

# Los costes de la congestión urbana: estimación de cambios de bienestar derivados de la implementación de un cobro por congestión

Luis A. Guzmán-García

Investigador Centro de Investigación del Transporte (TRANSyT-UPM)

## RESUMEN

El objetivo de esta ponencia es la optimización del valor de una tarifa de congestión dentro un análisis de coste/beneficio (CBA), cuyo objetivo principal es maximizar una función objetivo compuesta por diferentes indicadores de un sistema de transporte, dentro de una zona de estudio. El proceso de optimización se realiza con el apoyo de un modelo de usos del suelo y transporte, adaptado y calibrado para la Comunidad de Madrid. El peaje se aplica a los usuarios del coche que tengan como destino el centro del municipio de Madrid (almendra).

Los flujos, costes y tiempos de viaje (según cada escenario), se estiman con un modelo de usos del suelo y transporte (LUTI, Land Use and Transport Integrated), lo que permite, por medio del desarrollo de un modelo de optimización, calcular los cambios de una función objetivo, según el valor de la nueva tarifa. Cuatro costes principales son identificados, clasificados de la siguiente manera: los cambios en los costes de los usuarios (tasas, ahorros de tiempo y costes de operación), beneficio de los operadores, el valor de las externalidades (emisión de gases de efecto invernadero, contaminantes y accidentes) y la recaudación por impuestos de los combustibles.

Una vez realizado el análisis, se ha encontrado una tarifa óptima para el peaje de ingreso a la almendra de 1.15 € en la hora punta. Esta tarifa maximiza la función objetivo planteada. Este cobro adicional hace que se presente un cambio modal del coche hacia el transporte público de un 2% aproximadamente, mientras que el resto de viajeros, prefiere cambiar su destino habitual, por otras zonas más alejadas del centro, reduciendo entre otras cosas las emisiones en el centro de Madrid.

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso creciente del coche en Europa, a pesar del continuo aumento del precio de los combustibles, hace que nuestros sistemas de transporte se basen en un modo poco sostenible. Esto ha hecho que muchos planificadores comprendan que el uso de medidas fiscales es útil para mantener el tráfico en un nivel razonable (Rich, et al., 2007). Así, (Eliasson, 2009) dice que el valor de una tarifa por congestión produce un excedente social a un nivel agregado, aunque también dice que existen limitaciones físicas, técnicas, económicas o políticas que restringen alcanzar una tarifa óptima. Es por esto que una buena política, pero mal diseñada puede causar efectos contrarios a los deseados.

Existen algunas experiencias sobre este tipo de políticas: Londres ha implementado con éxito un peaje urbano en el centro de la ciudad, logrando reducir la congestión cerca del 30% dentro del área acordonada (Leape, 2006). En Estocolmo han finalizado un estudio piloto que dice que al implementar un sistema de este tipo se obtendría un gran excedente social (Eliasson, et al., 2009). Aunque en ciertos lugares, la implementación de un sistema de peaje urbano pueda traer consecuencias benéficas, existe un problema de transferibilidad de resultados de un lugar a otro (Rich, et al., 2007). Un punto esencial es el nivel de congestión, ya que cuanto más congestionada se encuentre una zona, mayores ganancias se esperarán si dicha congestión se puede reducir por esta regulación, así que los resultados no pueden ser transferibles ya que la estructura urbana y el nivel de congestión varían de un sitio a otro.

De esta manera, en esta ponencia se presenta un análisis coste/beneficio para un sistema de cobro

por congestión utilizando un modelo de usos del suelo y transporte y un modelo de optimización (el cual hace parte de la Tesis Doctoral del autor). El punto central de modelizar el cobro de una tarifa por congestión, es el estudio de los impactos que esta medida tendría sobre la ciudad, así como encontrar un valor que maximice el beneficio de la sociedad. En este caso, los efectos de la tarificación vial se aplicarán para el ingreso al centro de la ciudad de Madrid (almendra) y se evaluarán sus efectos a largo plazo.

Este desarrollo incorpora, además de un modelo dinámico de usos del suelo y transporte, un módulo de optimización de funciones objetivo compuestas por diferentes estrategias. Para este propósito, se utiliza como herramienta de apoyo el modelo MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator) desarrollado por (Pfaffenbichler, 2003) y adaptado y calibrado a la Comunidad de Madrid.

## 2. METODOLOGÍA

Con el fin de poder evaluar el impacto del cobro de una tarifa por congestión, es necesario definir previamente un objetivo con el fin de medir el impacto de dicha estrategia. Tradicionalmente las estrategias se evalúan mediante un CBA estático (Shepherd, et al., 2006). Sin embargo se ha desarrollado un enfoque alternativo basado en un modelo de optimización dentro de un marco dinámico de sistemas de transporte y usos del suelo, que compara dos escenarios y maximiza una función objetivo.

El modelo MARS es un modelo de interacción entre el uso del suelo y el transporte que trabaja con un nivel de agregación importante y hace evaluaciones a largo plazo (30 años). Fue desarrollado como una alternativa al tradicional modelo de cuatro etapas, proporcionando un ahorro de tiempo ya que se omite el paso de asignación, trabajando con relaciones de velocidad-intensidad en lugar de una red completa. MARS asume que los usos del suelo no son constantes, sino que hacen parte de un sistema dinámico que se ve influido por las infraestructuras de transporte. Cabe señalar que en este caso de estudio, las respuestas de los usos del suelo a las estrategias de transporte son pequeñas, razón por la cual no se tuvieron en cuenta los beneficios de los viajeros debido al cambio en el usos del suelo. Un análisis detallado del modelo básico y su funcionamiento puede verse en (Pfaffenbichler, 2003). En la Tabla 1 se muestra una pequeña descripción del modelo MARS Madrid en términos de la oferta y demanda.

Características	Modelo MARS
Número de zonas	90
Modos de transporte	Coche, transporte público, caminar
Efectos de congestión	Curvas específicas de intensidad-velocidad
Costes generalizados	Tiempo de recorrido, tiempos de espera, acceso y salida, tiempos de búsqueda de parking, tarifas
Propósitos de viaje	Movilidad obligada y no obligada ( <i>commuting y others</i> )
Características del hogar	Residentes empleados, nivel de motorización, ingreso medio por hogar
Elección de ruta	No
Elección de modo y destino	Simultáneo
Respuesta de la demanda	Viajes movilidad obligada inelástica. Presupuesto de tiempo de viaje
Respuesta de los usos del suelo	Si

**Tabla 1 – Características del Modelo de Planificación Estratégica**

El procedimiento de optimización, es el núcleo del marco de evaluación de las medidas evaluadas. En la Figura 1 se muestra la forma en que el transporte y los usos del suelo forman parte de un sistema dinámico, compuesto por ciclos de retroalimentación a largo plazo, además de su interacción con el modelo de optimización. El modelo de optimización consta de una función objetivo basada en la teoría del excedente del consumidor (EC).

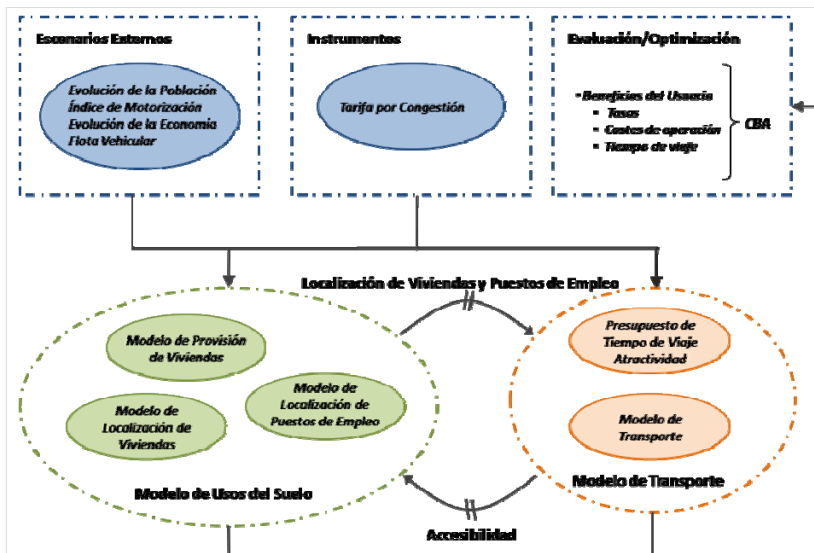


Figura 1 – Estructura del Proceso de Modelización y Optimización

Este concepto se define como los beneficios sociales que se obtiene de una política, en donde los usuarios, en su condición de viajeros, propietarios de coches y viviendas sacan algún tipo de provecho. Por ejemplo, un usuario realizaría un viaje si éste no tardara más de 20 min, esto quiere decir que el valor total de ese viaje es equivalente a 20 min del coste del tiempo de viaje. Si el tiempo real de viaje es de sólo 15 min, entonces el excedente del viajero es

de 5 min. Si un cambio en el sistema de transporte reduce este tiempo, por ejemplo a 12 min, el incremento en el excedente del usuario es de 3 min más (TAG Unit 3.5.3, 2010).

## 2.1. Diseño del Sistema de Cobro

En este ejercicio, la tarifa por congestión se aplicó a los coches que ingresan al centro de Madrid desde cualquier punto de la Comunidad de Madrid, tal como se muestra en la Figura 2. El área de la zona de peaje es de 41,8 km<sup>2</sup> e incluye siete distritos de la capital: Centro, Arganzuela, Retiro, Salamanca, Chamartín, Tetúan y Chamberí. Esta zona de estudio tiene 1.012.471 habitantes

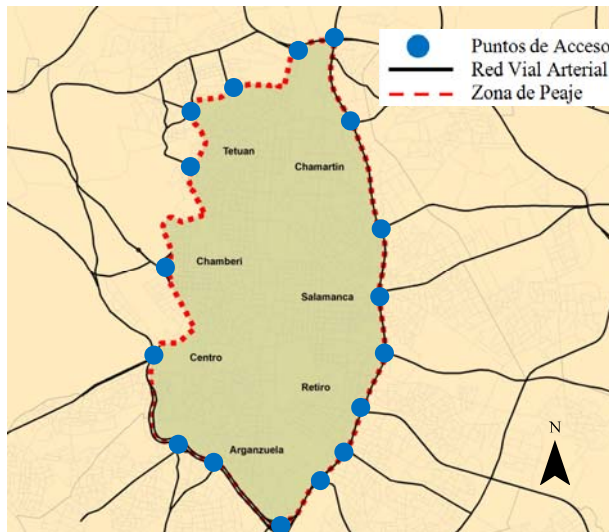


Figura 2 – La Zona de Cobro

(INE, 2008), de los cuales unas 250.000 personas viajan a sus lugares de trabajo fuera de la almendra en coche. También se encuentran 83.254 lugares de trabajo que emplean a 862.405 personas (INE, 2008), de los cuales cerca del 30% vienen desde fuera de la almendra (EDM'04, 2006). Estos viajeros serían los afectados directamente por la nueva tarifa. Quienes salgan de la zona de peaje, no tendrían que pagar la tasa.

## 2.2. Tiempos y Costes de Viaje

Los tiempos y costes de viaje se calculan de forma independiente de tal forma que se crea una función de utilidad (impedancia) para cada modo. Estas funciones también

incluyen las percepciones subjetivas de los usuarios del sistema según las diferentes partes del viaje. De esta manera, un viaje en transporte público consta de las siguientes etapas:

- Tramo de caminata desde el origen *i* hasta la parada del transporte público *I*
- Recorrido desde la parada *I* hasta el destino *J*
- Tiempo de transbordo (de ser necesario)
- Tramo de caminata desde la parada *J* de transporte público hasta el destino final *j*

Cada una de estas etapas es percibida y evaluada por los residentes de cada zona de manera diferente, lo que hace que cada etapa de un viaje de este tipo se vea afectada por un valor que le

asigna cada usuario según su propia percepción. Entonces, la función de tiempos y costes para un viaje de transporte público deberá incluir los aspectos inherentes al viaje, como tiempos, costes y percepción del usuario. Por otro lado, en el transporte privado, al igual que en el transporte público, cada etapa del viaje es percibida de forma diferente, según las siguientes etapas:

- Tramo de caminata desde el origen  $i$  hasta el lugar de aparcamiento  $I$
- Recorrido desde el aparcamiento hasta  $I$  el destino  $j$
- Tiempo de búsqueda de aparcamiento  $J$
- Tramo de caminata desde el lugar de aparcamiento  $J$  hasta el destino final  $j$

### 2.3. Escenarios

Es necesario un escenario de referencia para cuantificar el impacto de las medidas a implementar, E0, que incluye únicamente las infraestructuras construidas en el año 2004 y no se considera ninguna intervención a lo largo del periodo de evaluación. De esta manera, en la Tabla 2 se muestran los escenarios a evaluar.

Escenario	Descripción	Año Implementación	Año Horizonte
E0	Escenario base. No se hace nada	-	2034
E1	Tarifa por congestión	2007	2034

**Tabla 2 – Escenarios Evaluados**

Para evaluar los cambios en el beneficio de los viajeros, en el escenario 1 (E1) sólo se ha incluido la implementación de la tarifa por congestión. Esta medida se implementa en el año 2007, calculando un valor óptimo tal que maximice el valor actual neto (VAN) de la función objetivo propuesta y evaluando sus efectos a largo plazo.

### 3. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

El proceso de optimización consiste en buscar la mejor solución a una función objetivo bajo un amplio espacio de valores posibles; es decir, se basa en la búsqueda de parámetros (definidos previamente y según su escenario) por medio de sucesivas iteraciones directas a través de un amplio rango, con el fin de encontrar los valores óptimos de dichos parámetros. Este proceso de optimización permite maximizar la función objetivo variando uno o más parámetros definidos anteriormente, por medio del algoritmo de Powell, sin utilizar derivadas parciales.

El método de Powell (Powell, 1964), busca un mínimo local de una función dada para un conjunto de vectores lineales independientes sin utilizar derivadas y conocido como uno de los métodos de direcciones conjugadas (Kamola, et al., 2001). Este método se caracteriza por proporcionar una rápida convergencia en el marco de los métodos de búsqueda directa. La idea básica consiste en dividir la optimización de dimensión  $N$ , en  $N$  problemas independientes de minimización unidimensionales. Así, para cada problema unidimensional se implementa una búsqueda binaria para encontrar el mínimo local en un determinado rango. Además, en sucesivas iteraciones, se estiman las mejores direcciones que pueden seguir las búsquedas unidimensionales (Kishihara, et al., 2005). Este algoritmo usa de forma efectiva datos de las iteraciones anteriores para construir direcciones para la aceleración y al mismo tiempo evita caer en una secuencia de búsquedas coordinadas (Coello, 2000). Además, el método se basa en el uso de una función cuadrática, por lo cual cuenta con una base teórica sólida. Según (Renders, et al., 1994), este método es el más preciso cuando se tiene la necesidad de un número de evaluaciones de la función objetivo de varias iteraciones. Entonces, si tenemos  $\{\chi_i, i=1, 2, \dots, n\} \in \mathbf{P} \subseteq \mathbf{R}_n$  = un conjunto de vectores linealmente independientes en  $\mathbf{P}$ , y siendo  $\mathbf{p}_0$ =punto de partida, la iteración del procedimiento es:

1. Para  $i=1, 2, \dots, n$  se calcula  $\lambda_i$  de tal manera que  $f(\mathbf{p}_{i-1} + \lambda_i \chi_i)$  sea un mínimo definido por  $\mathbf{p}_i = \mathbf{p}_{i-1} + \lambda_i \chi_i$
2. Encontrar un entero  $m$ ,  $1 \leq m \leq n$ , de tal manera que  $\{f(\mathbf{p}_{m-1}) - f(\mathbf{p}_m)\}$  sea un máximo y definir

$$\Delta = f(\mathbf{p}_{m-1}) - f(\mathbf{p}_m)$$

3. Calcular  $f_3 = f(2\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_0)$  y definir  $f_1 = f(\mathbf{p}_0)$  y  $f_2 = f(\mathbf{p}_n)$
4. Si cualquiera  $f_3 \geq f_1$  y/o  $(f_1 - 2f_2 + f_3)(f_1 - f_2 - \Delta) \geq \frac{1}{2}\Delta(f_1 - f_3)^2$  usar las viejas direcciones  $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n$ , para la siguiente iteración y usar  $\mathbf{p}_n$  para la siguiente,  $\mathbf{p}_0$  de lo contrario.
5. Definiendo  $\chi = (\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_0)$ , se calcula  $\lambda$  de modo que  $f(\mathbf{p}_n + \lambda\chi)$  sea mínimo, usar  $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_{m-1}, \chi_{m+1}, \chi_{m+2}, \dots, \chi_n, \chi$  como las direcciones y  $\mathbf{p}_n + \lambda\chi$  como el punto de inicio de la nueva iteración.

Hoy en día, según (Burns, et al., 2007), es ampliamente reconocido que este tipo de técnicas de optimización son las más adecuadas para este tipo de modelos. Esto se debe a que estos procedimientos eligen, combinan y comparan los resultados de la búsqueda, presentando una rápida convergencia cuadrática y no requieren realizar derivas parciales de la función objetivo. Ejemplos de optimización de estrategias de transporte pueden verse en (Shepherd, et al., 2006), (Zhang, et al., 2006) y (Jonsson, 2008), entre otros.

Una vez definido el proceso de optimización, se supone que la medida de cobro por congestión puede aplicarse en cualquier año de la evaluación ( $t=1, 2, \dots, 30$ ), lo que significa que en teoría pueden existir 30 valores óptimos diferentes. En la práctica, se evaluará el valor actual neto (VAN) de la función objetivo dada por la ecuación (1), utilizando una tasa de descuento  $r=4.5\%$ . Tradicionalmente la evaluación de medidas de este tipo es de forma discreta y se analizan en un solo periodo de tiempo, sin embargo, para un planeamiento eficaz es necesario hacer la evaluación a largo plazo, ventaja que nos proporciona este método.

$$Max F.O. = \sum_{t=0}^{30} \sum_{ij} \frac{1}{(1+r)^t} \cdot [\Delta EC_{ij}(t) + \Delta P_{ij}(t) + \Delta E_{ij}(t) + \Delta F_{ij}(t)] \quad (1)$$

La función objetivo, está definida por el beneficio de los usuarios ( $\Delta EC_t$ ), que incluye los ahorros de tiempo y dinero ocasionados por la implementación de una estrategia. El beneficio de los operadores ( $\Delta P_t$ ), los beneficios relacionados por la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, contaminantes y costes de accidentes ( $\Delta E_t$ ) y el recaudo por el impuesto a los combustibles ( $\Delta F_t$ ).

### 3.1. Cálculo y Desagregación de la Función de Bienestar

El beneficio de un sistema de transporte se define como la parte de los beneficios sociales que se obtiene de una estrategia, en donde sus usuarios, en su condición de viajeros y propietarios de coches sacan algún tipo de provecho. En este caso, el cálculo del beneficio para los usuarios del sistema de transporte, se basa en la teoría convencional del excedente del consumidor (EC) (Fontaine, 1981), donde los beneficios se obtienen de los cambios en los costes del transporte, en los tiempos de viaje y en los cambios en la movilidad.

Por simplicidad del análisis, se ha supuesto que los costes relevantes son el tiempo y costes de viaje y la tarifa por congestión. Así, llamamos  $T_{ij}$  el número de viajes de cada par OD que van del origen  $i$  al destino  $j$ ,  $t_{ij}$  el tiempo de viaje multiplicado por el correspondiente valor del tiempo,  $c_{ij}$  los costes de operación (combustible + costes fijos) y  $\tau_{ij}$  los costes correspondientes a tarifas adicionales como peajes, parking o tarifas de transporte público. Con el superíndice 0 se define el escenario base (sin tarifas) y con el 1, el nuevo escenario. Como el modelo MARS tiene un par OD por cada relación zonal  $ij$ , se supone que solo hay una ruta óptima de  $i$  a  $j$ , lo que quiere decir que al aumentar el coste viajar de  $i$  a  $j$ , se puede producir un cambio modal, debido a que el transporte público puede llegar a ser más atractivo que el coche según el nivel de coste percibido.

De esta manera, se desarrolla un marco de evaluación de un sistema de transporte multimodal por medio de un análisis de coste/beneficio, basado en la distribución de beneficios por modo de transporte según su origen, defendido por Robert Sugden (Sugden, 1999). La función de distribución de estos beneficios ( $\Delta EC$ ) es la mostrada en la ecuación (2), para cada modo  $m$ .

$$\Delta EC = \frac{1}{2} \sum_t \sum_{ij} (T_{ij}^0 + T_{ij}^1) \cdot [(t_{ij}^0 - t_{ij}^1) - ((c_{ij}^0 + \tau_{ij}^0) - (c_{ij}^1 + \tau_{ij}^1))] \quad (2)$$

De acuerdo a los cálculos, el valor de los costes de operación ( $c_{ij}$ ) y del tiempo de viaje ( $t_{ij}$ ), dependerá de cada par OD (distancias y tiempos de recorrido) y los costes de operación varían de un escenario a otro, ya que es posible que el destino de algunos usuarios cambie, debido al mayor coste de viajar a la almendra en coche, lo que nos ayuda en aumentar la precisión del cálculo del bienestar ya que los usuarios con mayores valores de tiempo podrían hacer viajes más cortos o en modos más baratos. De esta manera, el EC se puede desagregar en los siguientes términos, tanto para viajeros de movilidad obligada (*commuting*) y no obligada, según el modo de transporte  $m$ .

$$\text{Tasas} \quad \frac{1}{2} \sum_t \sum_{ij} (T_{ij}^1 + T_{ij}^0) \cdot (\tau_{ij}^0 - \tau_{ij}^1) \quad (3)$$

$$\text{Costes de Operación} \quad \frac{1}{2} \sum_t \sum_{ij} (T_{ij}^1 + T_{ij}^0) \cdot (c_{ij}^0 - c_{ij}^1) \quad (4)$$

$$\text{Tiempo de Viaje} \quad \frac{1}{2} \sum_t \sum_{ij} (T_{ij}^1 + T_{ij}^0) \cdot (t_{ij}^0 - t_{ij}^1) \quad (5)$$

$$\text{Operadores} \quad \sum_t \sum_{ij} T_{ij}^1 \cdot (\tau_{ij}^1 + t_{ij}^1) - T_{ij}^0 \cdot (\tau_{ij}^0 + t_{ij}^0) \quad (6)$$

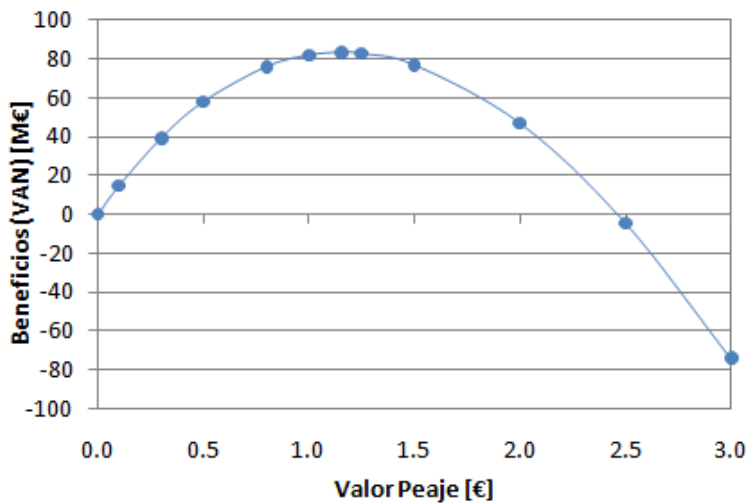
La ecuación (3) se refiere a los ingresos del sistema, dados por el cambio en los costes de viajar (tarifas y peaje), según el modo. La ecuación (4), estima los ahorros por los costes de operación de los coches, básicamente combustible. La ecuación (5) incluye los ahorros de tiempo debido a la implementación de la estrategia. Finalmente, la ecuación (6), estima el beneficio de los operadores. Para calcular el valor de las externalidades y el recaudo por impuestos a los combustibles, se utilizan ecuaciones muy similares a la ecuación (6). De esta manera ahora disponemos de un marco de evaluación que permite llevar a cabo un CBA. Los beneficios (o pérdidas) esperados por la implementación del cobro de una tarifa por congestión son:

- Beneficios debido a la reducción de la congestión (externalidades)
- Beneficios derivados del menor consumo de combustible (costes de operación)
- Beneficios provenientes del cobro de la tarifa
- Beneficios por el aumento del uso del transporte público
- Pérdidas por los menores viajes al centro (por la menor recaudación)
- Pérdidas por menor recaudación de impuestos a los combustibles

La clave de esta evaluación es encontrar el equilibrio entre saber qué beneficios pueden obtenerse a través de una estrategia de este tipo, teniendo en cuenta las desventajas ocasionadas. Según (Hyman, et al., 2002) es obvio que no todas las mejoras del transporte generan los mismos niveles de bienestar. En un escenario ideal, la mayoría de las inversiones en transporte deberían generar mayores beneficios que sus costes de implementación, sin embargo, esto no es tan claro. En este caso, el beneficio del escenario base será nulo, con el fin de que sirva como un escenario de comparación.

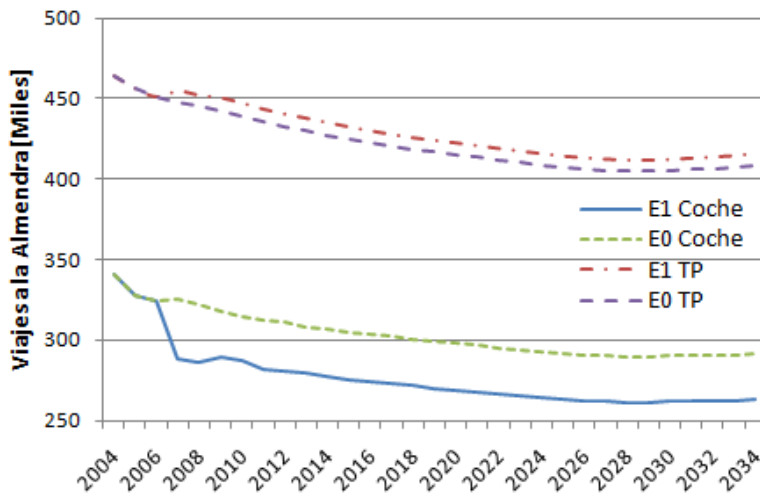
#### 4. RESULTADOS

Antes de discutir los resultados del valor del peaje, es importante recordar que este valor óptimo se obtiene en base únicamente a la función objetivo, ecuación (1); es decir, el EC del usuario y proveedores, externalidades y recaudo de impuestos. En cuanto a la hora valle, se halló que no es significativo, frente a la función objetivo, disponer de cobros adicionales. Así que los resultados indican que solo es necesario implementar un peaje en las horas punta.



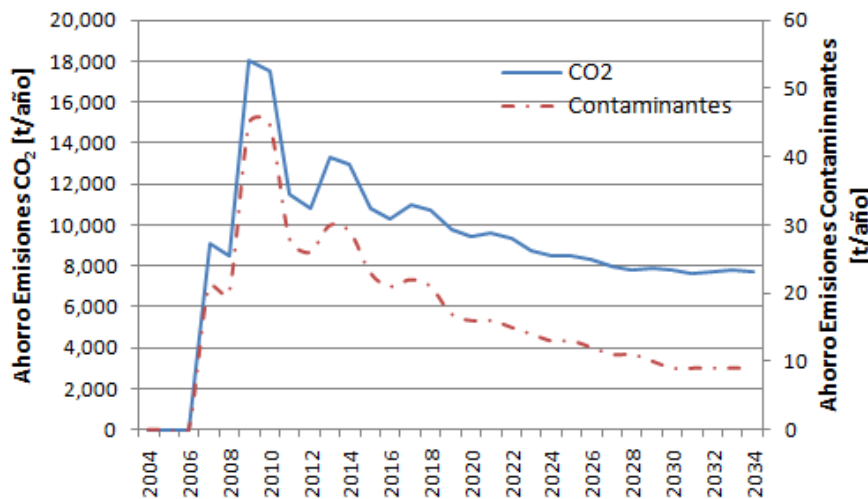
**Figura 3 – Curva de Optimización de la Tarifa en Hora Punta**

movilidad, en general el flujo de viajeros con destino almendra muestra una clara tendencia descendente a lo largo de los años, perdiendo protagonismo frente a anillos periféricos.



**Figura 4 – Patrones de Movilidad**

En la Figura 4 se puede observar como la implementación de la tarifa hace que el descenso de coches con destino a la almendra, sea aún más acentuado (cerca de 9%), como era de esperarse. En cuanto al número de viajeros en transporte público, la demanda presenta una tendencia descendente, que crece moderadamente (2%), en el momento que se implementa la medida de cobro. Este aumento en la demanda, es menor que el descenso de los viajes en coche, lo que hace pensar que otros destinos fuera de la almendra pueden ser más atractivos y así algunos viajeros cambien de destino. Así, aunque el valor óptimo del peaje es bajo, su efecto como factor disuasorio a muchos usuarios del coche es importante.



**Figura 5 – Ahorro en Emisiones**

De esta manera, en la Figura 3 se muestra la curva de valores de peaje frente a los beneficios estimados de la función objetivo dada por la ecuación (1). Un resultado interesante es que no es necesario disponer de tarifas muy altas para maximizar los beneficios. En este caso el valor óptimo hallado es de 1.15 € en hora punta, dando como resultado un valor actual neto de beneficio social de más de 80 M€, con respecto al escenario base. Al ver los patrones de

En la Figura 4 se puede observar como la implementación de la tarifa hace que el descenso de coches con destino a la almendra, sea aún más acentuado (cerca de 9%), como era de esperarse. En cuanto al número de viajeros en transporte público, la demanda presenta una tendencia descendente, que crece moderadamente (2%), en el momento que se implementa la medida de cobro. Este aumento en la

Por otro lado, este valor óptimo hace que se produzca una reducción de cerca de 18.000 t/año de CO<sub>2</sub> en su punto máximo, tal como se puede ver en la Figura 5. En este gráfico se puede observar cómo dos años después de la implementación de la medida, se produce el máximo ahorro en emisiones, tanto de

gases de efecto invernadero, como de otros contaminantes (NO<sub>x</sub> y PM<sub>10</sub>). Sin embargo, a medida que pasa el tiempo, este ahorro tiende a ser menor, en gran medida debido a las mejoras tecnológicas del parque vehicular. En cuanto a los accidentes, desafortunadamente al descongestionar el centro de Madrid, la velocidad de recorrido de los coches aumenta lo que ocasiona un pequeño incremento en el nivel de accidentabilidad.

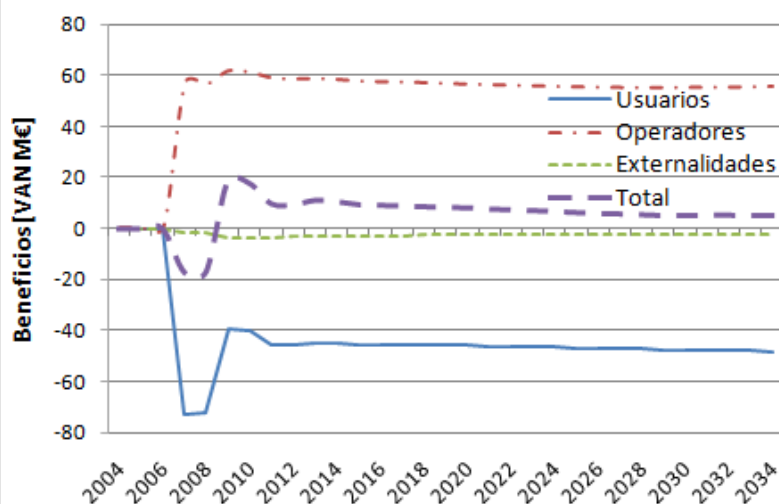
En cuanto al análisis coste/beneficio en sí, realizado con base en la maximización de la función objetivo, muestra que a través del sistema de peaje se obtiene un considerable excedente social neto, tal como se observa en la Tabla 3. En esta tabla se muestra como el EC de los usuarios del sistema de transporte es negativo. Esto era de esperar ya que el incremento del coste de usar el coche repercute de manera directa sobre el usuario y el ahorro en tiempos que llega a ser de 170 M€, no alcanza a compensar lo recaudado por el sistema a lo largo del periodo de evaluación, el cual se acerca al valor actual neto de 944 M€, todo esto solo para la hora punta. En cuanto a los costes de operación, el ahorro es importante, aunque no muy significativo ya que apenas supera los 11 M€.

Escenario	Usuarios	Operadores	Externalidades	Impuesto Combustible	Total
E0	-	-	-	-	0 M€
E1	-672.2 M€	+792.9 M€	-8.6 M€	-28.7 M€	+83.4 M€

**Tabla 3 – Resultados VAN Escenarios**

Volviendo a la Tabla 3, básicamente los elementos importantes son los usuarios y los operadores del sistema de transporte. Se observa que el recaudo obtenido por el sistema de peaje, más el recaudo adicional debido a una mayor participación del transporte público, compensan las pérdidas en los otros sectores. Dentro de las externalidades, el ahorro en emisiones es positivo, sin embargo, al aumentar la accidentabilidad, este sector queda en negativo, debido al alto coste de los accidentes con víctimas. En cuanto a los ingresos por las tasas a los combustibles, se observa una pérdida respecto al escenario base, ya que al desincentivar el uso del coche, se produce un cambio modal del coche al transporte público, consumiendo menos combustible de forma general.

Una decisión importante es decidir el destino que tendrá el dinero obtenido por el recaudo del sistema, elemento que está fuera de discusión en este documento.



**Figura 6 – Beneficio Social por Agente**

Finalmente, como complemento a la Tabla 3, en la Figura 6, se puede ver la evolución de los beneficios por sector a lo largo del periodo de estudio, en precios constantes. Como se mencionó anteriormente, se observa que el valor de las externalidades es marginal con respecto a los demás componentes de la función objetivo.

## 5. CONCLUSIONES

Aunque esté perfectamente establecido un valor óptimo de una tarifa por congestión, generalmente ésta no cubrirá la totalidad de los costes de inversión y funcionamiento. Es claro entonces, que una



medida aislada de este tipo, con todas sus limitaciones prácticas y políticas, puede no ser socialmente beneficiosa. El presente análisis demuestra que el sistema de Madrid tendría un excedente social importante, aunque es necesario hacer una investigación más profunda acerca de los costes de implementación, con el fin de analizar su viabilidad. El valor de las ganancias en tiempos en la hora punta es de cerca de 90 M€, aunque este ahorro en tiempo, no alcanza a compensar el mayor coste de usar el coche para ir al centro de Madrid. La implementación de un peaje de acceso puede llegar a disminuir en cerca de 9% la cantidad de viajes que tengan como destino la almendra de Madrid, haciendo que muchos viajes se trasladen hacia las zonas externas de la región y otros, en menor proporción, que sufran un cambio modal.

Al analizar todos los resultados obtenidos, la demanda (y todos sus efectos) con destino al centro de la ciudad, está disminuyendo en el tiempo y el implementar medidas de cobro solo hace que ésta disminuya más rápido. La demanda que el centro pierde, es absorbida por las zonas periféricas de la región, lo que lleva a pensar que se está produciendo un efecto de dispersión que a la larga es una tendencia a la dispersión urbana, con viajes más largos y mayor dependencia del vehículo privado (Guzmán-García, y otros, 2009). Entonces, es claro que una estrategia óptima no debe consistir en la aplicación de medidas aisladas, sino en un paquete de medidas que compensen los efectos negativos.

El incremento en el coste de usar el vehículo privado para desplazarse hacia el centro tiene el efecto principal de disuadir el uso de este modo de transporte y es inmediato. Sin embargo, una estrategia óptima en esta dirección además de incrementar las tarifas del peaje (o de los estacionamientos), debe incluir otro tipo de medidas, como un aumento en las frecuencias del transporte público, el incentivo a modos alternativos (no motorizados) y otras medidas disuasorias, como el park & ride, entre otros. Todas estas medidas deberían orientarse en la misma dirección: viajes más cortos en coche, más usuarios del transporte público, menor contaminación y, en general, una reducción en la dispersión de actividades.

En conclusión, la implementación de una tarifa por congestión en este caso particular, causa un aumento en el bienestar de la sociedad, definido por la función objetivo dada en la ecuación (1). En investigaciones posteriores se puede estudiar el efecto de introducir otros costes, como por ejemplo las inversiones en infraestructura.

## 6. REFERENCIAS

**Brent Richard P.** Algorithms for Minimization Without Derivatives [Book]. - New Jersey : Prentice-Hall, 1973. - ISBN 0-13-022335-2.

**Burns James R. and Janamanchi Balaji** Optimal control and optimization of system dynamics models: some experiences and recommendations [Conference] // Southwest Decision Sciences Institute Annual Conference. - San Diego, CA : [s.n.], 2007. - Vol. 38.

**Coello Carlos A.** Constraint-handling using an evolutionary multiobjective optimization technique [Journal] // Civil Engineering Systems. - [s.l.] : Gordon and Breach Science Publishers, 2000. - Vol. 17. - pp. 319-346.

**de la Hoz Daniel and Guzmán Luis A.** Fuel Tax Levels Necessary to Achieve the Agreed Reduction Targets of CO<sub>2</sub> Emissions. The Case of Madrid [Conference] = HUES // 9th Highway and Urban Environment Symposium / ed. Rauch Sébastien, Morrison Gregory M. and Monzón Andrés. - Madrid : Springer, 2008. - Vol. 17. - pp. 377-386. - ISBN 978-90-481-3042-9.

**EDM'04** Encuesta Domiciliaria de Movilidad de 2004 en la Comunidad de Madrid [Informe] : Resumen Ejecutivo. - Madrid : Consorcio de Transportes de Madrid, 2006.

**Eliasson Jonas [et al.]** The Stockholm congestion – charging trial 2006: Overview of effects [Journal] // Transportation Research Part A. - Stockholm : Elsevier, 2009. - 2 : Vol. 43. - pp. 240-250.

**Eliasson Jonas** A cost-benefit analysis of the Stockholm congestion charging system [Journal] // Transportation Research Part A. - Stockholm : Elsevier, 2009. - 4 : Vol. 43. - pp. 468-480.

**Emberger Guenter, Shepherd Simon P. and Zhang Xiaoyan** Method to identify optimal land use and transport policy packages: a comparison of cba and indicator based optimisation [Conference] // European Transport Conference. - Strasbourg : Association for European Transport, 2003.

**Fontaine Ernesto R.** Evaluación Social de Proyectos [Libro]. - Santiago de Chile : Instituto de Economía, Pontificia Universidad Católica de Chile, 1981.

**Guerrero María José y Monzón Andrés** Cuenta económica y socio-ambiental del transporte terrestre de viajeros en la Comunidad de Madrid en 1996 [Informe]. - Madrid : Consorcio Regional del Transporte de Madrid, 2003.

**Guzmán-García Luis Angel y De la Hoz Daniel** Concentración urbana: hacia una nueva cultura de la movilidad [Publicación periódica] // Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera. - Madrid : [s.n.], Sept/Oct de 2009. - Vol. 167. - ISSN: 0212-6389.

**Hyman Geoffrey and Mayhew Les** Optimizing the benefits of urban road user charging [Journal] // Transport Policy. - [s.l.] : Pergamon, 2002. - 3 : Vol. 9. - pp. 189-207.

**INE** Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid [En línea] // Instituto Nacional de Estadística. - 2008. - 2008. - www.ine.es.

**Jonsson Daniel** Analysing sustainability in a land-use and transport system [Publicación periódica] // Journal of Transport Geography. - Stockholm : [s.n.], 2008. - Vol. 16. - págs. 28-41.

**Kamola Mariusz and Miazga Przemyslaw** Global and local optimization algorithms in automated waveguide design [Conference] // 5th National Conference Evolutionary Computation And Global Optimization. - Jastrebja Góra, Poland : [s.n.], 2001. - pp. 97-105.

**Kishihara Mitsuyoshi, Yamane Kuniyoshi and Ohta Isao** Parallel processing of Powell's optimization algorithm and its application to design of multi-way power dividers [Conference] // Microwave Conference, 2005. APMC 2005. Asia-Pacific. - Zushou, China : [s.n.], 2005. - Vol. 4.

**Leape Jonathan** The London Congestion Charge [Journal] // The Journal of Economic Perspectives. - London : American Economic Association, 2006. - 4 : Vol. 20. - pp. 157-176.

**Monzón Andrés, Fernandez Alvaro and Jordá Pablo** Environmental Costs Account: A Base for Measuring Sustainability in Transport Plans [Conference] = HUES // 9th Highway and Urban Environment Symposium / ed. Rauch Sébastian, Morrison Gregory M. and Monzón Andrés. - Madrid : Springer, 2008. - Vol. 17. - pp. 23-30. - ISBN 978-90-481-3042-9.

**Parry Ian W. H. and Bento Antonio** Estimating the Welfare Effect of Congestion Taxes: The Critical Importance of Other Distortions within the Transport System [Journal] // Journal of Urban Economics. - Washington D.C. : Elsevier, 2002. - 2 : Vol. 51. - pp. 339-365.

**Pfaffenbichler Paul [et al.]** Development of a Hierarchical Approach to Assess the Impacts of Transport Policies - The Madrid case study [Book Section] // Innovations in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning / book auth. Timmermans J. van Leeuwen and H.. - Dordrecht : Springer, 2006a.

**Pfaffenbichler Paul** The strategic, dynamic and integrated urban land use and transport model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator) // Dissertation, Doctoral Thesis. - Vienna : Technische Universität Wien - Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, 2003.

**Powell M. J. D.** An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives [Journal] // Computer Journal. - Oxford : [s.n.], 1964. - 2 : Vol. 7. - pp. 155-162.

**Renders Jean-Michel and Bersini Hugues** Hybridizing genetic algorithms with hill-climbing methods for global optimization: two possible ways [Conference] = Evolutionary Computation // IEEE World Congress on Computational Intelligence. - Bruxelles : IEEE, 1994. - Vol. 1. - pp. 312 - 317.

**Rich Jeppe and Nielsen Otto Anker** A socio-economic assessment of proposed road user charging schemes in Copenhagen [Journal] // Transport Policy. - Lyngby, Denmark : Elsevier, 2007. - 4 : Vol. 14. - pp. 330-345.

**Shepherd Simon P. [et al.]** Designing optimal urban transport strategies: The role of individual policy instruments and the impact of financial constraints [Journal] // Transport Policy. - Leeds : Elsevier, 2006. - 1 : Vol. 13. - pp. 49-65.

**Sugden Robert** Developing a consistent cost-benefit framework for multimodal transport appraisal [Report] : Report to the Department of the Environment, Transport and the Regions. - London : [s.n.], 1999.

**TAG Unit 3.5.3** Transport User Benefit Calculation [Report] = Transport Analysis Guidance. - London : Department for Transport, 2010. - p. 32.

**Zangwill Willard I.** Minimizing a function without calculating derivatives [Journal] // The Computer Journal. - Berkeley, CA : British Computer Society, 1967. - 3 : Vol. 10. - pp. 293-296.

**Zhang Xiaoyan [et al.]** A method for the design of optimal transport strategies [Journal] // Transport Policy. - Berkshire : Elsevier, 2006. - 4 : Vol. 13. - pp. 329-338.