> (accessed 09.26.15)

Vargas, L.G., 1990. *An overview of the analytic hierarchy process and its applications. European Journal of Operational Research 48, pages 2-8.*

Varma, A., Souba, J., Faiz. A, Sinha, K.C., 1992. *Environmental considerations of land transport in developing countries. Transport Reviews 12 (2), pages 101-113.*

- Vermote, L., Macharis, C., Hollevoet, J. Putman, K. 2014. Participatory evaluation of regional light rail scenarios: A Flemish case on sustainable mobility and land-use. *Environmental Science & Policy* 37, pages 101-120.
- Wahlgren, L., Schantz, P., 2014. Exploring Bikeability in a Suburban Metropolitan Area Using the Active Commuting Route Environment Scale (ACRES). *International Journal of Environmental Research and Public Health* 11(8), 8276-8300.
- Wehn, U., Rusca, M., Evers, J., Lanfranchi, V., 2015. Participation in flood risk management and the potential of citizen observatories: A governance analysis. *Environmental Science & Policy* 48, pages 225-236.
- World Health Organization, 2004. *World Report on Road Traffic Injury Prevention, Ginebra.*
- World Resources Institute, 2014. *Climate Analysis Indicators Tool (CAIT) 2.0: WRI's climate data explorer.*  
<http://cait.wri.org> (accessed 05.15.14)
- Yu, P.L., 1973. A class of solutions for Group Decision Problems. *Management Science* 19 (8), pages 936-946.

- Zahavi, J., 1976. Travel characteristics in cities of developed and developing countries. *World Bank Staff Working paper 52, Washington, D.C.*
- Zainol, R, Ahmad, F., Nordin, N. A., Aripin, A. W. M., 2014. Evaluation of users'satisfaction on pedestrian facilities using pair-wise comparison approach. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 18 012175.*
- Zakaria, J., Ujang, N., 2015. Comfort of Walking in the City Center of Kuala Lumpur. *Procedia - Social and Behavioral Sciences 170 (27), pages 642–652.*
- Zhang, K., Zhou, K., Zhang, F., 2014. Evaluating bus transit performance of Chinese cities: Developing an overall bus comfort model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice 69, pages 105–112*
- Zeleny, M., 1973. Compromise Programming in Cochrane J.L. and M. Zeleny (Eds). *Multiple Criteria Decision Making. University of South Carolina Press, Columbia.*
- 20 Minutos, 2012. <http://cdn.20m.es/img2/recortes/2012/04/10/55841-521-550.jpg> (accessed 07.29.15)

## **ANEXO 1. PUBLICACIÓN**



## ANEXO 1 PUBLICACIÓN

Durante la realización de la tesis doctoral se ha redactado un artículo que fue aceptado el 22 de octubre de 2015 con número DOI [doi:10.1016/j.envsci.2015.10.015](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.10.015) para su publicación en una revista de distribución internacional, *Environmental Science & Policy*, con ISSN 1462-9011.

Según los datos obtenidos el 22 de octubre de 2015, las características de la revista son:

<b>Full Journal Title</b>	Environmental Science & Policy	<b>Eigenfactor® Metrics</b>	
<b>ISO Abbrev. Title</b>	Environ. Sci. Policy	<b>Eigenfactor® Score</b>	<b>0.01114</b>
<b>JCR Abbrev. Title</b>	ENVIRON SCI POLICY	<b>Article Influence® Score</b>	<b>1.280</b>
<b>ISSN:</b>	1462-9011	<b>Issues / Year</b>	10
<b>Language:</b>	English	<b>Journal Country/Territory:</b>	UNITED STATES
<b>Publisher:</b>	Elsevier Sci. Ltd.		
<b>Journal Rank in Categories</b>	For 2014, the journal <i>Environmental Science &amp; Policy</i> has an Impact Factor of <b>3.018</b>		

El título de la publicación es "*Prioritization by consensus of enhancements for sustainable mobility in urban areas*". Se adjunta la primera y la última página del artículo como referencia.



## Prioritization by consensus of enhancements for sustainable mobility in urban areas



Jorge Curiel-Esparza<sup>a</sup>, Julio L. Mazario-Diez<sup>b</sup>, Julian Canto-Perello<sup>c,\*</sup>, Manuel Martín-Utrillas<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Physical Technologies Center, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, Spain

<sup>b</sup> Department of Applied Physics, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, Spain

<sup>c</sup> Department of Construction Engineering and Civil Engineering Projects, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, Spain

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 31 July 2015

Received in revised form 20 October 2015

Accepted 22 October 2015

#### Keywords:

Sustainable mobility

Transport

Multicriteria decision making

AHP

Delphi method

VIKOR

### ABSTRACT

Nowadays the European cities usually present important problems at economic, social and environmental levels. The European Union has published policies to ease this issue, and several European cities are creating sustainable mobility urban plans with the measures which can be taken to improve the mobility system. Transport decisions have direct impact on transit times, urban connectivity, and have also effects in the environment, public health and society. Choosing the best enhancement to implement is a complex decision, depending on tangible and intangible criteria, which have to be taken into account together. A compromise solution that weighs travel quality, cost and sustainability inputs has to be achieved. This research work presents a decision support system to select the optimal sustainability enhancement integrating the Delphi technique with the analytic hierarchy process and the VIKOR method.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### 1. Introduction

During the last decades the European cities have been suffering an important transformation. They have evolved from a multi-functional compact city center to a broad physiognomy center with uses aggregated in specialized zones. This transformation has produced important problems at economic, social and environmental levels (Curiel-Esparza et al., 2004). This new morphology increases mobility operations (Schauer, 2011). The cities have become hotspots of activities, becoming the main drivers of greenhouse gas emissions. Ground transportation is a key factor in the energy consumed, 19% of the global energy demand and 23% of the CO<sub>2</sub> emissions (Gosse and Clarens, 2013). Therefore, any transport enhancement is a crucial political decision as it has direct impact on urban society, changing transit times and urban connectivity. In addition, urban sprawl is not only determinant in traffic, but has also effects in the environment, public health and society (Creutzig et al., 2012). The cities grow at a frantic level

(Matthews, 2013), which implies traffic-related delays in almost all of the world's urban centers, while the carbon emissions from ground transportation are growing more and more. In 2013, the European Environment Agency (EEA) report focused on urban transport pointed out that more than 74% of the EU-27 population was living in urban areas (EEA, 2013). According to this report, 50% of the EU's city dwellers were exposed to traffic noise levels above 55 dB. And between 2009 and 2011, up to 96% of urban population was exposed to fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) concentrations and up to 98% was exposed to O<sub>3</sub> concentrations above World Health Organization recommended levels. The EEA has estimated that the contribution of urban traffic to PM<sub>10</sub> concentration is 35% while it is up to 64% in the case of NO<sub>2</sub> concentrations (EEA, 2012). The last report of the EEA related to air quality in Europe states that the transport sector is the largest contributor to NO<sub>x</sub> emissions, accounting for 46% of total EU-28 emissions in 2012 (EEA, 2014a). In the same report, it is stated that the transport sector has reduced its CO emissions significantly (61% from 2003 to 2012) while the new car sold in 2013 was almost 10% more efficient than in 2010 and the CO<sub>2</sub> emissions decreased from 132 to 127 g between 2012 and 2013 (EEA, 2014b).

In this context, the European Union approved in 2007 a Green Paper on Urban Mobility 'Towards a new culture for urban mobility' (CEC, 2007). This document establishes strategies to fight these

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [jcuriel@fis.upv.es](mailto:jcuriel@fis.upv.es) (J. Curiel-Esparza), [jumadie@cam.upv.es](mailto:jumadie@cam.upv.es) (J.L. Mazario-Diez), [jcantope@est.upv.es](mailto:jcantope@est.upv.es) (J. Canto-Perello), [mgmartin@fis.upv.es](mailto:mgmartin@fis.upv.es) (M. Martín-Utrillas).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2015.10.015>  
1462-9011/© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

- IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 18, 012175, <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012175>.
- Zakaria, J., Ujang, N., 2015. Comfort of walking in the City Center of Kuala Lumpur. *Procedia – Soc. Behav. Sci.* 170 (Z7), 642–652, <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.01.066>.
- Zhang, K., Zhou, K., Zhang, F., 2014. Evaluating bus transit performance of Chinese cities: developing an overall bus comfort model. *Transp. Res. Part A: Policy Pract.* 69, 105–112, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2014.08.020>.