

## «Peajes urbanos con objetivos medioambientales»

El empleo de peajes urbanos para corregir el uso excesivo de los vehículos privados en las áreas más congestionadas de la ciudad y el análisis de los efectos externos que esos flujos generan, ha suscitado recientemente un interés renovado en la literatura económica. En esta línea y desde una perspectiva medioambiental, se analiza en este artículo el efecto que sobre el bienestar, entendido en sentido económico, tienen diferentes tipos de peajes fijos y variaciones en el precio del combustible, así como la efectividad de ambos para el control de la contaminación. Para ello desde un análisis de estática comparativa y en un contexto de flujo de vehículos heterogéneos se estudian, además de la congestión, otros efectos externos como la contaminación y, por su relación con esta última, los consumos extra de combustible.

*Trafiko metaketa handiena duten hiriko guneetan ibilgailu pribatuaren gehiegizko erabilera eragozteko ordainsariak ezartzeak eta trafiko horrek sortzen dituen kanpo eraginaren azterketak ekonomi literaturaren interesa piztu du azkenaldi honetan. Zentzu horretan eta ingurumeneko ikuspegitik, artikulu honetan ordainsari finko zenbaitek eta erregaiaren prezioaren aldakuntzek ongizatean, zentzu ekonomiko batean ulertuta, duten eragina aztertu da. Halaber, bi irtenbide horien eraginkortasuna kutsadura kontrolatzeko unean haztatu da. Horretarako, estatika konparatzaileko analisi batek eta ibilgailuen fluxu heterogeneoen testuinguru batean, trafiko metaketa ez ezik, bestelako kanpo eraginak ere aztertu dira, hala nola kutsadura eta, azken honekin duen lotura dela eta, erregaien aparteko kontsumoa.*

There has recently been renewed interest among economists in the use of urban tolls as a means of correcting excessive use of private vehicles in the most congested areas of cities, and several texts have sought to analyse the external effects caused by such flows. This article addresses the issue from an environmental perspective, analysing the effect on well-being –in the economic sense of the term– of different types of fixed toll and variations in fuel prices, as well as the effectiveness of each method in controlling pollution. Using an analysis of comparative statics and within a context of heterogeneous vehicle flows, the article examines congestion and other external effects such as pollution and additional fuel consumption (because of the relationship with pollution).

## ÍNDICE

1. Introducción
  2. Transporte por carretera y contaminación
  3. Políticas de control de las emisiones
  4. El modelo de transporte
  5. Análisis de estática comparativa
  6. Conclusiones
- Referencias bibliográficas

Palabras clave: Peajes urbanos, política medioambiental, transporte por carretera, contaminación, control de emisiones.  
Clasificación JEL: R4, Q2

### 1. INTRODUCCIÓN

El transporte en general, y el transporte por carretera en particular, es fuente directa de una amplia colección de efectos externos: congestión (pérdidas de tiempo), contaminación, ruido, desgaste del pavimento, riesgo de accidentes, efectos barrera y otros. Junto a esto, la provisión de mejores infraestructuras (carreteras) para hacer frente a un flujo creciente de vehículos y, como consecuencia, una localización espacial de actividades que responde cada vez más a un patrón de mayor dispersión, ha acentuado el nivel e impacto de muchos de los efectos externos mencionados. En este contexto, con la presencia de los mencionados efectos externos, y algunos otros más, los mecanismos de mercado se muestran insuficientes para alcanzar asignaciones de

recursos eficientes, por lo que se hace necesaria la intervención a través de distintas medidas que pueden englobarse por su naturaleza en dos bloques: políticas de oferta y políticas de demanda.

Las *políticas de oferta* hacen hincapié en adecuar las infraestructuras a la demanda existente, Morhing & Harwitz (1962) y Morhing (1985). Este tipo de políticas toma la demanda como algo exógeno y trata de adecuar la oferta a las necesidades de la misma. La idea de que un aumento en la capacidad de las redes viarias apareja un aumento de la riqueza a través de un mayor nivel de actividad ha predominado hasta nuestros días. De hecho la preocupación fundamental ha venido siendo que las infraestructuras viarias no constituyesen un cuello de botella al desarrollo de otras actividades

económicas, lo que se ha traducido en *una clara apuesta por las políticas de oferta sobre las de demanda*.

Por su parte, las *políticas de demanda* adecuan los niveles de demanda a las infraestructuras (oferta) existentes. Políticas de este tipo serían, entre otras, la fijación de peajes (road-pricing), Walters (1961) y Vickrey (1963). Tradicionalmente el empleo de medidas que pudieran incidir sobre la demanda no tenía como objetivo último una gestión eficiente del tráfico y del uso de las infraestructuras, sino que ha estado más asociada a motivos meramente recaudatorios (impuestos sobre el combustible) o de financiación de la construcción y mantenimiento de infraestructuras (peajes en autopistas, etc.). La utilización de medidas que apuesten por afectar a la demanda por motivos simplemente de eficiencia económica son más bien recientes, aunque es cierto que los contados ejemplos existentes no siempre responden fielmente a este fin (Singapur, Trondheim, etc.).

Pese al tradicional predominio que han mantenido las políticas de oferta se ha comprobado claramente la imposibilidad de mantener un ritmo de inversión en infraestructuras viarias capaz de hacer frente a un fenómeno de motorización siempre creciente. Así pues como respuesta al deterioro de las condiciones de circulación, y ante el convencimiento de la ineficacia exclusivamente de este tipo de medidas se ha generado en los últimos tiempos una mayor atención hacia medidas relacionadas con la gestión de la demanda y en particular hacia el empleo de peajes urbanos.

Pero además, en lo referido a la fijación de peajes, se ha producido en la última década un aumento espectacular en el análisis y en el campo de aplicación de esta alternativa, De Borger (1996), Kageson (1993), Madison (1966), Mayeres (1993), Newbery (1988), Rothengatter (1994) y Verhoef (1994). Si bien en un principio se trataba de gestionar la congestión (las pérdidas de tiempo), posteriormente, el sistema de peajes urbanos o *road-pricing* se ha extendido a tratar otros efectos externos provocados por el transporte: contaminación, ruidos, accidentes, efectos barrera, daños en el pavimento, etc. La mayor sensibilidad medioambiental y urbanística, entre otras, y el desarrollo de la tecnología, sobre todo en lo que a recogida de información se refiere, hace que sea viable ser ambiciosos a la hora de desarrollar modelos que evalúen y traten de la mejor manera posible un mayor número de efectos externos.

En este artículo y siguiendo las tendencias de la investigación apuntadas, se analiza el efecto de distintas políticas de demanda como la aplicación de peajes urbanos y la variación en el precio del combustible sobre el bienestar, así como sobre la contaminación. Para ello, además de contabilizarse la congestión, se incluyen otros efectos externos como la contaminación y, por su relación con ella, los consumos adicionales de combustible. Este análisis se realiza con la presencia de un flujo de vehículos heterogéneo (distintos tipos de vehículos) y bajo diferentes condiciones de circulación lo que permite calibrar la idoneidad de las políti-

cas de intervención estudiadas bajo distintos escenarios, así como la robustez de las conclusiones obtenidas.

Desde una perspectiva medioambiental se presta especial atención al tratamiento de la contaminación creciente generada por el transporte por carretera, sin duda, una de las principales fuentes de contaminación en los grandes centros urbanos. Una contaminación en aumento ya que las mejoras tecnológicas incorporadas a los vehículos en esta materia han sido más que compensadas por el aumento en el número de vehículos y en los kilómetros recorridos por estos.

Respecto a la estructura del documento, en la *sección 2* se comienza realizando una semblanza de la relación entre el transporte por carretera y la contaminación en su triple vertiente: la local, la regional y la global. En la *sección 3* se analiza sucintamente el alcance e idoneidad de diferentes medidas para minorar la contaminación procedente del tráfico rodado. A continuación se introduce en la *sección 4* el modelo de transporte que será utilizado en el análisis de estática comparativa para contrastar el efecto de diferentes medidas de política de demanda, peajes fijos y variaciones en el precio de los combustibles, y cuyos resultados se presentan en la *sección 5* desde la perspectiva de sus efectos sobre las condiciones de circulación y sobre el bienestar. Finalmente, el documento concluye con las *conclusiones* y con un *Apéndice Matemático* que permite acercar al lector más interesado a una visión más detallada del soporte matemático del modelo.

## 2. TRANSPORTE POR CARRETERA Y CONTAMINACIÓN

El incremento de actividad, consecuencia de un aumento de la tasa de motorización y del número de kilómetros recorridos, así como del mayor número de prestaciones asociadas a los vehículos más modernos, ha mitigado en gran medida el impacto del avance tecnológico sobre la reducción de las emisiones.

Así, el uso creciente de petróleo, muy relacionado con las emisiones de CO<sub>2</sub>, con un aumento del 14% desde 1990, se debe principalmente al transporte y, sobre todo, a la dependencia cada vez mayor del mismo por parte de los automóviles y camiones en los países en desarrollo. Pese a puntuales fenómenos de crisis que pueden ralentizar esta tendencia, el potencial de rápido crecimiento en estos países es enorme: sólo la ciudad de los Angeles tiene hoy más automóviles que toda China. Incluso en Estados Unidos el consumo sigue creciendo a causa de la amplia utilización de vehículos todo terreno y de pequeños camiones que ahora representan la mitad de las ventas<sup>1</sup>.

La contaminación generada por el transporte por carretera reside en la emisión de muy diferentes sustancias químicas con muchas y muy variadas consecuencias para las personas y el medio ambiente en general. Consecuencias que

<sup>1</sup> Estimación del Worlwatch basada en American Automobile Manufacturers Association (AAMA), Motor Vehicle Facts and Figures 1997 (Detroit, MI: 1997), en Oficina del Censo de EEUU, Statistical Abstract of United States 1997 (Washington DC: 1997), y en AAMA, World Motor Vehicle Data 1997 ed. (Detroit MI: 1997).

por el alcance de su impacto se pueden clasificar en tres categorías: global, regional y local. Así las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) estarían incluidas en la primera categoría, en la de alcance global, ya que no importa ni dónde ni cuándo se producen para cuantificar su efecto sobre el “efecto invernadero”. La contribución de las emisiones de los vehículos sobre las lluvias ácidas son por su parte un claro ejemplo de impacto regional, ya que sus efectos difieren en relación al lugar donde se producen. Finalmente los problemas sobre la salud son reflejo de problemas medioambientales de carácter local. Sus costes dependen del número de personas que resultan afectadas y del lugar y hora del día en que se producen (horas punta, horas valle, centros urbanos, periferia, etc.).

En consecuencia, dado el diferente alcance medioambiental de la contaminación producida por el transporte, se necesitarán medidas diferenciadas para actuar sobre cada una de ellas de la mejor manera posible. En el caso de las emisiones de CO<sub>2</sub>, casi proporcionales al uso de combustibles fósiles, un impuesto sobre la gasolina, sería una medida eficiente desde el punto de vista económico. Sin embargo, los problemas medioambientales locales necesitan de otro tipo de herramientas, lo suficientemente flexibles y diferenciadas, capaces de adaptarse a situaciones muy variables. En este caso, medidas tales como los peajes urbanos capaces de discriminar a diferentes usuarios en circunstancias distintas resultan más apropiadas.

Así, desde el impacto local que la contaminación produce y centrándonos en medidas de gestión de la demanda como los peajes, las condiciones de tráfico son un elemento esencial en la determinación de la cuantía de los mismos. De esta manera, además de un tratamiento diferenciado para cada uno de los modos de transporte acorde a los efectos externos que genera en este caso la contaminación, se deberá tener también en cuenta que los factores de emisión varían en gran medida con los hábitos y modos de conducción. Situaciones de elevada congestión como las experimentadas en los centros urbanos de las grandes ciudades, con continuos arranques y paradas, suponen un nivel máximo de emisiones respecto al de otras áreas más descongestionadas. Como podemos observar en el siguiente gráfico el coste de las emisiones por viajero se incrementa drásticamente a niveles de velocidad media de circulación menores correspondientes a situaciones de congestión. Adicionalmente, el comportamiento de la contaminación para distintos modos de transporte tiene un comportamiento diferenciado ya que, si bien en todos los casos aumenta cuando disminuye la velocidad, esta se incrementa en menor medida para el caso de los modos de transporte moto y autobús<sup>2</sup>. Así, en condiciones de velocidad media de circulación cercanas a los 6 km/h, la valoración económica de la contaminación producida por un co-

---

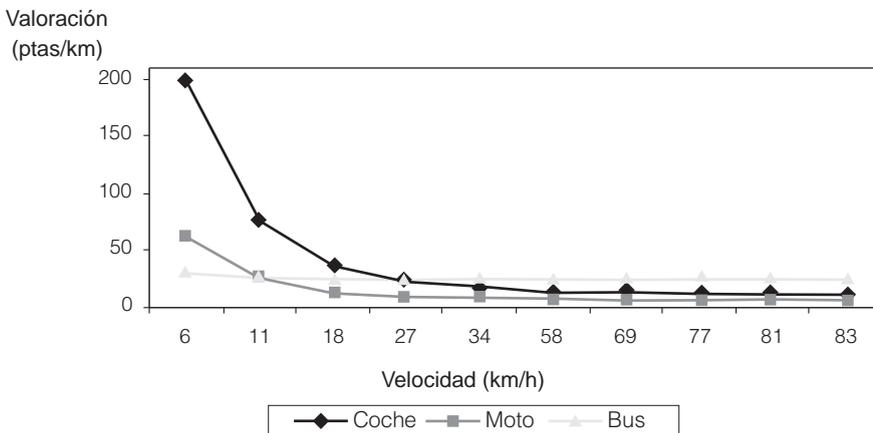
<sup>2</sup> Lógicamente un autobús genera un mayor nivel de contaminación, pero con una tasa de ocupación suficiente (número de viajeros), resulta medioambientalmente más respetuoso.

che tipo se sitúa entorno a las 200 pesetas por kilómetro, mientras que la parte proporcional que correspondería a un viajero que va en autobús es inferior a las 40 pesetas. Desde el punto de vista medioambiental está clara la mayor eficiencia del transporte público respecto al privado<sup>3</sup>.

Es por tanto clara la necesidad de que los peajes respondan a dos variables: a la evolución de las condiciones de tráfico y a las características de los vehículos.

Tal y como se señalaba en la introducción, el transporte es fuente de un número ingente de efectos externos cuya interrelación supone, en ocasiones, que la presencia de uno implique la desaparición de otro. Este es el caso de la relación entre las pérdidas de tiempo y el riesgo de accidentes. Situaciones de elevada congestión con grandes pérdidas de tiempo para los individuos se acompañan de un menor riesgo de accidentes mortales ya que las pérdidas de tiempo y el

Gráfico nº1: **Relación velocidad (km/h). Valoración de la polución (ptas/km)**



<sup>3</sup> Gráficamente se observa una valoración económica de la contaminación constante del modo de transporte autobús para todos los niveles de velocidad. Esto es así dado que, a pesar de ser mayor la

contaminación a menores niveles de velocidad, horas punta, es compensada por una mayor ocupación del transporte público (número de viajeros), por lo que la contaminación por viajero apenas varía.

riesgo de accidente mortal se comportan de manera opuesta entre sí ante variaciones de la velocidad.

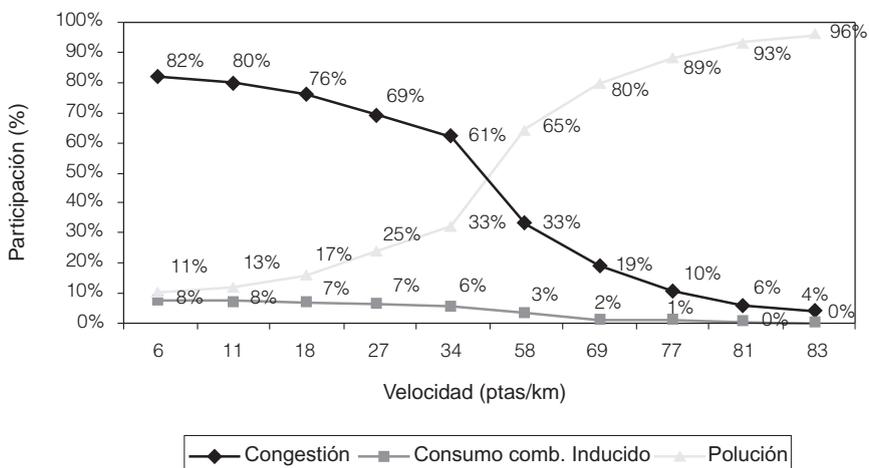
En este artículo los efectos externos tenidos en cuenta: la congestión, los consumos extras de combustible y la contaminación presentan idéntico comportamiento ante variaciones de la velocidad. Existe una relación inversa entre la evolución de la velocidad y los efectos externos generados, así aumentos/disminuciones en el nivel de velocidad suponen disminuciones/aumentos en el nivel de los efectos externos generados.

Sin embargo, a pesar de que los efectos externos analizados se comportan de la

misma manera ante variaciones de la velocidad la participación de cada uno de ellos sobre el agregado varía de distinta manera ante distintos niveles de velocidad. Así, mientras que a niveles de velocidad elevados la contaminación supone un gran porcentaje de la totalidad de los efectos externos estudiados, un 96%, para los niveles de velocidad más reducidos es la congestión, las pérdidas de tiempo, la que tiene una mayor participación con un 82%.

Indudablemente en términos absolutos, tal y como se ha señalado anteriormente, la valoración económica de todos los efectos externos tenidos en cuenta en este trabajo aumenta para los niveles de velocidad más bajos. Sin embargo, tal y

Gráfico nº2: **Participación de los distintos efectos externos sobre el total (%) a distintas velocidades para modo coche**



Fuente: Iturriaga & Galarraga (1998) y simulación del modelo.

como se verá más adelante, no siempre las situaciones asociadas a mayores nivel de velocidad resultan ser las mejores ni desde el punto de vista de la contaminación generada, ni desde la perspectiva del bienestar disfrutado. Así las políticas de gestión de la demanda, además de fijarse como objetivo la obtención de unos *niveles de velocidad* mínimos a definir, deben tener también en cuenta la *composición del flujo de vehículos* que la genera, la combinación de coches, motos, autobuses y del resto de tipo de vehículos que circulen.

### 3. POLÍTICAS DE CONTROL DE LAS EMISIONES

El tratamiento de las emisiones ha sido abordado de distintas maneras. Por una parte se han fijado unos impuestos sobre los combustibles en función de su composición. También se han establecido categorías de vehículos en función de su mayor o menor “sensibilidad ecológica” que han servido de base a una diferente presión fiscal; se han puesto en marcha programas de inspección y mantenimiento de los vehículos, así como programas de I+D para el desarrollo tecnológico de vehículos con un nivel de emisiones “quasi nulo”. Sin embargo, el problema de estas medidas es la falta de relación entre impuesto/medida y el uso del vehículo, ya que se trata de fomentar una adecuada utilización de los recursos. Además, los efectos medioambientales vendrán condicionados por otra serie de parámetros, geográficos, climáticos, etc., que requieren un tratamiento específico.

A continuación analizamos distintas medidas para abordar el problema de las emisiones:

- Un *Impuesto Óptimo* (first-best) sobre las emisiones. Si fuera posible medir las emisiones de cada vehículo, un impuesto óptimo se fundamentaría en el efecto que tiene cada una de las sustancias contaminantes bajo consideración<sup>4</sup> (en nuestro caso CO, NO<sub>x</sub> y VOC) sobre la calidad del aire. En una situación de impuesto óptimo un sensor a bordo del vehículo grabaría las emisiones. Además habría que tener en cuenta que para un mismo nivel de emisiones el efecto en los receptores de las mismas sería diferente, existiría además una divergencia entre el momento de la emisión y el correspondiente al daño provocado por la misma. Sin embargo, el coste de dotar cada vehículo con el equipamiento adecuado, además de la dificultad de calcular el coste exacto de las emisiones, hace claramente inviable la puesta en práctica de este impuesto óptimo
- Un *Impuesto Subsidiario* (Second-Best) sobre las emisiones. Hemos visto que un impuesto óptimo sobre las emisiones requiere la posibilidad de medir cada unidad de las mismas y calcular el efecto de cada sustancia contaminante sobre la calidad del aire, hecho cuando menos incierto.

<sup>4</sup> CO: Monóxido de carbono; NO<sub>x</sub>: Óxidos de nitrógeno, VOC: Partículas orgánicas en suspensión (Volatile Organic Compounds).

Además es imposible equipar a cada vehículo con un medidor de emisiones propias. Como alternativa es posible estimar las emisiones anuales de cada vehículo,  $i$ , como el producto de las emisiones producidas por kilómetro (a través de revisiones anuales, ITV, etc.), por los kilómetros recorridos:

$$E_i = \left( \frac{\text{emisiones}_i}{\text{km}} \right) * D$$

$i = \text{CO, NO}_x, \text{VOC}$  (1)

donde  $E_i$  es sólo una aproximación de las emisiones anuales del iésimo contaminante, ya que las emisiones varían con el uso del vehículo y dependen de muchos factores exógenos<sup>5</sup>:

$$E_{mit} = f(\text{velocidad del vehículo, aceleración /deceleración, mantenimiento, arranque del motor, temperatura del aire, volatilidad de la gasolina y aditivos,...})$$

La variabilidad de las emisiones por carretera sugiere que las emisiones estimadas por revisiones periódicas (ITVs, etc) corren serio riesgo de desviarse de las auténticas. Esto, sin embargo, no es un serio problema para un impuesto de *second-best*, ya que confía en las emisiones medias por kilómetro para estimar la cantidad total de emisiones. Estas revisio-

nes periódicas simulan las condiciones de conducción media que, además, distinguirán entre vehículos muy contaminantes de los que no lo son tanto, siendo el impuesto mayor para los del primer tipo. La distancia anual recorrida ( $D$ ) puede medirse por una simple lectura del cambio en el tacómetro del vehículo durante un intervalo de tiempo dado (aunque puedan existir problemas de trucaje). El impuesto subsidiario sobre las emisiones de cada vehículo puede calcularse de la siguiente manera:

$$\text{Impuesto Anual} = (a \cdot EPM_1 + b \cdot EPM_2 + c \cdot EPM_3) \cdot D$$

donde:

$a, b, c$ : son los impuestos por cada gramo de  $\text{CO, NO}_x$  y  $\text{VOC}$  emitida

$EPM_1$ : medición de  $\text{CO}$  (gr/km)

$EPM_2$ : medición de  $\text{NO}_x$  (gr/km)

$EPM_3$ : medición de  $\text{VOC}$  (gr/km)

$D$ : la distancia anual recorrida, medida por las lecturas de los tacómetros.

Establecer la base del impuesto sobre las emisiones totales de cada vehículo, da a los conductores la posibilidad de elegir como amortiguar la cuantía del impuesto, o bien reduciendo la distancia recorrida, o bien reduciendo las emisiones por kilómetro, o ambas. Los conductores habrán de hacer frente al mismo impuesto por cada gramo de sustancia contaminante emitida, pero a diferente impuesto por kilómetro ya que las emisiones por kilómetro diferirán de un coche a otro. Una de las cuestiones más interesantes de esta cuestión es cómo determinar los impuestos por cada gramo de sustancia conta-

<sup>5</sup> La velocidad tiene una fuerte relación inversa no-lineal con las emisiones de  $\text{CO}$ , especialmente a velocidades por debajo de los 30 km por hora. Las aceleraciones y deceleraciones producen emisiones mayores por kilómetro que las producidas a una velocidad estacionaria o constante. Además las emisiones de  $\text{CO}$  están inversamente relacionadas con la temperatura ambiente.

minante emitida. Los valores de a,b,c, pueden fijarse con el objetivo de reducir en una cuantía dada el nivel de emisiones de cada sustancia contaminante, en cuyo caso los impuestos sobre CO,NOx y VOC, es decir, a, b y c dependerían de la elasticidad de las emisiones respecto al impuesto.

*Superioridad del Impuesto Subsidiario respecto al Impuesto sobre la Gasolina.* El impuesto subsidiario es superior al impuesto sobre la gasolina a la hora de reducir el nivel de emisiones. Mientras que el impuesto sobre la gasolina incentiva la adquisición de coches más eficientes, en lo que al consumo de combustible respecta, la correlación entre las emisiones por kilómetro recorrido y los kilómetros recorridos por litro de gasolina es débil. Este resultado no debería sorprender, dadas las propiedades físicas que determinan el uso de combustible y las emisiones. La eficiencia en el consumo de combustible depende en parte, del peso, del tamaño y funcionamiento del motor, y la aerodinámica del vehículo. Estas características no afectan generalmente a las emisiones, las

cuales dependen de la combustión y de la ausencia de sistemas de control de emisiones como los catalizadores. La correlación débil entre las emisiones y los kilómetros recorridos por litro de gasolina, descansa también en la forma en que se diseñan los controles. Cada año se fabrican coches que contaminan por debajo de un cierto nivel. Por otra parte, la eficiencia en el consumo de combustible varía entre los distintos modelos de coches; los requerimientos son únicamente que el consumo de combustible medio de la flota no caiga por debajo de un determinado nivel. Como ilustración consideremos el siguiente ejemplo:

El vehículo B recorre más kilómetros por litro de gasolina que el vehículo A, es decir, su consumo de combustible por kilómetro es menor y por tanto saldría beneficiado respecto al del vehículo A en el caso de fijarse un impuesto sobre la gasolina. Sin embargo, por cada litro consumido el vehículo A emite un menor nivel de VOC que el vehículo B. Luego incrementar el precio de la gasolina no supone un incentivo proporcional para reducir las

Cuadro nº1

Vehículo	Emisiones (gr.VOC/km)	Consumo (km/litro gasolina)	Emisiones/Consumo (gr.VOC/litro gasolina)
Vehículo A	0.15	20	3
Vehículo B	0.15	30	4.5

emisiones, ya que este tipo de medida no tiene en cuenta la relación entre el consumo de combustible y las emisiones. Un incremento del impuesto sobre la gasolina puede también, a largo plazo, aumentar los kilómetros recorridos. Así, si un vehículo menos eficiente, respecto al consumo de combustible, es reemplazado por otro más eficiente, la reducción de los costes variables del nuevo vehículo incentivará hacia un aumento en los kilómetros recorridos. Dependiendo de los niveles de emisiones de los viejos y nuevos coches, el aumento de los kilómetros recorridos podría llevar a un incremento en el total de emisiones. Esta característica del impuesto sobre la gasolina no incentiva una reducción de las emisiones a largo plazo.

– *Superioridad del Impuesto Subsidiario respecto al Impuesto sobre la antigüedad del Coche.* Frecuentemente se propone un impuesto en función de la antigüedad del coche para eliminar los coches viejos del parque móvil y reducir un gran porcentaje de las emisiones del mismo. En promedio, los vehículos más antiguos emiten un mayor nivel de sustancias contaminantes que los nuevos. Los vehículos más viejos fueron diseñados para alcanzar emisiones estándar menos exigentes, y todas los sistemas de control de emisiones tienden a deteriorarse con la edad.

Un modelo basado en la antigüedad del vehículo no discrimina entre vehículos de la misma antigüedad pero que difieren sustancialmente en el ni-

vel de emisiones. También los kilómetros recorridos varían para los coches fabricados el mismo año. Un vehículo que emite un alto nivel de sustancias contaminantes pero que circula muy pocos kilómetros puede producir un menor nivel de sustancias contaminantes que otro más eficiente conducido durante muchos kilómetros. Dado que el nivel total de emisiones depende de las emisiones por kilómetro y de los kilómetros recorridos, es importante tener en cuenta ambas variables para fijar el impuesto. Un modelo basado en la antigüedad del vehículo ignora la diferencia en los niveles de emisión y en el número de kilómetros recorridos, tratando a todos los vehículos del mismo año de igual manera. Este tipo de impuesto no es eficiente ya que no incentiva a los propietarios de, los vehículos más contaminantes a reducir las emisiones, ni reduciendo el nivel de emisiones por kilómetro ni reduciendo el número de kilómetros recorridos, y tiende a penalizar, en términos relativos, a los propietarios de los vehículos menos contaminantes.

#### 4. EL MODELO DE TRANSPORTE

Hasta ahora hemos analizado la bondad de unas políticas de control de las emisiones y hemos podido extraer una serie de conclusiones muy valiosas. Conclusiones relacionadas con la capacidad de adoptar medidas lo suficientemente flexibles como para adaptarse a los distintos tipos de vehículos y al uso que se

da a los mismos, así como al número de kilómetros recorridos. Pero además, y tal como se señalaba al principio, los efectos locales de la contaminación se encuentran muy relacionados con las condiciones de la circulación en el sentido de que son éstas las que determinan su cuantía.

En este apartado se propone un modelo de transporte capaz de generar distintos equilibrios en diferentes escenarios que permiten evaluar la contaminación generada, así como otros efectos externos como la congestión y los consumos extra de combustible. Adicionalmente, el modelo permite analizar el bienestar asociado a distintos equilibrios producidos con diferentes políticas de intervención, políticas de demanda tales como la introducción de peajes fijos e impuestos sobre el combustible, y de esta manera calibrar su eficacia en función de su capacidad de maximizarlo.

En un modelo de transporte el bienestar se caracteriza como un excedente, ie: como los beneficios económicos netos sobre los costes tal y como refleja el área sombreada del Gráfico nº3 a través de unas curvas de demanda y oferta. La curva de demanda<sup>6</sup> representa el beneficio adicional obtenido del último kilómetro recorrido, de ahí que sea también conocida como curva de beneficio marginal. Por su parte, los costes económicos de una actividad como el transporte son representados por la curva de oferta<sup>7</sup>, que muestra los costes marginales aso-

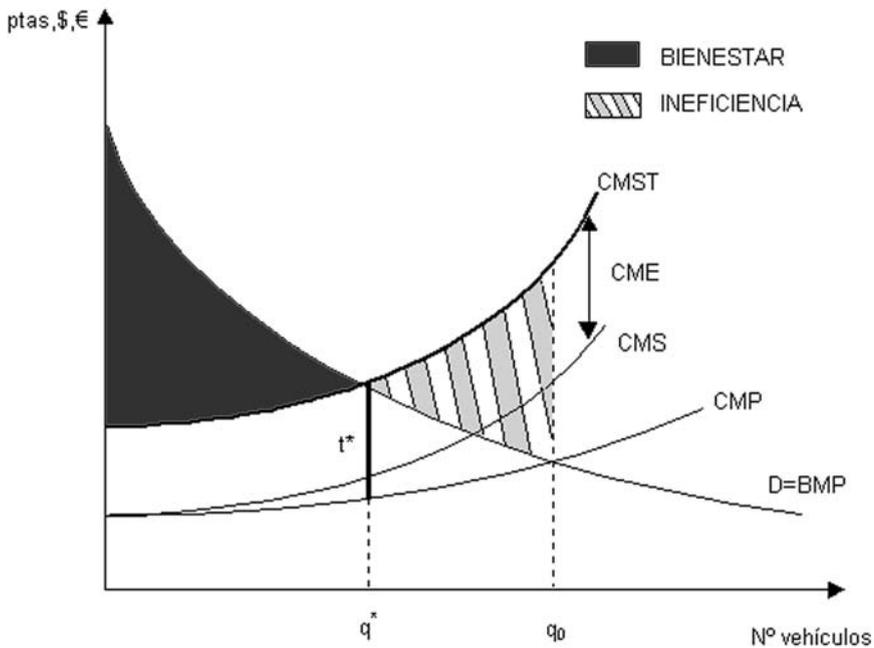
ciados con el último kilómetro recorrido. El área limitada por la curva de oferta y demanda es conocida como el excedente asociado al último kilómetro recorrido. El excedente se maximiza donde intersectan las curvas de demanda y oferta. En ese punto los beneficios asociados al último kilómetro recorrido se igualan a los costes adicionales en los que se ha incurrido.

Sin embargo, la presencia de efectos externos, en nuestro caso la congestión, los consumos extras de combustible y la contaminación, hace que los individuos no internalicen en su totalidad los costes externos en los que incurren. La presencia de tales costes se puede representar distinguiendo entre los costes marginales privados (CMP), los costes marginales sociales (CMS) y los costes marginales sociales totales (CMST). Los costes marginales privados (CMP) son aquellos que los individuos internalizan en su totalidad como los costes de tiempo y consumos de combustible necesarios para llegar al destino deseado. Por su parte los costes marginales sociales (CMS), además de los costes marginales privados, incluyen los costes que el último kilómetro recorrido por un determinado vehículo inflige al resto de usuarios de la red viaria, en este caso los consumos extras de combustible. Finalmente los costes marginales sociales totales (CMST), además de los costes marginales sociales, incluyen los costes adicionales que el último kilómetro recorrido por un determinado vehículo inflige a la sociedad (CME), en este caso la contaminación.

<sup>6</sup> Ver apéndice matemático.

<sup>7</sup> Ver apéndice matemático.

Gráfico nº3



Así, mientras la diferencia entre los costes marginales privados sociales y privados recoge los efectos externos marginales generados a nivel intrasectorial, es decir, entre los usuarios de la red viaria, la diferencia entre los costes marginales sociales totales (CMST) y los privados (CMP) recogen los efectos externos generados no sólo entre los propios usuarios de la red viaria, sino a la totalidad de la sociedad. Los efectos externos infligidos a la totalidad de la sociedad, además de los propios usuarios de la red viaria, son conocidos como costes marginales externos (CME), que en este caso coinciden

con la contaminación marginal generada por un determinado vehículo en el último kilómetro recorrido.

En ausencia de cualquier intervención el nivel de actividad generado (el número de vehículos que circula) vendrá determinado por la intersección entre el coste marginal privado y la curva de demanda (D). Como se observa en el gráfico anterior, con el equilibrio obtenido de dicha intersección ( $q_0$ ), no se maximiza el excedente social (el bienestar social). Los costes marginales sociales totales asociados al último kilómetro recorrido superan los

beneficios marginales obtenidos. La pérdida o ineficiencia que dichos efectos externos causan a la sociedad viene representada por el área rayada del gráfico anterior. Queda claro, por tanto, que el bienestar asociado al transporte por carretera puede ser incrementado restringiendo la actividad, esto es el número de vehículos que circulan. Esto último se puede conseguir mediante un peaje urbano igual al valor de los efectos externos marginales generados, lo que en la literatura se conoce como impuesto pigouviano ( $t^*$ ). Este impuesto supone la total internalización de todos los efectos generados y posibilita alcanzar un equilibrio ( $q^*$ ) en el que se maximiza el bienestar social.

Si bien desde el punto de vista teórico un peaje urbano basado en la modelización del impuesto pigouviano resulta sencillo, la necesidad de cuantificar de manera exacta todos los costes asociados a los efectos externos marginales, hace imposible su cálculo en la práctica. Es por ello que se planteen otro tipo de alternativas que tienen que ver con peajes fijos y otro tipo de mecanismos que afecten a los precios, tales como las variaciones en los precios de los combustibles.

A continuación analizaremos el efecto de distintas políticas de intervención a través de su impacto sobre el bienestar tomando como referencia el equilibrio inicial, obtenido sin intervención alguna. Además, y tal y como se señalaba anteriormente, se analizará también su efecto sobre la contaminación, tomando en este caso como referencia los niveles de contaminación iniciales.

## 5. ANÁLISIS DE ESTÁTICA COMPARATIVA<sup>8</sup>

Mediante el análisis de estática comparativa vamos a estudiar el efecto sobre el bienestar y la contaminación producido con la introducción de peajes fijos e impuestos sobre el combustible. Pero antes es preciso detenerse en una serie de consideraciones previas. En primer lugar hay que señalar que el análisis de estática comparativa presenta varias limitaciones: los equilibrios resultantes no tienen por qué alcanzarse en la realidad y, adicionalmente, pueden no ser estables. Además, por sus características, no es posible conocer la senda de ajuste hacia el equilibrio final al que un *shock* sobre el equilibrio inicial conduce.

Siendo así cabe preguntarse sobre la validez de la estática comparativa para el análisis que aquí se trata. A su favor, entre otras, citamos las siguientes ventajas: permite introducir una gran flexibilidad en el análisis sin necesidad de restricción alguna en la evolución de las variables; no exige de complejas condiciones que garanticen la convergencia hacia los distintos equilibrios finales; ofrece resultados fundamentados en supuestos teóricos ampliamente asumidos en la literatura de transporte; y permite vislumbrar equilibrios que, aunque infrecuentes, refuerzan muchos de los principios en que se basa la eficiencia económica aportando intuiciones muy válidas en materia de política económica.

<sup>8</sup> Ver apéndice matemático para las formas funcionales de las funciones de bienestar y su agregación para distintos modos de transporte.

Con estas premisas vamos a analizar dos tipos de intervenciones: la introducción de peajes fijos, y la variación (aumento) en el precio de los combustibles. Se partirá de formulaciones de intervención que permitan, tanto un tratamiento homogéneo de los distintos tipos de modos de transporte, como un tratamiento diferenciado o heterogéneo de los modos de transporte según sus características. Además este análisis se realizará para distintos escenarios o condiciones de circulación, más o menos congestionadas. De esta manera se podrán extraer conclusiones, a través de su efecto sobre el bienestar, acerca de la posibilidad de aplicar políticas que permitan un tratamiento diferenciado para cada modo de transporte y su eficacia ante condiciones de circulación desiguales.

Entre las medidas de introducción de peajes fijos se analiza la fijación de peajes fijos homogéneos, o de la misma cuantía para todos los modos de transporte<sup>9</sup>, así como peajes fijo heterogéneos, o distintos para cada modo de transporte, y también, un peaje fijo único sobre el modo coche que no es sino un caso particular de peaje heterogéneo. Con el peaje fijo heterogéneo todos los modos de transporte son gravados con un peaje ponderado por su factor de congestión, mientras que en el caso de peaje fijo sobre coche, es este el único modo que recibe un impuesto. La razón de incluir en el análisis estos dos casos particulares de peajes heterogéneos

---

<sup>9</sup> En el caso de un viajero de autobús esta medida es equivalente al de un aumento en el precio de su billete.

os es el de estudiar el efecto de peajes lo suficientemente diferenciados que traten de manera distinta a cada modo de transporte. Así, si en el caso del peaje fijo homogéneo se trata a todos los modos por igual, con el peaje fijo sobre el modo coche se introduce una medida que grava con un mayor peso a este modo respecto al caso de peajes heterogéneos ponderados por su factor de congestión.

Por otro lado, con los incrementos del precio de los combustibles, a imagen del esquema seguido con los peajes fijos, se analizará el incremento homogéneo y heterogéneo en este precio (ponderado por los factores de congestión de cada modo de transporte). El incremento del precio del combustible del modo de transporte coche es nuevamente un caso particular del incremento heterogéneo del precio para todos los modos de transporte<sup>10</sup> en el que únicamente varía el precio para este modo. La razón de haber elegido estos tres tipos de variaciones en el precio del combustible es análoga a la expresada en el caso de los peajes fijos. A continuación comentamos los resultados obtenidos.

### 5.1. Efecto sobre las condiciones de circulación

Por su efecto sobre las condiciones de circulación y, en particular, sobre la velocidad (determina en gran medida el coste

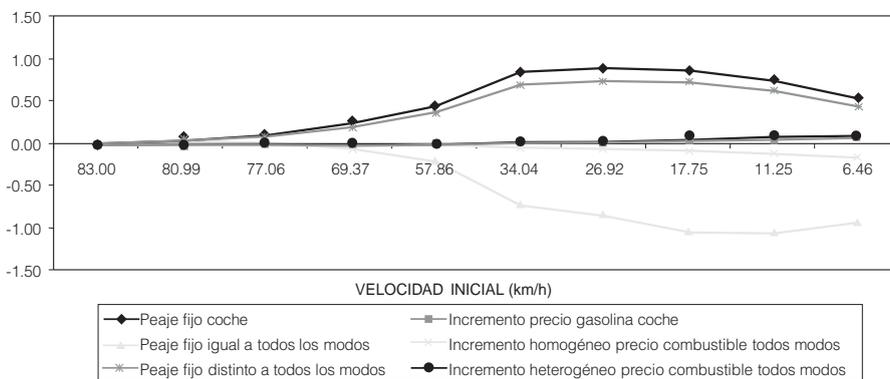
---

<sup>10</sup> En este caso el aumento en el precio del combustible del modo de transporte autobús se trasladará al precio del billete que paga el usuario que, a diferencia del peaje fijo, estaría en función de la parte alicuota que del incremento en el coste del consumo combustible se traslada a los viajeros y que, por tanto, dependerá de la condiciones de circulación.

Cuadro nº2: **Variación velocidad (%)**

VELOCIDAD	Peaje fijo coche	Incremento precio gasolina coche	Peaje fijo igual a todos los modos	Incremento homogéneo precio combustible todos modos	Peaje fijo distinto a todos los modos	Incremento heterogéneo precio combustible todos modos
83.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00
80.99	0.06	0.00	0.05	0.00	0.05	0.00
77.06	0.12	0.00	0.03	0.00	0.11	0.00
69.37	0.26	0.00	-0.04	0.00	0.22	0.01
57.86	0.47	0.01	-0.19	0.00	0.39	0.01
34.04	0.87	0.03	-0.71	-0.02	0.72	0.03
26.92	0.91	0.03	-0.83	-0.03	0.76	0.05
17.75	0.89	0.05	-1.02	-0.06	0.75	0.07
11.25	0.77	0.07	-1.04	-0.09	0.64	0.09
6.46	0.56	0.09	-0.90	-0.14	0.47	0.12

Fuente: Elaboración propia. Simulación del modelo. Ver Apéndice Matemático.

Gráfico nº4: **Variación porcentual de la velocidad (%)**

Fuente: Elaboración propia. Simulación del modelo. Ver Apéndice Matemático.

de los efectos externos) el peaje fijo sobre el modo coche es el que mayores incrementos de la velocidad consigue para cualquier nivel de velocidad de partida respecto a la situación inicial sin intervención. En segundo lugar, es el peaje heterogéneo sobre todos los modos de transporte, el que mayores incrementos de velocidad alcanza, situándose en último lugar la fijación de un peaje homogéneo, o igual, para todos los modos de transporte. Este último tipo de peaje fijo es el que, entre todas las medidas analizadas, tiene efectos más negativos sobre la velocidad y las mayores reducciones en la velocidad registradas.

En el caso de los aumentos en el precio de los combustibles se repite la ordenación realizada para el caso de los peajes fijos, si bien las variaciones en la velocidad son menores en todos los casos, independientemente del signo. Esto es así debido a que el coste del consumo de combustible, además de verse afectado por una variación en su precio, también reacciona ante variaciones en las condiciones de circulación, es decir, variaciones en la velocidad, por lo que si bien inicialmente se produce un aumento en los costes, este aumento se ve en cierta medida compensado por las mejoras en las condiciones de circulación que contrarrestan en parte el efecto inicial.

Merece la pena destacar el hecho de que son las medidas homogéneas, que no discriminan entre los modos de transporte, las únicas que generan reducciones de velocidad y por tanto deterioros en las condiciones de circulación. En este

caso, tanto las medidas de peaje fijo, como las de variaciones en el precio de combustible tienen unos efectos no deseados ya que, a pesar de tratar de internalizar parte de los efectos externos generados, al no discriminar entre los distintos modos de transporte, acentúan la distorsión en los precios de equilibrio que la presencia de dichos efectos externos ocasiona. La distorsión se produce a favor de los más ineficientes haciéndolos relativamente más competitivos.

## **5.2. Efecto sobre el bienestar**

Al igual que ocurría con las variaciones en la velocidad, el peaje fijo sobre el modo coche es el instrumento que genera los mayores aumentos de bienestar, y nuevamente son los peajes fijos homogéneos los que producen las mayores reducciones, en este caso, en el bienestar. Pero además conviene resaltar varios hechos de especial importancia. En primer lugar resulta interesante observar que los aumentos en los niveles de velocidad no garantizan incrementos en los niveles de bienestar, como es por ejemplo el caso de los peajes fijos heterogéneos para todos los modos de transporte. Este hecho resulta de singular importancia, ya que como se ha señalado anteriormente, refuerza el hecho de que, siendo importante elevar los niveles de velocidad de circulación, como consecuencia de una reducción del número de vehículos circulando, no es condición suficiente para garantizar un aumento en el nivel de bienestar ya que hay que tener en cuenta también las variaciones en la composición del tráfico.

Hay que destacar, también, el efecto negativo que tienen los incrementos en los precios del combustible si estos no son lo suficientemente diferenciados para distintos tipos de vehículos, y en particular mayores para los modos más ineficientes por la cuantía de efectos externos que generan dado su relativo mayor número en las redes viarias de lo que correspondería si se tuvieran en cuenta sus costes marginales sociales totales. Así se observa que las medidas que inciden únicamente sobre el modo coche son las que más éxito obtienen, aunque la diferencia es casi imperceptible para las variaciones en el precio de la gasolina.

Por último, queda claro que las medidas relacionadas con aumentos en el precio del combustible no son las más adecuadas para tratar los efectos externos locales, tal y como se señalaba anteriormente, siendo más efectivas otro tipo de medidas tales como los peajes fijos.

## 6. CONCLUSIONES

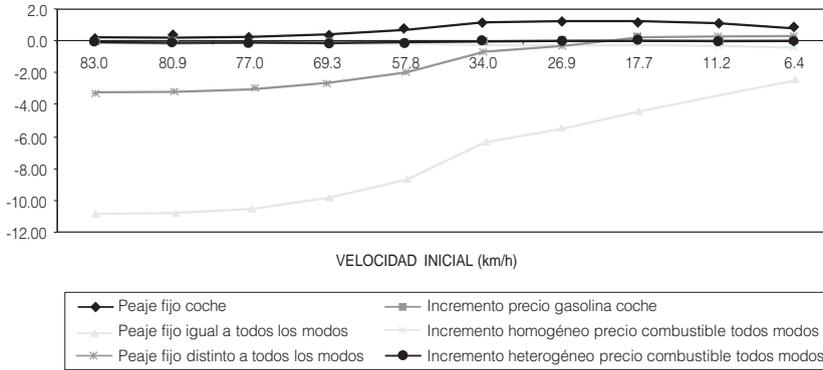
En este artículo se presenta un modelo de transporte que trata tres tipos de efectos externos simultáneamente: la congestión (pérdidas de tiempo), los consumos extras de combustible y la contaminación. Si bien existen ejercicios similares en la

Cuadro nº3: **Variación bienestar (%)**

VELOCIDAD	Peaje fijo coche	Incremento precio gasolina coche	Peaje fijo igual a todos los modos	Incremento homogéneo precio combustible todos modos	Peaje fijo distinto a todos los modos	Incremento heterogéneo precio combustible todos modos
83.00	0.16	0.00	-10.77	-0.13	-3.21	-0.04
80.99	0.20	0.00	-10.74	-0.14	-3.17	-0.04
77.06	0.28	0.00	-10.42	-0.14	-3.00	-0.04
69.37	0.44	0.00	-9.74	-0.14	-2.63	-0.04
57.86	0.70	0.00	-8.64	-0.15	-2.02	-0.04
34.04	1.22	0.00	-6.28	-0.19	-0.65	-0.02
26.92	1.28	0.00	-5.45	-0.21	-0.28	-0.01
17.75	1.26	0.00	-4.34	-0.25	0.14	0.01
11.25	1.09	0.00	-3.35	-0.30	0.32	0.03
6.46	0.80	0.00	-2.37	-0.37	0.33	0.05

Fuente: Elaboración propia. Simulación del modelo. Ver Apéndice Matemático.

Gráfico nº5: **Variación porcentual del bienestar (%)**



Fuente: Elaboración propia. Simulación del modelo. Ver Apéndice Matemático.

literatura reciente<sup>11</sup>, aquí de manera novedosa se analizan estos efectos, en un contexto que permite simular condiciones de circulación cambiantes para contrastar el efecto de diferentes políticas de demanda tales como los peajes fijos y las variaciones en el precio de los combustibles. Previamente es preciso hacer ciertas consideraciones formales.

- En primer lugar, para el cálculo del bienestar es necesario tener en cuenta una función de demanda basada en referencias correctas de los costes de los modos de transporte competidores, es decir, de sus costes marginales sociales. Dichas funciones de demanda, además de ser las adecuadas para calcular el bienestar re-

sultante, son también las necesarias para el cálculo de los flujos óptimos y por tanto de los peajes asociados para alcanzarlos.

- Por ello se apuesta por funciones de demanda que introducen los precios de todos los modos de transporte bajo estudio<sup>12</sup>, ya que la distorsión generada por la presencia de efectos externos no se traslada únicamente a la diferencia entre costes marginales privados y sociales sino también a las funciones de demanda a través de las variaciones en los precios relativos.
- Además, el hecho de incluir funciones de demanda diferentes para distintos niveles de velocidad responde al hecho de que las características

<sup>11</sup> Johansson, O. (1997),

<sup>12</sup> Ver Apéndice Matemático

de desplazamiento varían con los niveles de velocidad, pudiéndose hablar de bienes diferenciados y, por lo tanto, de diferentes funciones de demanda.

- Respecto a la metodología empleada en este artículo hay que señalar que permite introducir una gran flexibilidad en el análisis sin necesidad de restricción alguna en la evolución de las variables. No exige complejas condiciones que garanticen la convergencia hacia los distintos equilibrios finales, ofrece resultados fundamentados en supuestos teóricos ampliamente asumidos en la literatura de transporte. Y, además, permite vislumbrar equilibrios que, aunque infrecuentes, refuerzan muchos de los principios en que se basa la eficiencia económica, aportando intuiciones muy válidas en materia de política económica. Aunque, los equilibrios resultantes no tienen por qué alcanzarse en la realidad y, además, puede ocurrir que dichos equilibrios no sean estables. La relación entre los distintos modos de transporte se limita a que comparten la red viaria en el mismo periodo de tiempo (bajo las mismas condiciones de circulación).

Del modelo desarrollado podemos extraer, entre otras, las siguientes conclusiones:

- Con respecto a la idoneidad de las diferentes políticas de demanda que se han contrastado, el modelo proporciona indicaciones de su efectivi-

dad real en términos de eficiencia. Así, la fijación de un peaje único sobre el modo coche resulta ser la política más efectiva cuando se contabilizan los efectos externos que aquí se analizan, siendo la de peajes diferenciados sobre coche y moto superior a la de peajes idénticos sobre los mismos. Esto responde al hecho de que el coche es el modo de transporte, en estas circunstancias, más ineficiente y cuyo uso produce, por lo tanto, un nivel de ineficiencia social mayor. Al hilo de lo anterior, es necesaria la aplicación de medidas de política económica lo suficientemente flexibles como para que puedan adaptarse a los diferentes modos de transporte, a la intensidad de su uso<sup>13</sup> (kilómetros recorridos) y a las condiciones de circulación.

- Debe quedar claro que la optimización de un sistema de transporte desde una perspectiva social está estrechamente ligada a su eficiencia y, concretamente, a las condiciones de circulación. En este sentido, aunque velocidades de circulación más elevadas significan unos niveles de efectos externos más reducidos, no siempre puede garantizarse la existencia de equilibrios más eficientes ya que, como condición asociada, se debe atender a la composición del flujo de vehículos que la genera. De lo anterior se deduce que, además de monitorizar la evolución del tráfico en base a indicadores que incluyan el

<sup>13</sup> Ver Sección 3.

seguimiento de velocidades o intensidades medias de circulación, es necesario un análisis cualitativo asociado al tipo de vehículos que las generen.

- El hecho de incluir la contaminación como un elemento más a tener en cuenta para la fijación de peajes no incide en la eficacia de la herramienta, siempre y cuando sea empleada para tratar efectos externos que respondan de manera idéntica ante variaciones en la velocidad<sup>14</sup>.
- Por último conviene señalar que parece clara la necesidad de incentivar el

uso del transporte público<sup>15</sup> como alternativa al uso excesivo del transporte privado. Sin embargo, el planteamiento de políticas demasiado posibilistas en favor del transporte público no siempre tiene en cuenta el hecho de que el propio transporte público provoca distorsiones, y que, en la medida en que no contribuya a variar suficientemente la composición del flujo de vehículos (como queda reflejado por las bajas elasticidades entre transporte público y privado), puede convertirse, incluso, en un elemento perjudicial.

---

<sup>14</sup> Ver Gráfico nº2.

---

<sup>15</sup> Ver Gráfico nº1.

## APÉNDICE MATEMÁTICO

### EFFECTOS EXTERNOS

#### Congestión

Recoge las pérdidas de tiempo que la presencia de un vehículo adicional produce sobre el resto ya, que dada la capacidad de la carretera, genera una menor velocidad de circulación, y en definitiva, un aumento del tiempo necesario para llegar a los destinos elegidos. Para cuantificar el valor de la congestión producida será necesario conocer tanto la cuantía de esas pérdidas de tiempo, así como el valor que tiene el tiempo para los distintos individuos.

El sistema de peajes urbanos (*road-pricing*) se ha empleado tradicionalmente para tratar este tipo de efecto externo. La forma más utilizada para calcular el coste del tiempo es una función inversa de la velocidad. Así, el coste del tiempo para el modo  $i$  será:

$$c_i^t = \frac{p_i^t}{V}$$

Siendo  $p_i^t$  la valoración del tiempo (ptas/hora) del usuario del modo  $i$ , y  $V$  el nivel de velocidad medio asociado a todo el flujo de vehículos.

#### Consumo extra de combustible

El consumo de combustible se verá alterado por variaciones en la velocidad. Definimos una relación consumo de combustible-velocidad como la fijada por Fwa y Ang (1992) para el modo  $i$ :

$$g_i^f = \left( a_i^f + \frac{b_i^f}{V} \right)$$

de tal manera que una disminución en la velocidad aumenta el consumo. En situaciones de alta densidad de tráfico se observa una conducción con un patrón de continuas aceleraciones y deceleraciones. Menores niveles de velocidad suponen una intensificación de este tipo de patrón y, por tanto, aumentos en el consumo de combustible y también de la contaminación producida. Bien es cierto que a partir de ciertas velocidades, altas, una mayor velocidad supone un mayor consumo de combustible, sin embargo, en estos casos, la cuantía de los efectos externos no es muy importante y la intervención vía peajes no es tan prioritaria. En nuestro caso, estamos especialmente interesados en situaciones de alta densidad de tráfico y, por tanto, asociadas a velocidades no excesivamente altas, donde la ineficiencia generada por los efectos externos es importante.

Multiplicando el consumo de combustible por el precio del mismo, se obtiene el coste del consumo de combustible, para el modo  $i$ :

$$c_i^f = p^f \cdot \left( a_i^f + \frac{b_i^f}{V} \right)$$

Si bien es cierto que el avance tecnológico ha reducido los consumos de combustible, la mayor potencia y prestaciones

de los vehículos, y el aumento del precio de los carburantes, han atenuado su impacto sobre los costes.

### Contaminación

Suponemos que existe un consumo de medio ambiente que coincide precisamente con las emisiones producidas por cada vehículo específicamente. Consumo por el cual se ha de pagar. Especificamos una relación consumo de medio ambiente-velocidad:

$$g_i^e = \left( a_i^e + \frac{b_i^e}{V} \right)$$

de tal manera que una disminución en la velocidad aumenta el nivel de emisiones, es decir, la contaminación. Esto es debido a que a menor velocidad (continuas aceleraciones y deceleraciones), hay un mayor consumo de combustible, y por tanto aumenta el nivel de emisiones *ceteris paribus*.

Multiplicando el consumo de medio ambiente por el precio del mismo, que está compuesto por el valor que se da a las sustancias emitidas (NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, SO, CO, VOC...), se obtiene el coste del consumo de medio ambiente:

$$c_i^e = p^e \left( a_i^e + \frac{b_i^e}{V} \right)$$

En agregado, el coste del consumo de medio ambiente de todo el flujo de vehículos será:

$$C^P = \sum_{i=1}^n \sum_{e=1}^j c_i^e \cdot q_i$$

donde:

q<sub>i</sub>: modo transporte i (coche, moto, autobús)

e: sustancia contaminante e (NO<sub>x</sub>, VOC, CO)

El coste total de la contaminación asociada al flujo de vehículo dependerá del número de vehículos de cada categoría (coche, moto, autobús,...) y de la valoración monetaria de las emisiones de cada una de las partículas que emiten (NO<sub>x</sub>, VOC, CO).

Un vehículo adicional del tipo k en el flujo de vehículos, provocará el siguiente aumento del coste total de consumo de medio ambiente, contaminación, para todo el flujo:

$$\frac{\partial C^P}{\partial q_k} = \sum_{e=1}^j c_k^e + \sum_{i=1}^n \sum_{e=1}^j \frac{\partial c_i^e}{\partial q_k} \cdot q_i$$

$$\frac{\partial C^P}{\partial q_k} = \sum_{e=1}^j c_k^e + \frac{\partial V}{\partial q_k} \sum_{i=1}^n \sum_{e=1}^j \frac{\partial c_i^e}{\partial V} \cdot q_i$$

Es decir, el coste del consumo de medio ambiente de ese vehículo k adicional, lo único que se tenía en cuenta antes de modificar el impuesto subsidiario (second-best), más el incremento en el coste de consumo de medio ambiente que provoca al resto de vehículos. El efecto externo está compuesto por los dos sumandos, el segundo corresponde al aumento del coste de consumo de medio ambiente provocado al resto de agentes<sup>16</sup>, y el pri-

<sup>16</sup> Al haber un vehículo adicional se reducirá la velocidad lo que provoca aumentos en los consumos de combustible y un aumento en la cuantía de las emisiones y, por tanto, una mayor contaminación o consumo de medio ambiente.

mer sumando corresponde al valor de la contaminación provocada por el propio vehículo adicional, que es también parte del efecto externo, ya que los individuos no internalizan el valor de la contaminación que ellos mismos producen.

### Coste Marginal Privado

El coste marginal privado es la referencia que los individuos toman en la decisión de los viajes a realizar. Está compuesto por los costes que internalizan los propietarios de los vehículos:

$$CMP_k = c_k^t + c_k^f$$

Así, cada propietario de vehículo solo internaliza sus costes de pérdidas de tiempo ( $c_k^t$ ) y de consumo de gasolina ( $c_k^f$ ), olvidándose de los costes que inflige al resto de usuarios.

### Coste total

El coste total representa el agregado de todos los costes de tiempo, combustible y contaminación asociados a todo el flujo de vehículos

$$C = \sum_{i=1}^n \left( c_i^t + c_i^f + \sum_{e=1}^j c_i^e \right) q_i$$

### Coste Marginal Social

El coste marginal social está compuesto, tanto por los costes internalizados por los individuos, así como por el valor de los efectos externos generados al resto de usuarios de la red viaria (intrasectoriales):

$$CMS_k = \frac{\partial C}{\partial q_k} = (c_k^t + c_k^f) + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial c_i^t}{\partial q_k} + \frac{\partial c_i^f}{\partial q_k} \right) q_i$$

$$CMS_k = \frac{\partial C}{\partial q_k} = (c_k^t + c_k^f) + \frac{\partial V}{\partial q_k} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial c_i^t}{\partial V} + \frac{\partial c_i^f}{\partial V} \right) q_i$$

$$CMS_k = CMP_k + \text{Efectos marginales intrasectoriales}_k$$

es decir, el coste marginal privado del vehículo adicional tipo k, más el aumento que su entrada produce al resto de usuarios en forma de aumento de los costes de tiempo, combustible debidos a la disminución en la velocidad de circulación.

### Coste Marginal Social Total

El coste marginal social está compuesto, tanto por los costes internalizados por los individuos, así como por el valor de los efectos externos generados al conjunto de la sociedad:

$$CMS_k = \frac{\partial C}{\partial q_k} = \left( c_k^t + c_k^f + \sum_{e=1}^j c_k^e \right)$$

$$+ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial c_i^t}{\partial q_k} + \frac{\partial c_i^f}{\partial q_k} + \sum_{e=1}^j \frac{\partial c_i^e}{\partial q_k} \right) q_i$$

$$CMS_k = \frac{\partial C}{\partial q_k} = \left( c_k^t + c_k^f + \sum_{e=1}^j c_k^e \right) \cdot$$

$$\left| + \frac{\partial V}{\partial q_k} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial c_i^t}{\partial V} + \frac{\partial c_i^f}{\partial V} + \sum_{e=1}^j \frac{\partial c_i^e}{\partial V} \right) q_i \right.$$

$$CMS_k = CMS_k + CME_k$$

es decir, el coste marginal privado del vehículo adicional tipo k, más el aumento que su entrada produce al resto de usuarios en forma de aumento de los costes de tiempo, combustible y contaminación debido a la disminución en la velocidad de circulación. Donde la contaminación es el coste marginal externo (CME), los

efectos marginales externos causado al resto de la sociedad aparte del resto de usuarios de la red viaria.

Como se muestra en la literatura, Johansson (1997), la mayor parte del efecto externo marginal corresponde a la congestión (pérdidas de tiempo), muy por encima de los consumos de combustible adicionales inducidos y de la contaminación.

### *Funciones de Demanda:*

Para capturar esta distorsión en los precios relativos que los efectos externos generan es necesario que las funciones de demanda dependan del precio de todos los modos de transporte. Las funciones de demanda que a continuación se presentan son funciones de demanda agregada logaritmo-lineales de todos los precios ( $P_i$ ,  $P_j$ ) relevantes (modos de transporte por carretera) y de la velocidad media del flujo de vehículos ( $V$ )<sup>17</sup>. La función de demanda agregada del modo  $k$  será:

$$q_k = A_k \cdot \exp \left( \sum_{j=1}^n E_{kj} \cdot \ln(P_j) + T_k \cdot \ln(V) \right)$$

$$q_k = A_k \cdot \exp \left( E_{kk} \cdot \ln(P_x) + \sum_{j=1, j \neq k}^n E_{kj} \cdot \ln(P_j) + T_k \cdot \ln(V) \right)$$

donde:

$A_k$ : componente autónomo de la demanda

$P_k$ : es el precio del propio modo de transporte  $i$

$P_j$ : es el precio de los otros modos de transporte que consideramos

$V$ : velocidad media del flujo de vehículos

$E_{kk}$ : elasticidades de la demanda respecto al propio precio<sup>18</sup>

$E_{jk}$ : elasticidades de la demanda respecto al precio de otros modos de transporte  $j \neq i$ . Elasticidades cruzadas.

$T_k$ : elasticidades de la demanda respecto a la velocidad

Las variaciones en el precio del propio modo de transporte ( $P_x$ ) nos mueven a lo largo de la curva de demanda, mientras que variaciones en los precios de los modos de transporte alternativos ( $P_j$ ) desplazan las curvas de demanda.

### *Equilibrio Inicial*

Este es el equilibrio que se observa sin ningún tipo de intervención, y está caracterizado porque únicamente se tienen en cuenta los costes marginales privados de cada modo de transporte, los individuos o bien no son conscientes o no están dispuestos a pagar por los efectos externos generados. La función de oferta coincide con la de los costes marginales privados, por tanto, el equilibrio se alcanza donde las curvas de demanda y la de los costes marginales privados de cada modo intersectan. Luego para calcular las cantidades demandadas de cada modo de transporte, los individuos tienen solo en cuenta los costes marginales privados, igualando el beneficio marginal (función de demanda) con su coste marginal privado<sup>19</sup>:

<sup>18</sup> Se han tomado elasticidades constantes para todos los niveles de velocidad.

<sup>19</sup> Se igualan funciones inversas de demanda con los costes marginales privados respectivos.

<sup>17</sup> Habrá una función de demanda distinta para cada nivel de velocidad.

$$P_k = \exp \left( \frac{\ln \left( \frac{q_k}{A_k} \right) - \sum_{j=1, j \neq k}^n E_{kj} \cdot \ln(P_j) - T_k \cdot \ln(V)}{E_{kk}} \right) = CMP_k$$

### Equilibrio Óptimo

Este es el equilibrio donde, dado el nivel de velocidad, se maximizará el excedente social. Dada la presencia de efectos externos es necesaria la intervención para alcanzarlo. Los costes de referencia para alcanzarlo. Los costes de referencia son los costes marginales sociales generados en el último kilómetro recorrido, por lo que la función de oferta difiere de la anterior. La actual se situará a la izquierda de la que tomaba como referencia los costes marginales privados, ya que los costes marginales de todos los modos de transporte son más altos.

Luego para calcular las cantidades demandadas de cada modo de transporte, se tienen en cuenta los costes marginales sociales, igualando el beneficio marginal (función de demanda) con su coste marginal social<sup>20</sup>:

$$P_k = \exp \left( \frac{\ln \left( \frac{q_k}{A_k} \right) - \sum_{j=1, j \neq k}^n E_{kj} \cdot \ln(P_j) - T_k \cdot \ln(V)}{E_{kk}} \right) = CMST_k$$

### Peaje de second-best "Óptimo":

El peaje óptimo es exactamente la diferencia entre el coste marginal social y el coste marginal privado en el equilibrio

generado donde la curva de demanda y la de coste marginal social intersectan, es decir, el valor del efecto externo marginal:

$$\begin{aligned} t_k &= CMS_k - CMP_k \\ t_k &= \left( c_k^t + c_k^f + \sum_{e=1}^j c_k^e \right) \\ &+ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial c_i^t}{\partial q_k} + \frac{\partial c_i^f}{\partial q_k} + \sum_{e=1}^j \frac{\partial c_i^e}{\partial q_k} \right) q_i - (c_k^t + c_k^f) \\ t_k &= \sum_{e=1}^j c_k^e + \frac{\partial V}{\partial q_k} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial c_i^t}{\partial V} + \frac{\partial c_i^f}{\partial V} + \sum_{e=1}^j \frac{\partial c_i^e}{\partial V} \right) q_i \end{aligned}$$

La cuantía del peaje impuesto al vehículo de tipo k será igual al coste de contaminación (o consumo de medio ambiente) que el mismo produce, más los costes adicionales que inflige al resto de vehículos al producirles un aumento en los costes de congestión, consumo de combustible y contaminación<sup>21</sup>. Se ha diseñado un peaje  $t_k$ , medido en (ptas/km) que trata simultáneamente, las pérdidas de tiempo, el incremento de consumo de combustible y el incremento de las emisiones/km (consumo de medio ambiente). Con este peaje se maximiza el bienestar social, entendido como excedente social para un nivel de velocidad dado.

### Bienestar Social. Excedente Social

El bienestar obtenido del uso de un modo de transporte k,  $W_k$ , es cuantificado como un excedente, es decir, el área

<sup>20</sup> Se igualan funciones inversas de demanda con los costes marginales sociales respectivos.

<sup>21</sup> Recordar que a mayor flujo de vehículos, menor será la velocidad de circulación, es decir, lo que provocará que a su vez los costes aumenten ya que.

entre la curva de demanda<sup>22</sup> de cada modo de transporte, tomando los costes marginales sociales como referencia de los precios de los modos de transporte alternativos, y la curva de costes marginal asociada a ese modo en el punto de equilibrio.

$$W_k^* = \int_0^{q_k^*} (P_k(q_k, CMS_{-k}, V) - CMS_k) dq_k$$

$$W_k^* = \int_0^{q_k^*} \left\{ \exp \left[ \frac{\ln \left( \frac{q_k}{A_k} \right) - \sum_{j=1, j \neq k}^n E_{kj} \cdot \ln(CMS_j) - T_k \cdot \ln(V)}{E_{kk}} \right] - \left[ \left( c_k^t + c_k^f + \sum_{e=1}^j c_k^e \right) + \frac{\partial V}{\partial q_k} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial c_i^t}{\partial V} + \frac{\partial c_i^f}{\partial V} + \sum_{e=1}^j \frac{\partial c_i^e}{\partial V} \right) q_i \right] \right\} dq_k$$

Luego el bienestar que se obtiene del transporte por carretera será igual a la suma del bienestar obtenido de cada uno de los modos de transporte por carretera (coche, moto, autobús).

$$W = \sum_{k=1}^n W_k^*$$

$$W = \sum_{k=1}^n \int_0^{q_k^*} (P_k(q_k, CMS_{-k}, V) - CMS_k) dq_k$$

$$W = \sum_{k=1}^n \int_0^{q_k^*} \left\{ \exp \left[ \frac{\ln \left( \frac{q_k}{A_k} \right) - \sum_{j=1, j \neq k}^n E_{kj} \cdot \ln(CMS_j) - T_k \cdot \ln(V)}{E_{kk}} \right] - \left[ \left( c_k^t + c_k^f + \sum_{e=1}^m c_k^e \right) + \frac{\partial V}{\partial q_k} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial c_i^t}{\partial V} + \frac{\partial c_i^f}{\partial V} + \sum_{e=1}^j \frac{\partial c_i^e}{\partial V} \right) q_i \right] \right\} dq_k$$

<sup>22</sup> La curva de demanda en un modelo de transporte representa el beneficio marginal asociado. Por su parte, los costes marginales asociados al último kilómetro recorrido representan la curva de oferta.

Por tanto, la variación porcentual en el bienestar tras la introducción de alguna medida, bien peaje fijo, bien variación del precio del combustible, será:

$$\Delta W = 100 \cdot \left( \frac{W^1 - W^0}{W^0} \right) = 100 \cdot \left( \frac{\sum_{k=1}^n W_k^1 - \sum_{k=1}^n W_k^0}{\sum_{k=1}^n W_k^0} \right)$$

donde:

$\Delta W$ : variación porcentual del bienestar

$W^0$ : bienestar inicial

$W^1$ : bienestar final

$W_k^0$ : bienestar inicial asociado al modo de transporte k

$W_k^1$ : bienestar final asociado al modo de transporte k

### Especificación Velocidad-Flujo

El aumento en el nivel de los efectos externos tiene una relación directa con la evolución creciente del flujo de vehículos, con el aumento de la tasa de motorización. Si desde el punto de vista agregado esto, *ceteris paribus*, supone un aumento en la cuantía de los efectos externos generados, estos se incrementan más aún por el empeoramiento de las condiciones de circulación que la imposibilidad de absorber por parte de las infraestructuras del incremento en el flujo de vehículos provoca. Adicionalmente, si además de lo anterior se incrementa el uso de los vehículos, incremento en los kilómetros recorridos, se supera ampliamente el efecto que el mero aumento en el flujo de vehículos per se provoca.

Centrándonos en los efectos externos por kilómetro, lo que nos permite de mo-

mento obviar el aumento en las distancias recorridas, será la velocidad del flujo de vehículos una adecuada referencia del empeoramiento o mejora de las condiciones de circulación que a su vez influyen directamente en la cuantía de los efectos externos generados. Hay que subrayar que pese a que la velocidad resulta una medida aceptable de las condiciones de circulación, no es definitiva para medir el nivel de efectos externos. Así, redes de carreteras con idénticos niveles de velocidad pueden experimentar flujos de tráfico distintos y, por tanto, diferentes niveles de efectos externos. Podemos pensar en un carretera con un determinado flujo de vehículos, y en otra con el doble de vehículos pero sin embargo con la capacidad suficiente como para permitir que se alcance el mismo nivel de velocidad que la anterior. En el segundo caso, la cuantía de los efectos externos generados será mayor. La entrada de un vehículo adicional puede producir la misma variación sobre el nivel de velocidad en ambas carreteras pero, sin embargo, afecta a un mayor número de agentes en el caso de la carretera con un mayor flujo de vehículos lo que supondrá un mayor nivel de efecto externo marginal. Es por ello que el nivel de los efectos externos generados por cada vehículo depende, además, de la velocidad de circulación, del flujo de vehículos, tanto en número como en composición, así como de las características de la red de carreteras para absorberlo.

A continuación definimos la relación velocidad-flujo de vehículos:

$$\frac{\delta V}{\delta q_i} < 0$$

es decir, el modo en que la velocidad se ve afectada ante una variación en el flujo de cualquiera de los modos de transporte. Al respecto, en la literatura se suelen emplear distintas especificaciones, de las que destacamos las más habituales:

– Especificación lineal velocidad-flujo:

$$V = V_0 - bQ_r$$

– Especificación lineal (o cuasi-lineal) velocidad-densidad:

$$V = V_0 - b \frac{Q_r}{V}$$

– Especificación ponderada de velocidad-flujo, que incluye los dos casos anteriores:

$$V = V_0 - b \frac{Q_r}{V^{1-\gamma}}$$

donde:

$$Q_r = \sum_{i=1}^n \alpha_i q_i$$

siendo el factor de congestión correspondiente a cada modo de transporte<sup>23</sup>.

En este artículo se ha optado por la especificación lineal que, además de su buen comportamiento para redes urbanas, resulta algo más sencilla en su manejo dentro del análisis de estática comparativa, si bien los resultados no pierden robustez.

<sup>23</sup> Para coche; moto; autobús



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKERLOF, G.A. y T.W. DICKENS (1982), "The Economic consequences of cognitive dissonance." *American Economic Review*, vol. 72, pp. 307-19.
- BAUMOL, W.J.-PH. BARDE, D.W. PEARCE (1980), "Detrimental externalities and non-convexity of the production set." *Economica*, vol.39, pp. 160-76.
- CRANDALL ROBERT W., THEODORE E. KEELER y LESTER B. LAVE (1982), "The Cost of Automobile Safety and Emissions Regulation to the Consumer: Some Preliminary Results." *American Economic Review*, vol. 72, no. 2, pp. 324-27.
- DE BORGER, B., MAYERES, y., PROOST, S., & WOUTERS, S. (1996), "Optimal Pricing of Urban Passenger Transport. A simulation Exercise for Belgium." *Journal of Transport Economics and Policy*, vol. 30, pp. 31-54.
- GLAISTER, S, y D. LEWIS (1978), "An Integrated Fares Policy for Transport in London." *Journal of Public Economics*, vol. 9, pp. 341-55.
- GRUENSPECHT HOWARD K. (1982), "Differentiated Regulation: The Case of Auto Emissions Standards." *American economic Review*, vol. 73, no 2, pp.328-31.
- ITURRIAGA IBON y XABIER GALARRAGA (1998). "Externalidades del transporte por carretera en el Área del Gran Bilbao: una alternativa para road-pricing". Mimeo.
- JANSSON, JAN OWEN (1994), "Accident Externalities Charges." *Journal of Transport Economics and Policy*, vol. 28, no.2, pp. 31-43.
- JOHANSSON, O. (1997), "Optimal Road Pricing: simultaneous treatment of time losses, increased fuel consumption, and emissions." *Transportation Research*, vol. 2D, no. 2, pp.77-87.
- JOHANSSON, O. (1997), "Optimal Road Pricing with respect to accidents in a second-best perspective." *International Journal of Transport Economics*, vol.24, pp.343-65.
- JOHANSSON, O. y T. STERNER (1998), "What is the scope for environmental road pricing?" in Button, K.J. and E. Vehoef (eds) *Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment: Issues of Efficiency and Social Feasibility*. Edward Elgar, Aldershot. Forthcoming.
- JOHNSON, BRUCE (1964), "On the economics of road congestion" *Econometrica*, vol.32, no.1-2, pp.137-50.
- KEELER, THEODORE E. & SMALL, KENNETH A. (1977), "Optimal Peak-Load Pricing, Investment, and Service Levels on Urban Expressways" *Journal of Political Economy*, pp.1-25.
- KOHN, ROBERT E. (1978), "A Linear Programming Model for Air Pollution Control". The MIT Press. Cambridge, Massachusetts, and London, England.
- LAVE, CHARLES A. (1985), "Speeding, Coordination, and the 55 mph limit." *American Economic Review*, vol 75, pp. 1159-64.
- MORNING HERBET (1969), "The Peak Load Problem with Increasing Returns and Pricing Constraint" *American Economic Review*, vol. , pp. 693-705.
- NEWBERY, D.M. (1998a), "Road user charges in Britain." *Economic Journal*, vol. 98 (Conference), pp. 161-76.
- NEWBERY, D.M. (1998b), "Road Damage Externalities and Road User Charges". *Econometrica*, vol.56, no. 2, pp. 295-316.
- SANDMO, A. (1976), "Direct versus indirect Pigovian taxation." *European Economic Review*, vol.7, pp. 37-49.
- VICKREY, W.S. (1969), "Pricing in urban and suburban transport." *American Economic Review*, 59, pp. 251-261.
- VITALIANO DONALD F. y HELD, JAMES (1991), "Road accident external effects: an empirical assesment." *Applied Economics*, vol.23, pp. 373-78.
- WALTERS, A. A. (1961), "The Theory and Measurement of Private and Social Cost of Highway Congestion." *Econometrica*, vol. 29, no. 4, pp. 667-98.