

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Tesis Doctoral

ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS TARIFARIAS PARA LA GESTIÓN DE LA MOVILIDAD EN CARRETERAS METROPOLITANAS

Autor:

Miller Humberto Salas Rondón
Ingeniero Civil

Director de la tesis:

Dr. Francesc Robusté Antón
Catedrático de Transporte de la UPC

Co-director de la tesis:

Dr. Sergi Saurí Marchán
Profesor de Transporte de la UPC

Programa de Doctorado: Gestión del Territorio e Infraestructuras del Transporte
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
Universidad Politécnica de Cataluña - UPC

Barcelona, Septiembre de 2008

A Claudia Patricia

ESTRATEGIAS TARIFARIAS PARA LA GESTIÓN DE CARRETERAS METROPOLITANAS

RESUMEN

La política tarifaria y sus medidas complementarias son parte de una estrategia para reducir los costes externos que produce la movilidad por carretera sobre la sociedad. Desde una perspectiva de sostenibilidad en los países desarrollados, la tarificación constituye un instrumento útil para proporcionar un uso eficiente de las carreteras y, a la vez, captar recursos para el mantenimiento de las mismas y la mejora e innovación del servicio de transporte público. Su aplicación se va extendiendo aunque no está libre de condicionantes conceptuales (una mezcla de tarificación y restricción es óptimo), tecnológicos (tarificación por uso de viario vs. aparcamiento, reconocimiento de matrículas vs. GPS o DSRC), culturales (aversión al pago por uso de las carreteras o del viario público), sociales (credibilidad del sistema, destino de los fondos recaudados, etc.) y de implicaciones en la equidad social.

La tesis presenta una metodología basada en el principio económico de tarificación del coste marginal social a corto plazo y emplea un enfoque de *second-best* (óptimo con restricciones de implantación) para cuantificar la tarifa óptima que determina un nivel de demanda que proporciona la máxima ganancia de bienestar social.

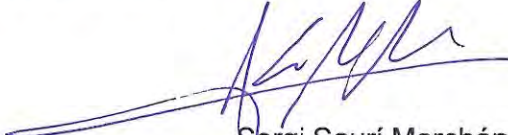
La metodología propuesta se desarrolla para una red de carreteras metropolitanas y permite comparar múltiples esquemas de tarificación a través de la evaluación cuantitativa de diversos indicadores de operación, económicos y sociales. Cinco tipologías tarifarias constituyen las alternativas evaluadas, que pueden agruparse en dos simples (tarifa plana y kilométrica lineal) y tres complejas (kilométrica cóncava, tarifa de acceso más kilométrica y cordón más kilométrica); estas últimas tienen la ventaja de favorecer a los *commuters*, equilibrar las debilidades y fortalezas de las estructuras convencionales y adaptarse a la topología viaria existente. Para la contrastación y selección de la mejor opción tarifaria a implantar, se recurre a un análisis multicriterio basado en el proceso analítico de jerarquización.

La aplicación se ha realizado sobre la red de vías de gran capacidad del Área Metropolitana de Barcelona, modelizada con *TransCAD*. Se define el escenario base y se simula el escenario futuro mediante la instauración de cada una de las estructuras estudiadas durante la hora punta de mayor congestión. Los resultados miden los efectos negativos (pérdida de excedente de usuario) y positivos (ingresos y reducción de costes de congestión) agrupados en la variación del bienestar social total.

Las modelización y su análisis de sensibilidad permiten extraer guías de diseño para la planificación del transporte e implantación de una estrategia tarifaria en áreas urbanas o metropolitanas congestionadas. Se concluye que el uso adecuado de los ingresos incide positivamente en la equidad y que el esquema mixto tarifa de acceso + kilométrica lineal es el más adecuado para la ciudad de Barcelona: con 1,55 euros/vehículo de acceso más 0,09 euros/veh-km se reduce la demanda un 10% en veh-km; la ganancia máxima de bienestar social supera los 93.000 euros/h para una reducción de 11,8% de los veh-km. Finalmente, se sugieren extensiones de la investigación y del modelo desarrollado.



Francesc Robusté Antón
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos



Sergi Saurí Marchán
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

ABSTRACT

Pricing policy and its complementary measures are part of a strategy to reduce the external costs that road mobility causes upon society. From the point of view of sustainability in developed countries, pricing becomes a useful tool in order to make the road system efficient, to raise funds for its maintenance and to improve and innovate the public transportation system. Its application is progressively expanding, though it is not free from neither conceptual determining factors (a mixture of pricing and restriction is the optimum balance), nor technological determinants (pricing by road network vs. parking lot, license plate recognition vs. GPS or DSRC), nor cultural determinants (aversion to pay for road usage or public network), nor social (system credibility, funds raised use, etc.), nor it is free from implications on the social equity.

This thesis presents a methodology based on the economical principle of the social short run marginal cost and it uses a *second-best* approach in order to quantify the optimal toll to determine the demand level that offers the highest increase in social welfare. The proposed methodology is developed for a metropolitan road network and it allows a comparison between multiple pricing schemes by means of quantitatively analyzing the different operation, economic and social indicators. The evaluated alternatives are made up of five pricing systems that can at the same time be grouped into two simple alternatives (flat pricing and linear kilometric) and three complex alternatives (concave kilometric, access toll plus kilometric charge and cordon plus kilometric charge); these latter alternatives favor the *commuters*, they help balancing the weaknesses and strengths of the conventional structures and they adapt themselves to the current road topology. In order to contrast and select the better pricing system to be established, a multicriterial analysis based on the hierarchization analytical process has been used.

This system has been applied to expressways of the Metropolitan Area of Barcelona, modeled with TransCAD. The base scenario is defined and the future scenario is simulated by means of implementing each of the studied structures during the rush hour traffic congestion. The results measure the negative effects (user's surplus loss) and the positive ones (revenues and reduction of congestion costs) grouped within the net social welfare change. Modeling and its sensitivity analysis allow the obtaining of a design guide to transportation planning and to implement a pricing strategy in congested metropolitan or urban areas. The appropriate use of the revenues positively influences the equity and shows that the mixed scheme access toll plus linear kilometric is the most appropriate for the city of Barcelona: with 1.55 €/vehicle per access plus 0.09 €/vehicle the demand is reduced a 10% in vehicles/km; the maximum increase in social welfare exceeds 93,000 €/h for a 11.8% reduction in vehicles/km. Finally, extensions of this research and developed model are suggested.

Francesc Robusté Antón

Sergi Saurí Marchán

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

AGRADECIMIENTOS

La experiencia de vida que me ha dado estos años de estudio y permanencia en esta hermosa ciudad viene acompañada del agradecimiento y recuerdo maravilloso de todas y cada una de aquellas personas que han contribuido para que pudiese hacer realidad este proyecto propuesto años atrás.

Mi afecto y gratitud especiales para el director de tesis Francesc Robusté por creer en mí. Evoco nuestra conversación en Santander durante el curso “El futuro del peaje en el nuevo marco normativo nacional y comunitario” donde me animó a profundizar en temas de gestión de infraestructuras, hace ya cuatro años. A partir de ahí empezó su apoyo y orientación. Y en aquellos momentos difíciles y espinosos por los que atraviesa todo aquel que quiere hacer un mejor trabajo, encontré en Francesc la paciencia, exigencia y motivación para no decaer y seguir adelante hasta alcanzar la meta. También quiero agradecerle por impulsarme en este mundo de la ingeniería del transporte que requiere investigación e innovación continua.

Gracias a Sergi Saurí co-director de la tesis por sus comentarios oportunos dentro del proyecto de I+D+i “Modelo Español para la Tarifación de Carreteras -META” adjudicado al CENIT por el CEDEX como parte del PEIT del Mº de Fomento.

Un reconocimiento especial a la Cátedra abertis por la financiación parcial de esta tesis. Muchas gracias por su colaboración a Sonia, Raquel, Pepe Solano y Joan Altarriba.

Mis agradecimientos para Luis Aramburo una persona excepcional, por su ejemplo, confianza y respaldo inquebrantable. Gracias también para las directivas, docentes, estudiantes y toda la familia de la UPB en Bucaramanga por su voto de confianza. Mi gratitud para Elisa Suarez, Teresita, Aldemar, Juan Carlos, y Roberto por animarme.

Muchas gracias a Miquel por sus comentarios oportunos y manifestaciones de entusiasmo permanente. Extiendo mis agradecimientos a Cesar “tío maco”, Francesc Soriguera, Magín y a todo el grupo del CENIT.

Gracias también para Mayte por su gran labor en la secretaría del departamento y demás compañeros investigadores Carlos, Cristián y Ruperto. También deseo agradecer a Cristina Poblet profesora de la UB por sus asesorías en temas de microeconomía.

Esta tesis va dedicada a mi esposa Claudita, por su confianza, paciencia, don de escucha, interés y soporte constantes. A Rosita (q.e.p.d) gracias por su sacrificio y convicción. A mis padres, hermanos y Juanfer por su motivación a pesar de la distancia, gracias.

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE.....	v
LISTA DE TABLAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE SIMBOLOS	xvii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estructura de la tesis	4
1.4 Contribuciones de la tesis	5
2 NECESIDAD DE UNA ESTRATEGIA ÓPTIMA DE TARIFACIÓN PARA EL TRANSPORTE POR CARRETERA.....	7
2.1 Introducción.....	7
2.2 Deseo permanente de una mayor y mejor movilidad	8
2.3 Costes sociales del transporte por carretera.....	10
2.3.1 Costes del operador (C_o).....	11
2.3.2 Costes de los usuarios (C_u).....	12
2.3.3 Costes externos (C_e)	16
2.4 Value pricing	18
2.4.1 Definición y objetivos	18
2.4.2 Tipos de value pricing	18
2.4.3 Tecnología para el cobro	29
2.4.4 Experiencias internacionales	34
2.4.5 Efectos del value pricing	37
2.5 Tarifación según el servicio (<i>service pricing</i>)	42
2.5.1 Definición	42
2.5.2 Indicadores de calidad	43
2.6 Esquemas tarifarios para gestionar una red de carreteras.....	45
2.6.1 Tarifación en un punto	46
2.6.2 Tarifación continua	51
2.6.3 Tarifación mixta	54
2.7 Criterios de diseño de esquemas tarifarios para gestionar la movilidad.....	56
2.7.1 Evitar impactos adversos	57
2.7.2 Aceptación pública	59
2.7.3 Implantación práctica.....	62

2.7.4	<i>Medidas complementarias a los esquemas tarifarios</i>	63
3	DOCTRINAS ECONÓMICAS PARA LA TARIFACIÓN DE CARRETERAS	65
3.1	Introducción.....	65
3.2	Instrumentos para tarifar.....	66
3.3	Principios generales para la tarificación.....	68
3.3.1	<i>Enfoques de tarificación según servicios de transporte y operadores de infraestructura</i>	69
3.3.2	<i>Enfoques de tarificación según el gobierno o la entidad reguladora</i>	71
3.4	Equilibrio óptimo oferta-demanda. Principio básico para gestionar la movilidad.....	72
3.4.1	<i>Modelización estática</i>	72
3.4.2	<i>Modelización dinámica</i>	77
3.5	Tarifación del coste marginal social.....	80
3.5.1	<i>First-best vs. Second-best</i>	81
3.5.2	<i>Críticas a la tarificación basada en el coste marginal social</i>	84
3.6	El peaje como instrumento eficaz para gestionar la movilidad.....	85
3.6.1	<i>Maximizar el Bienestar Social</i>	85
3.6.2	<i>Generación de ingresos</i>	92
3.6.3	<i>Mejorar la equidad</i>	94
4	METODOLOGÍA PARA ANALIZAR Y SELECCIONAR UN ESQUEMA TARIFARIO QUE GESTIONE LA MOVILIDAD	99
4.1	Introducción.....	99
4.2	Caracterización de la red en el escenario base	100
4.2.1	<i>Definición de la oferta viaria</i>	102
4.2.2	<i>Modelización de la demanda y demás indicadores de valoración</i>	103
4.3	Configuración del modelo tarifario	119
4.3.1	<i>Principios teóricos para la formulación del modelo</i>	120
4.3.2	<i>Estructuración básica del modelo</i>	125
4.3.3	<i>Limitaciones del enfoque adoptado en el modelo</i>	130
4.4	Proceso de selección del esquema tarifario	131
5	GENERACIÓN Y MODELIZACIÓN DE DIVERSOS ESQUEMAS TARIFARIOS PARA UNA RED DE CARRETERAS	135
5.1	Introducción.....	135
5.2	Tarifa plana.....	135
5.3	Tarifa solamente kilométrica.....	140
5.3.1	<i>Tarifa kilométrica definida mediante función lineal</i>	141
5.3.2	<i>Tarifa kilométrica definida mediante función cóncava</i>	146
5.4	Tarifa de entrada más kilométrica	150
5.5	Tarifa plana en una zona cubierta por un cordón más kilométrica.....	156
5.6	Algoritmo para la modelización de los efectos al implantar un determinado esquema tarifario	162
5.6.1	<i>Fase 1: Modelización del escenario base</i>	162
5.6.2	<i>Fase 2: Modelización del escenario futuro</i>	164

5.6.3	<i>Fase 3: Implantación de un determinado esquema de road pricing y obtención de la(s) tarifa(s) óptima(s)</i>	165
5.6.4	<i>Fase 4: Análisis de resultados y selección del esquema de road pricing</i>	166
5.7	Parámetros de sensibilidad en la modelización	167
5.7.1	<i>Sensibilidad al valor del tiempo</i>	168
5.7.2	<i>Sensibilidad de la elasticidad basada en la distancia</i>	169
6	APLICACIÓN DEL MODELO SOBRE LA RED DE AUTOPISTAS DEL ÁREA METROPOLITANA DE BARCELONA	171
6.1	Introducción.....	171
6.2	Caracterización del escenario actual.....	172
6.2.1	<i>Planteamiento del problema</i>	172
6.2.2	<i>Modelización del escenario actual</i>	174
6.3	Modelización del escenario futuro	176
6.3.1	<i>Cálculo de la matriz final de viajes entre pares O-D</i>	176
6.3.2	<i>Solución al problema de equilibrio de usuario</i>	176
6.3.3	<i>Obtención del escenario futuro deseado</i>	177
6.4	Implantación de los diferentes esquemas tarifarios y obtención de las tarifas óptimas	177
6.4.1	<i>Tarifa plana</i>	178
6.4.2	<i>Tarifa kilométrica lineal</i>	183
6.4.3	<i>Tarifa kilométrica cóncava</i>	189
6.4.4	<i>Tarifa combinada: Entrada + kilométrica lineal</i>	193
6.4.5	<i>Tarifa combinada: plana + kilométrica lineal</i>	200
6.5	Evaluación y selección del esquema de <i>road pricing</i>	208
6.5.1	<i>Contrastación y análisis general de resultados</i>	208
6.5.2	<i>Selección del esquema tarifario a implantar</i>	212
7	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	217
7.1	Conclusiones.....	217
7.2	Líneas de investigación	220
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	223
	ANEXOS	233
	Anexo A1: Costes externos del transporte por carretera	A-1
	Anexo A2: Elasticidad de la demanda respecto a los diferentes costes del viaje en coche	A-23
	Anexo A3: Función tarifaria para favorecer a viajeros frecuentes	A-35
	Anexo A4: Ejemplo: aplicación de una estructura tarifaria combinada	A-39

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Componentes del coste en relación con la oferta y el uso de la infraestructura. (Fuente: Libro Blanco. CE. 1998).....	11
Tabla 2.2. Comparación de valores del tiempo de viaje (VTV) según diversos estudios - en Euros de 1998-. (Fuente: Doll y Jansson, 2005).....	15
Tabla 2.3. Principales externalidades en los distintos modos de transporte. (Fuente: De Rus, et al. 2003).....	16
Tabla 2.4. Elementos considerados para medir cada categoría de costes externos. (Fuente: Van Essen et al. 2006).....	17
Tabla 2.5. Síntesis de los Programas en funcionamiento de carriles VAO con peaje en Estados Unidos. (Fuente: Enlaces Web correspondientes).....	16
Tabla 2.6. Experiencias internacionales con estudios y aplicaciones de road pricing en zonas urbanas y metropolitanas.....	21
Tabla 2.7. Barreras para la implementación de costos marginales de tarifación en vías metropolitanas. (Fuente: Marler et al., 2003).....	34
Tabla 2.8. Criterios para el diseño de cordones tarifarios. (Fuente: May et al. 2002).....	41
Tabla 3.1. Ingresos provenientes de peajes e impuestos al vehículo y combustibles para los Estados Miembros de la UE en M Euros. (Fuente: Nash et al., 2003b).....	66
Tabla 3.2. Precios de la gasolina y diesel para los Estados Miembros de la UE, en €/1000 lt. (Fuente: European Environment Agency, 2002).....	67
Tabla 3.3a. Estimación de los costes e ingresos para la implementación de la tarifa por congestión en Londres. (Fuente: Transport for London, 2003).....	92
Tabla 3.3b. Estimación de los costes e ingresos para la ampliación de la tarifa por congestión hacia el oeste de Londres. (Fuente: Transport for London, 2003)...	92
Tabla 4.1. Matriz de viajes entre pares O-D de la red en estudio.....	105
Tabla 4.2. Diferentes funciones de demanda y sus elasticidades.....	121
Tabla 4.3. Modelo secuencial para evaluar los cambios en diferentes indicadores al implantarse un esquema de road pricing.....	129
Tabla 5.1. Metodología secuencial para evaluar los cambios en diferentes indicadores al implantarse un esquema de tarifa plana.	140

Tabla 5.2.	<i>Metodología para evaluar los cambios en diferentes indicadores al implantarse un esquema con tarifa kilométrica lineal.....</i>	145
Tabla 5.3.	<i>Metodología para evaluar los cambios en diferentes indicadores al implantarse un esquema con tarifa kilométrica cóncava.....</i>	150
Tabla 5.4.	<i>Metodología para evaluar los cambios en diferentes indicadores al implantarse un esquema con tarifa de entrada y kilométrica lineal.....</i>	155
Tabla 5.5.	<i>Metodología para evaluar los cambios en diferentes indicadores al implantarse un esquema combinado con tarifas plana y kilométrica lineal.....</i>	161
Tabla 6.1.	<i>Resultados y análisis de sensibilidad con respecto al valor del tiempo al implantarse una tarifa plana.....</i>	179
Tabla 6.2.	<i>Resultados y análisis de sensibilidad con respecto a la elasticidad de la demanda al implantarse una tarifa plana.....</i>	180
Tabla 6.3.	<i>Resultados y análisis de sensibilidad con respecto al valor del tiempo al implantarse una tarifa kilométrica lineal.....</i>	184
Tabla 6.4.	<i>Resultados y análisis de sensibilidad con respecto a la elasticidad de la demanda al implantarse una tarifa kilométrica lineal.....</i>	185
Tabla 6.5.	<i>Resultados y análisis de sensibilidad con respecto al valor del tiempo al implantarse una tarifa kilométrica cóncava.....</i>	189
Tabla 6.6.	<i>Resultados y análisis de sensibilidad con respecto a la elasticidad de la demanda al implantarse una tarifa kilométrica cóncava.....</i>	190
Tabla 6.7.	<i>Resultados y análisis de sensibilidad respecto al valor del tiempo al implantarse una estructura tarifaria compuesta por una tarifa de acceso a la autopista + tarifa por kilómetro.....</i>	195
Tabla 6.8.	<i>Resultados y análisis de sensibilidad con respecto a la elasticidad al implantarse una estructura tarifaria compuesta por una tarifa de acceso a la autopista + tarifa por kilómetro.....</i>	196
Tabla 6.9.	<i>Resultados y análisis de sensibilidad respecto al valor del tiempo al implantarse una estructura tarifaria compuesta por un tarifa plana + tarifa por kilómetro.....</i>	202
Tabla 6.10.	<i>Resultados y análisis de sensibilidad respecto a la elasticidad de la demanda al implantarse una estructura tarifaria compuesta por un tarifa plana + tarifa por kilómetro.....</i>	203
Tabla 6.11.	<i>Contrastación de los diferentes esquemas de road pricing para cada una de las reducciones de demanda establecidas a través de diversos indicadores socioeconómicos.....</i>	209
Tabla 6.12.	<i>Matrices de comparación y pesos.....</i>	214

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 2.1. Transporte de pasajeros por modo en 1000 millones de pasajeros-kilómetro, (a) en EE.UU y (b) en la UE. (Fuente: EUROSTAT, 2004).....	9
Fig. 2.2. Estrategias de tarifación para reducir congestión.....	19
Fig. 2.3. Detección automática de la alta ocupación vehicular y señalización de los carriles VAO. (Fuente: Bautista, 2007 y WSDOT, 2003).....	20
Fig. 2.4. Sección típica e información en tiempo real del coste del peaje de los carriles VAO. (Fuente: WSDOT, 2003).....	20
Fig. 2.5. Peaje variable en función de la hora del día. (Fuente: Sullivan, 2002).....	22
Fig. 2.6. Peajes variables sobre los carriles rápidos de la SR-91 en USA. (Fuente: http://www.91expresslanes.com).....	23
Fig. 2.7. Carriles FAIR sobre la SR-91 en California. (Fuente: Flores y Egan, 2005).....	24
Fig. 2.8. Carsharing en Atlanta y Barcelona.....	27
Fig. 2.9. Parquímetros para el cobro en las zonas verdes y azules de Barcelona.....	28
Fig. 2.10. (a) Distintivo de residente y (b) Señalización del área verde.....	28
Fig. 2.11. Evolución tecnológica del cobro del peaje. (Fuente: ALG, Bangkok, 2004).....	29
Fig. 2.12. Telepeaje con comunicación DSRC.....	31
Fig. 2.13. Sistema de cobro en Alemania empleando GPS/GSM para camiones. (Fuente: Toll Collect. Alemania 2005).....	32
Fig. 2.14. Varias medidas de aceptación pública para la gestión de la demanda. (Fuente: Proyecto MC-ICAM, Marler et al. 2003).....	39
Fig. 2.15. Reconocimiento de la congestión como problema público. (Fuente: MacAulay y Cain. 2004).....	40
Fig. 2.16. Distribución del tiempo de viaje. (Fuente: Warffemius et al. 2005).....	43
Fig. 2.17. Opciones topológicas para tarifar una red de carreteras.....	45
Fig. 2.18. Diseño inicial del esquema de tarifación para Londres. (Fuente: May et al., 2002).....	46

Fig. 2.19.	<i>Estructura del cromosoma para el software GA-CHARGE. (Fuente: May et al., 2004).</i>	50
Fig. 2.20.	<i>Estructuras tarifarias combinadas (a) cordón simple y (b) de doble cordón en área urbana y kilométrica en la zona exterior.</i>	55
Fig. 2.21.	<i>Estructura tarifaria kilométrica tipo cóncava para favorecer a commuters</i>	59
Fig. 2.22.	<i>Señalización específica en los puntos de entrada al área tarifada</i>	59
Fig. 3.1.	<i>Deducción de la relación coste-flujo. (Fuente: Button, 2004).</i>	73
Fig. 3.2.	<i>Posibles puntos de equilibrio entre la curva de oferta $CMe(q)$ y la curva de demanda $d(q)$ para estudiar la congestión. (Fuente: Lindsey y Verhoeff, 2000).</i>	75
Fig. 3.3.	<i>Modelo estándar para determinar la tarifa óptima por congestión.</i>	76
Fig. 3.4.	<i>Estructura del modelo dinámico de asignación de tráfico. (Fuente: Joksimovic y Bliemer, 2002).</i>	78
Fig. 3.5.	<i>Tarifación basada en costes marginales bajo congestión.</i>	87
Fig. 4.1.	<i>Esquema representativo de la jerarquización municipal y vial de gran capacidad en un entorno metropolitano</i>	101
Fig. 4.2.	<i>Grafo de las vías de gran capacidad en un entorno metropolitano, con la información básica para cada arco de la red</i>	103
Fig. 4.3.	<i>Clasificación vehicular según categoría. (Fuente: Elaborada a partir de ACESA-abertis, 2005).</i>	105
Fig. 4.4.	<i>Tarifación basada en costes marginales de congestión bajo el criterio de first-best</i>	113
Fig. 4.5.	<i>Efecto en el bienestar social debido a la implantación de un esquema de road pricing bajo el enfoque de second-best</i>	116
Fig. 4.6.	<i>Diferentes funciones de demanda. (Fuente: A partir de Santos et al., 2001)</i>	121
Fig. 4.7.	<i>Variación del tiempo respecto al flujo vehicular según formulación del BPR</i>	123
Fig. 4.8.	<i>Valor del tiempo según variación al final del viaje. (Fuente: Gunn, 2001)</i>	124
Fig. 4.9.	<i>Comparación entre las funciones de demanda lineal y potencial. (Fuente: Victoria Transport Policy Institute, 2006).</i>	131
Fig. 5.1.	<i>Aplicación de tarifa plana entre un par O-D ij</i>	136
Fig. 5.2.	<i>Tarifación kilométrica de tipo lineal</i>	142
Fig. 5.3.	<i>Tarifación kilométrica de tipo cóncava</i>	146
Fig. 5.4.	<i>Tarifación kilométrica Lineal vs. Cóncava. Los parámetros m y n se calibran de acuerdo con el descuento que se quiera realizar en determinada distancia</i>	147

Fig. 5.5.	<i>Tarifa de entrada más tarifa kilométrica de tipo lineal.....</i>	151
Fig. 5.6.	<i>Estructura tarifaria compuesta por una tarifa plana y una kilométrica lineal....</i>	156
Fig. 5.7.	<i>Diagrama de flujo de la fase 1 “modelización del escenario base”.....</i>	163
Fig. 5.8.	<i>Diagrama de flujo de la fase 2 “modelización del escenario futuro”.....</i>	164
Fig. 5.9.	<i>Diagrama de flujo de la fase 3 “Implantación de un determinado esquema de road pricing y obtención de la(s) tarifa(s) óptima(s)”.....</i>	165
Fig. 5.10.	<i>Diagrama de flujo de la fase 4 “Análisis de resultados selección del esquema de road pricing a implantar”.....</i>	167
Fig. 5.11.	<i>Variación del bienestar social con respecto a un esquema de road pricing kilométrico y una valoración del tiempo diferente.....</i>	168
Fig. 5.12.	<i>Cambio de la elasticidad respecto a la distancia.....</i>	169
Fig. 5.13.	<i>Variación del ingreso futuro con respecto a un esquema de road pricing compuesto de dos tarifas y una valoración de la elasticidad diferente.....</i>	170
Fig. 6.1.	<i>La ejecución de nuevas vías no impide el crecimiento permanente del flujo vehicular. (Fuente: Pla de Mobilitat Urbana de Barcelona, 2006).....</i>	172
Fig. 6.2.	<i>Uso de los modos de transporte en la Región Metropolitana de Barcelona. (Fuente: Enquesta de Mobilitat Quotidiana de Catalunya, EMQ 2006).....</i>	173
Fig. 6.3.	<i>Atascos en horas punta sobre la Ronda de D’alt en Barcelona (España).....</i>	173
Fig. 6.4.	<i>Red de autopistas del Área Metropolitana de Barcelona con sus respectivos atributos.....</i>	174
Fig. 6.5.	<i>Distribución de viajes en transporte público y privado en al AMB. (Fuente: ATM-EMQ-2001).....</i>	175
Fig. 6.6.	<i>Solución al problema de equilibrio de usuario empleando TransCAD.....</i>	175
Fig. 6.7.	<i>Variación del bienestar social al implantarse una tarifa plana, definidas las magnitudes de la elasticidad y del valor del tiempo.....</i>	181
Fig. 6.8.	<i>Reducción de la demanda al implantarse una tarifa plana para diferentes magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.....</i>	182
Fig. 6.9.	<i>Cambio en el excedente del productor al instaurarse una tarifa plana para diferentes valores de elasticidad y del tiempo.....</i>	182
Fig. 6.10.	<i>Pérdida de excedente de usuario al instituirse una tarifa plana según la elasticidad y valor del tiempo.....</i>	183
Fig. 6.11.	<i>Variación del bienestar social al implantarse una tarifa plana para diferentes magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.....</i>	183
Fig. 6.12.	<i>Variación del bienestar social al implantarse una tarifa kilométrica lineal,</i>	

	<i>definidas las magnitudes de la elasticidad y del valor del tiempo.....</i>	186
Fig. 6.13.	<i>Reducción de la demanda al implantarse una tarifa kilométrica lineal para múltiples magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.....</i>	187
Fig. 6.14.	<i>Cambio en el excedente del productor al instaurarse una tarifa kilométrica lineal para varias magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.....</i>	187
Fig. 6.15.	<i>Pérdida de excedente de usuario al instituirse una tarifa kilométrica lineal para diversas magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.....</i>	188
Fig. 6.16.	<i>Variación del bienestar social al implantarse una tarifa kilométrica lineal para varias magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.....</i>	188
Fig. 6.17.	<i>Variación del bienestar social al implantarse una tarifa kilométrica cóncava, definidos los valores de la elasticidad y el precio del tiempo.....</i>	191
Fig. 6.18.	<i>Reducción de la demanda al implantarse una tarifa kilométrica cóncava para diversas magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.....</i>	192
Fig. 6.19.	<i>Cambio en el excedente del productor al instaurarse una tarifa kilométrica cóncava para múltiples valores de la elasticidad y valor del tiempo.....</i>	192
Fig. 6.20.	<i>Pérdida de excedente de usuario al instituirse una tarifa kilométrica cóncava al simular con diferentes magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.....</i>	193
Fig. 6.21.	<i>Variación del bienestar social al implantarse una tarifa kilométrica cóncava al trabajar con diversas magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.....</i>	193
Fig. 6.22.	<i>Variación del bienestar social al implantarse una tarifa de acceso + tarifa por kilómetro, definidos los valores de la elasticidad y del precio del tiempo.....</i>	197
Fig. 6.23.	<i>Reducción de la demanda al implantarse una tarifa de acceso + tarifa por kilómetro para varias magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.....</i>	198
Fig. 6.24.	<i>Cambio en el excedente del productor al instaurarse una tarifa de acceso + tarifa por kilómetro para múltiples valores de la elasticidad y valor del tiempo.....</i>	198
Fig. 6.25.	<i>Pérdida de excedente de usuario al instituirse una tarifa de acceso + tarifa por kilómetro al simular diferentes magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.....</i>	199
Fig. 6.26.	<i>Variación del bienestar social al implantarse una tarifa de entrada + tarifa por kilómetro al trabajar con varias magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.....</i>	199
Fig. 6.27.	<i>Variación del bienestar social en función del porcentaje de reducción de demanda para diferentes magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.....</i>	200
Fig. 6.28.	<i>Implantación de una estructura tarifaria combinada sobre la red de autopistas del Área Metropolitana de Barcelona.....</i>	200
Fig. 6.29.	<i>Variación del bienestar social con respecto a un esquema de road pricing kilométrico y una valoración del tiempo diferente.....</i>	204
Fig. 6.30.	<i>Reducción de la demanda en toda la red con tarifa plana + tarifa kilométrica al simular diferentes magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.....</i>	205

Fig. 6.31.	<i>Cambio total en el excedente del productor al instaurarse una tarifa plana + tarifa kilométrica para diferentes magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.</i>	206
Fig. 6.32.	<i>Pérdida total de excedente de usuario al instituirse una tarifa plana + kilométrica y simular diferentes magnitudes de elasticidad y valor del tiempo...</i>	206
Fig. 6.33.	<i>Variación total del bienestar social al implantarse una tarifa plana + kilométrica y trabajar con magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.....</i>	207
Fig. 6.34.	<i>Variación del bienestar social en función del porcentaje de reducción de demanda para diferentes magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.....</i>	207
Fig. 6.35.	<i>Nivel de tarifas a cobrar en función del porcentaje de reducción de demanda y los diversos esquemas de road pricing analizados.....</i>	208
Fig. 6.36.	<i>Ingreso futuro bruto frente al porcentaje de reducción de demanda y las diferentes estructuras tarifarias a implantar.....</i>	210
Fig. 6.37.	<i>Pérdidas en el excedente del usuario al reducir la cantidad de veh-km demandados al implantarse diferentes estructuras tarifarias.....</i>	211
Fig. 6.38.	<i>Variación del bienestar social al reducir la cantidad de veh-km demandados con diferentes estructuras tarifarias.....</i>	211
Fig. 6.39.	<i>Proceso analítico de jerarquización para seleccionar un esquema tarifario que gestione la movilidad.....</i>	213

LISTA DE SIMBOLOS

A continuación se presenta la nomenclatura usada para definir la metodología, la formulación de los indicadores en los dos escenarios. La situación actual se caracteriza por el superíndice 0, mientras que el escenario futuro se indicará con el superíndice 1.

A	:	Conjunto de arcos en la red
A_τ	:	Subconjunto de arcos de la red que tienen peaje ($A_\tau \subset A$)
R	:	Conjunto de rutas en la red
W	:	Conjunto de pares O-D en toda la red
R_{ij}	:	Conjunto de todas las rutas entre el par O-D $ij \in W$
ϕ_{ij}^r	:	Flujo en la ruta $r \in R_{ij}$, $ij \in W$
$q_a^{0,1}$:	Flujo sobre el arco $a \in A$
$q_{ij}^{0,1}$:	Demanda entre el par O-D $ij \in W$
q	:	Vector de demandas para todos los O-D
$Q_T^{0,1}$:	Demanda total en toda la red
$D_{ij}(g_{ij})$:	Demanda entre el par O-D $ij \in W$ como una función con respecto al coste generalizado del viaje.
$D_{ij}^{-1}(\omega)$:	Función inversa de la demanda
$CMe(q)$:	Coste medio del usuario
$CMa(q)$:	Coste marginal social
$g_{ij}^{0,1}$:	Coste generalizado del viaje entre el par O-D $ij \in W$
$g_a(q_a, \tau_a)$:	Coste generalizado para el arco $a \in A$
CSC_{ij}	:	Coste social de congestión o pérdida social de eficiencia entre el par O-D
f_a	:	Costes de operación vehicular (puede ser por viaje o por km) para el arco $a \in A$
$f_{ij}^{0,1}$:	Costes de operación vehicular entre el par O-D $ij \in W$
t_{ij}^r	:	Tiempo de viaje en recorrer la ruta r para ir desde el origen i hasta el destino j

$t_a(q_a)$: Tiempo requerido para pasar a través del arco a ; es una función creciente y continua con respecto al flujo en el arco (q_a)
δ_{ij}^{ar}	: Variable binaria, que toma el valor de 1 si la ruta r usa el arco a y 0 en caso contrario
ε_{ij}	: Elasticidad de la demanda respecto al coste generalizado del viaje entre el par O-D $ij \in W$
η_{ij}	: Elasticidad de la demanda respecto al coste generalizado dependiente de la distancia del viaje entre el par O-D $ij \in W$
V_t	: Valor del tiempo de los usuarios
τ_{ij}^r	: Gastos de peaje en que se incurre al viajar por la ruta r entre el par O-D $ij \in W$
τ_a	: Peaje en el arco $a \in A_\tau$
τ_f	: Tarifa plana por congestión en toda la red o en el área cubierta por el cordón
τ_u	: Tarifa unitaria por kilómetro para disuadir la congestión en toda la red
τ_e	: Tarifa de entrada o por acceso a la autopista
τ_p^1	: Tarifa promedio en toda la red después de implantar el peaje por congestión
τ_{um}^1	: Tarifa unitaria media por kilómetro en toda la red después de implantar el peaje por congestión
x_{ij}	: Distancia recorrida entre el par O-D $ij \in W$
$x_{c_{ij}}$: Distancia variable del cordón dependiente de la zona origen i y la zona destino j para todo $ij \in W$
I_{ij}^0	: Recaudo bruto obtenido por peaje debido a motivos de financiación entre el par O-D $ij \in W$
I_{ij}^1	: Recaudo bruto estimado debido a la tarifa por congestión entre el par O-D $ij \in W$
ΔEp_{ij}	: Variación del excedente del productor entre el par O-D $ij \in W$
ΔEp_T	: Variación del total del excedente del productor en toda la red
∇Eu_{ij}	: Pérdida del excedente de usuario al modificarse el coste generalizado del viaje entre el par O-D $ij \in W$
∇Eu_T	: Variación neta del excedente de usuario en toda la red
ΔBs_{ij}	: Cambio del bienestar social al modificarse el coste generalizado del viaje entre el par O-D $ij \in W$
ΔBs_T	: Variación neta del bienestar social en toda la red
