

EVALUACIÓN DE EFECTOS AL IMPLANTARSE UNA ESTRUCTURA TARIFARIA COMBINADA SOBRE UNA RED DE VÍAS METROPOLITANAS CONGESTIONADAS

Miller Salas Rondón

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia. Investigador del CENIT, Centro para la Innovación del Transporte, Universidad Politécnica de Cataluña, (UPC). Jordi-Girona, 29, 2-A, 08034. Barcelona (España), Tel: +34 934017104, Fax (+34) 93 4017264, miller.salas@upc.edu

Francesc Robusté Antón

Director del CENIT, Centro para la Innovación del Transporte, Universidad Politécnica de Cataluña, (UPC). Jordi-Girona, 29, 2-A, 08034. Barcelona (España), Tel: +34 934017104, Fax (+34) 93 4017264, f.robuste@upc.edu

Sergi Saurí Marchán

Director de Proyectos del CENIT, Centro para la Innovación del Transporte, Universidad Politécnica de Cataluña, (UPC). Jordi-Girona, 29, 2-A, 08034. Barcelona (España), Tel: +34 934017104, sergi.sauri@upc.edu

RESUMEN

La tarificación de la congestión (*road pricing*) está siendo ampliamente empleada por diversos gobiernos para paliar los costos externos que se producen sobre la sociedad cuando conductores realizan viajes o recorren kilómetros adicionales. *Road pricing* proporciona a los usuarios del vehículo incentivos apropiados para modificar su conducta de viaje y permite optimizar el uso de las carreteras, captar recursos para la financiación de infraestructuras e implementar otra serie de medidas para disminuir los efectos del tráfico.

Siguiendo esta tendencia, presentamos un modelo que permite configurar distintos esquemas de *road pricing* y en este caso aplicamos una estructura compuesta de dos tarifas: una tarifa de entrada a la autopista más una tarifa según la distancia recorrida. Con este esquema tarifario se disuade la demanda hasta ciertos niveles de aceptabilidad y se estiman los efectos sobre el bienestar social a partir de la variación de los excedentes de usuario y productor, más aún si inicialmente existen peajes por motivos de financiación de la infraestructura.

Los resultados muestran que al incrementar la tarifa de acceso a la autopista y dejar una tarifa kilométrica baja, se evitan mayor cantidad de viajes de corto recorrido beneficiando los viajes con trayectos largos, produciendo menores pérdidas de excedente de usuario, menor captación de ingresos y mayor ganancia de bienestar social. Por otro lado, al establecer una tarifa de acceso baja e incrementar la tarifa por kilómetro habría permisividad con los viajes cortos pero se es coercitivo con los viajes de largo recorrido. En este caso, se genera mayor cantidad de recaudo bruto a cambio de una mayor pérdida de excedente de usuario, y una menor ganancia de bienestar social comparado con el caso anterior. Dicho modelo se ha aplicado sobre la red de carreteras del Área Metropolitana de Barcelona.

PALABRAS CLAVES: *Road pricing*, Bienestar social, Excedente de usuario, Recaudo.

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace varias décadas *road pricing* ha sido reconocido considerablemente como una medida efectiva para reducir los efectos externos negativos (congestión, accidentalidad, polución atmosférica, ruido, daños a la infraestructura, estrés, etc.) que producen los usuarios de las carreteras cuando realizan viajes o recorren kilómetros adicionales. Este uso ineficiente de las vías impone costos adicionales sobre los mismos conductores, sobre el proveedor de la infraestructura, sobre otros usuarios y sobre el resto de la sociedad. Por ejemplo, al considerar solo los efectos de la congestión en Europa, se estima que los costos asociados con este fenómeno corresponden a 70 billones de Euros, aproximadamente el 1% de todo su PIB, Nash y Matthews, (2005). También, el Instituto del Transporte de Texas estimó para el 2003, que la congestión en las 85 zonas urbanas más grandes de los Estados Unidos, causó 3.7 billones de horas de retraso en los viajes y 2.3 billones de combustible desperdiciado; generando un costo total de \$63 billones, DeCourla-Souza (2006).

El estudio de *road pricing* puede darse desde las nociones de *first-best* y *second-best*, las cuales constituyen los conceptos centrales en una política económica y en el análisis de bienestar. A partir del principio de tarificación *first-best* (Pigou, 1920; Knight 1924; Walters, 1961; Vickrey, 1969) que asume que, si se aplica un peaje en cada arco de igual valor a la externalidad (diferencia entre costo marginal social y costo marginal del usuario) se produciría la condición de flujo óptimo en toda la red. Sin embargo, la teoría de tarificación *first-best* debe considerarse como un punto de referencia hipotético porque es dificultoso implementarlo en la práctica ya que existen barreras de tipo técnico, legal e institucional, y de aceptabilidad tanto pública como política. En la tarificación real del transporte, estas suposiciones son difíciles de cumplir, de ahí que se contemple una tarificación basada en costos marginales bajo restricciones, teoría de *second-best*, en la cual se considera que no todas las decisiones pueden afectarse completamente de manera óptima. Para mayor información sobre *road pricing* consultar Yang y Huang (1998), Hau (1998), Rowendal y Verhoef (2006).

Dados los avances tecnológicos realizados para recaudar el pago de la tarifa y así administrar de forma eficaz dichos ingresos, varias ciudades y áreas metropolitanas han procurado acercarse al concepto de *road pricing*. Para ello, han estudiado y configurado distintas topologías tarifarias que abarcan desde un tramo específico de carretera (puentes, túneles, como los casos de la autopista SR-91 en el Condado de Orange, la autopista I-15 en San Diego, etc.), hasta una red de carreteras tarifada bien sea de forma kilométrica o de forma puntual (tipo cordón o área) en las entradas o salidas de una determinada zona de la ciudad (Singapur, 1975; Bergen, 1986; Oslo, 1990; Trondheim, 1991; Londres, 2003; Estocolmo, 2006; etc).

El esquema tipo cordón consiste en cobrar una tarifa plana a un vehículo por ingresar o abandonar una determinada zona de la ciudad durante algunas o todas las horas del día. La tarifa se establece en diversos puntos de la red y no depende del tiempo que permanezca o la distancia que recorra dentro del área o de los niveles de congestión que prevalezcan. Para el diseño de cordones, Verhoef (2002), propone un método matemático siguiendo el enfoque *second-best* para examinar las condiciones de equilibrio de primer orden en un subconjunto predeterminado de caminos y la selección de arcos con peaje empleando indicadores de sensibilidad; Mun et al (2003), investigan los efectos de la localización del cordón en la maximización del bienestar social utilizando un modelo espacial simple para una ciudad mono-céntrica sin considerar el efecto red; Zhang y Yang (2004), diseñan la implantación del peaje óptimo y cuantifican sus tarifas para alcanzar el máximo bienestar social empleando

programación bi-nivel (cuya solución está basada en un algoritmo genético); también, Sumalee (2004), utiliza un algoritmo genético, para diseñar un cordón óptimo para una red de carreteras. Esta topología de cobro, tiene la desventaja de fomentar viajes que recorren grandes distancias.

En cuanto a la tarifación basada en la distancia, esta corresponde a un sistema continuo definido en un área determinada que busca tarifar a cada vehículo según el número de kilómetros recorridos. Este esquema desanima al tráfico de paso a usar el área tarifada y estimula a la demanda originada en la zona de tarifación a usar las vías orbitales de mayor longitud pero sin tarifas. Si las tarifas son muy altas y las rutas orbitales no son atractivas, la congestión aumenta en las distancias cortas. Este esquema de *road pricing* ha sido analizado por May y Milne (2000), para la ciudad de Cambridge; O'Mahony et al (2000), la ensayaron para Atenas. La desventaja de este tipo de estructuras tarifarias, es que fomenta los viajes cortos.

Otros esquemas de *road pricing* se basan en el tiempo de viaje o según la congestión que ocasionan. Con respecto a la tarifación basada en el tiempo, se busca que cada vehículo pague de forma proporcional al tiempo que gaste viajando dentro de la red de carreteras a tarifar, independientemente si el tiempo se gasta en demoras o circulando a velocidad libre. Bajo este sistema los conductores se animan a escoger rutas que minimicen su propio tiempo de viaje, con la desventaja que al presentarse dos trayectorias con el mismo tiempo, de las cuales una está más congestionada que la otra (en promedio), las dos se tarificarían de la misma manera, así que el sistema se aparta significativamente de la tarifación según el costo marginal. Este esquema tarifario ha sido estudiado por May y Milne (2000), para la ciudad de Cambridge; O'Mahony et al (2000), lo proponen como parte de la función de costos para Dublín.

Al implantar una tarifa basada en la congestión o demoras, cada vehículo se tarifa de acuerdo a la estimación de la componente del tiempo de viaje, es decir, según las demoras por colas en los arcos en determinada hora del día. Este sistema es lo más cercano posible a una verdadera medición de la congestión. Para alcanzar un nivel determinado de reducción de viajes se requiere imponer tarifas altas, puesto que es relativamente fácil desviarse para evitarlas. Esta tipología de tarifación ha sido analizada por May y Milne (2000), para la ciudad de Cambridge.

Estos dos últimos esquemas tienen el inconveniente del costo en tecnología y su relativa complejidad para ser aceptado por los usuarios, ya que no se sabe cuánto se va a pagar pues se desconoce el tiempo de demora que se van a encontrar en las colas. Además, los conductores estarán menos dispuestos a modificar o a reducir su viaje debido a que las tarifas son variables e impredecibles.

A partir del análisis de las posibles estructuras tarifarias que se emplean para gestionar la movilidad y generar ingresos (objetivos de *road pricing*), este trabajo tiene la originalidad de presentar un modelo que permite comparar diversos esquemas de *road pricing* (simples y complejos) a través de la evaluación de varios indicadores operacionales y socioeconómicos, Salas y Robusté (2007), Salas et al (2008). Además, el modelo permite cubrir los ingresos iniciales que actualmente percibe una concesionaria de autopistas por motivos de financiación. Por lo tanto, al implantar el nuevo esquema de *road pricing* se busca obtener el recaudo bruto suficiente para no alterar el equilibrio económico financiero del contrato de concesión.

En este artículo se hace un análisis de los efectos sobre el excedente de usuario y del productor y se evalúa el cambio en el bienestar social que se produce al implantar una estructura tarifaria combinada (tarifa de acceso más una tarifa basada en la distancia) para reducir la congestión.

2. METODOLOGÍA

El modelo que se presenta puede aplicarse a cualquier entorno urbano o metropolitano, y en este caso se destina a la red de carreteras del Área Metropolitana de Barcelona-AMB-, que es una de las más grandes del sur de Europa. Posee una población superior a 3 millones de habitantes; una superficie de 633 km² conformada por 36 municipios; su índice de motorización es de 785 (veh/1000 hab), su índice de ocupación vehicular es 1.2 (pers/veh) y su red de vías de gran capacidad está compuesta por autopistas libres de tarifa y tramos con autopistas de peaje, cuyo pago obedece a objetivos de financiación. Las diferentes vías de gran capacidad llevan el tráfico hasta las rondas B-10 y B-20 que circundan las poblaciones de Barcelona y L'Hospitalet, ocasionando una gran congestión de varios kilómetros en las entradas y salidas de estos dos municipios, sobre todo en las horas punta diarias y en las salidas y regresos de los fines de semana o festivos.

El grafo de las vías de gran capacidad se representa en TransCAD tal como se ilustra en la figura 1 y sus coordenadas geográficas fueron obtenidas del Mapa de Carreteras elaborado por el Ministerio de Fomento. Para cada uno de los arcos se han introducido sus correspondientes atributos (flujos actuales diferenciados por tipos de vehículos, velocidad y tiempo a flujo libre, capacidad y el valor del peaje actual en caso de existencia) para cada sentido. La distribución de las zonas se ha realizado teniendo en cuenta población, condiciones económicas, patrones de movilidad, uso del suelo, etc., de los municipios y las cantidades de viajes atraídos y producidos en las diferentes entradas y salidas del AMB provienen de la Encuesta de Movilidad Cotidiana del año 2001 realizada por la Autoridad de Transporte Metropolitano de Barcelona.

La matriz de viajes origen-destino (O-D) se estimó empleando el método desarrollado por Nielsen y que está incorporado en el software TransCAD. Este método tiene la ventaja que trabaja los conteos de tráfico como variables estocásticas y por lo tanto la asignación se realizó empleando el método estocástico de equilibrio de usuario (SUE). El algoritmo de Nielsen consiste en un procedimiento iterativo donde el volumen de vehículos que se tienen de las mediciones de tráfico correspondientes a cada arco, se compara con los datos de salida que arroja el proceso de asignación y cuyas relaciones O-D son modificadas y complementadas para reducir progresivamente las diferencias de los datos contrastados. Dado el bajo índice de ocupación vehicular se ha hecho una equivalencia entre viajes y vehículos.

Los vehículos se trabajaron como flujos agregados, expresados en vehículos livianos equivalentes y la matriz de mínimo costo generalizado inicial entre cada par origen-destino se obtiene del proceso de asignación empleando la opción de caminos múltiples de TransCAD y corresponde a la suma de los factores: costos de operación, valor del tiempo de viaje y peaje inicial. Para cualquier arco de la red establecida, la relación costo-flujo se fija permitiendo un solo valor de costo para todos los posibles movimientos que utilicen el arco en cuestión, y cuyo costo varía solamente respecto al flujo de ese arco y se actualiza de forma continua a medida que se realiza el proceso iterativo de Nielsen, explicado anteriormente.

El escenario futuro se elaboró configurando el modelo para la estructura tarifaria a implementar. En este caso se buscó estimar el valor de la tarifa y los efectos en la variación del bienestar que produce este tipo de sistema tarifario al querer reducir en determinado porcentaje la matriz total de viajes que actualmente se hacen en vehículo privado. Se escogieron tres niveles de reducción de la demanda: 5% (bajo), 10% (medio), y 15% (alto). Estas reducciones en el uso del vehículo se justifican por ser la forma efectiva de disminuir tanto el efecto de la congestión como de la polución. Además, es coherente con el Plan de Movilidad de Barcelona que para el año 2018 busca cumplir con el protocolo de Kyoto, reduciendo el uso del coche, así mismo, aumentar su índice de ocupación, promover el transporte público e incrementar el uso de biocombustibles.

Es de anotar que el enfoque utilizado en el modelo presenta algunas limitaciones y aunque se puede trabajar con diversos valores del tiempo y elasticidad, la demanda de viajes no es desagregada en el propósito del viaje ni en el nivel de renta de los viajeros. El modelo se simplifica asumiendo una función lineal para la demanda, la cual es susceptible al cambio en el costo generalizado, sin embargo, el modelo se adapta muy bien a los diferentes esquemas de *road pricing* que han sido evaluados.

La metodología empleada para cuantificar la variación del bienestar social solo contempla el caso de una única modalidad de transporte (vehículo privado), ya que el uso del transporte público en áreas metropolitanas es deficiente en cuanto a servicio, frecuencia y accesibilidad. Por otro lado, la demanda que se disuade deberá escoger rutas alternativas, cambiar la hora de salida, reducir la frecuencia de los viajes, incrementar la ocupación vehicular, tomar la decisión de no viajar, etc.

3. MODELO

3.1. Formulación del Modelo

La decisión sobre la elección de un medio de transporte para ir de un sitio a otro está en función de la suma de los distintos costos que intervienen en el viaje (costo generalizado), de su nivel de renta y de la disponibilidad de modos de transporte altamente sustitutos.

La expresión (1) cuantifica el costo generalizado actual para ir desde la zona origen i hasta la zona destino j de un vehículo representativo.

$$g_{ij}^0 = f_{ij}^0 x_{ij} + v_t t_{ij}^0 + \tau_{ij}^0 \quad \forall ij \in W \quad (1)$$

Donde:

- W = Conjunto de pares O-D de la red
- ij = Par O-D, $ij \in W$
- g_{ij}^0 = Costo generalizado inicial (€/veh)
- f_{ij}^0 = Costos iniciales de operación del vehículo (€/veh-km)
- x_{ij} = Distancia recorrida para ir desde el origen i hasta el destino j (km)
- v_t = Valor del tiempo (€/veh-min)
- t_{ij}^0 = Tiempo medio inicial para realizar un viaje (min)

τ_{ij}^0 = Peaje actual que se paga por motivos de financiación en algunos arcos de la red (€/veh)

A partir de este costo generalizado inicial, las personas realizan una cantidad inicial de viajes q_{ij}^0 hasta el punto donde el beneficio privado marginal iguala al costo total por viaje, como se muestra en la figura 2. Por lo tanto, para la situación actual y asumiendo que la función inversa de la demanda es de tipo lineal, el excedente de usuario (área RnG) se determina mediante la diferencia entre el beneficio del viaje (área ROq_{ij}^0G) y el costo total del viaje (área nOq_{ij}^0G). Para el escenario futuro la implantación de un esquema tarifario bajo el enfoque *second-best*, hará que el costo generalizado en este escenario (ecuación 2) produzca una disminución de la demanda hasta un valor de q_{ij}^1 , lo que a su vez originará una variación del bienestar social actual, cuyo efecto será mayor o menor, dependiendo del esquema tarifario que se aplique y de la cantidad de viajes que se quiera disuadir.

$$g_{ij}^1 = f_{ij}^1 x_{ij} + v_t t_{ij}^1 + \tau_{ij}^1 \quad \forall ij \in W \quad (2)$$

Donde:

- g_{ij}^1 = Costo generalizado final (€/veh)
- f_{ij}^1 = Costo final de operación vehicular (€/veh)
- t_{ij}^1 = Tiempo medio final para realizar un viaje (min)
- τ_{ij}^1 = Peaje a pagar con el nuevo esquema de *road pricing* (€/veh)

La pérdida de excedente de usuario (área $nmsG$) está dada por la diferencia entre la pérdida de renta debido al incremento del costo total (área $nmaG$) y la ganancia debida a la reducción de viajes o kilómetros conducidos hasta un nivel de servicio favorable (área saG , que equivale al ahorro en costos por renunciar a conducir más). Dicha pérdida entre el par O-D ij se estima mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta Eu_{ij} = \int_{g_{ij}^0}^{g_{ij}^1} D^{-1}(g) dg = (g_{ij}^1 - g_{ij}^0) \frac{(q_{ij}^1 + q_{ij}^0)}{2} \quad (3)$$

Donde:

- q_{ij}^1 = Demanda final esperada después de implantar el esquema de *road pricing* (veh/h)
- q_{ij}^0 = Demanda inicial antes de implantar el esquema tarifario (veh/h)

Al sustituir las ecuaciones (1) y (2) en (3), y asumiendo que los usuarios que deciden seguir viajando por toda la red en análisis conservarán sus costos de operación iniciales, es decir $\Delta f_{ij} = f_{ij}^1 - f_{ij}^0 \cong 0$, se obtiene que:

$$\Delta Eu_{ij} = (\tau_{ij}^1 + v_t \Delta t_{ij} - \tau_{ij}^0) \frac{(q_{ij}^1 + q_{ij}^0)}{2} \quad (4)$$

Al reducir el número de viajes o kilómetros a recorrer después de implantada la estrategia de tarifación, el tiempo medio de viaje futuro será inferior al tiempo inicial que se invertía para ir desde el origen i hasta el destino j ; o sea que, $\Delta t_{ij} = t_{ij}^1 - t_{ij}^0 < 0$.

Para lograr que el uso de la red sea socialmente eficiente, el modelo anterior permite amoldarse a diferentes esquemas tarifarios y en este artículo se trabaja con una tarifa combinada, tal como se ilustra en la siguiente ecuación:

$$\tau_{ij}^1 = \tau_e + \tau_u x_{ij} \quad \forall ij \in W \quad (5)$$

Este tipo de estructura hace parte de los sistemas complejos de tarifación ya que está compuesto por dos tarifas (*two part charges*). τ_e (en €/veh) es una tarifa de acceso a la autopista que depende de la categoría del vehículo. Este pago mínimo por acceso cumple dos funciones: (i) permitir que el operador garantice un nivel de calidad mínimo el cual tendrá que mantener en todo su recorrido y de acuerdo con Robusté (2002), la fijación de este parámetro de calidad ha de responder a un óptimo social y de la calidad de vida que se desee alcanzar. (ii) evitar los viajes de corto recorrido, los cuales contribuyen a la formación de colas sobre todo en periodos de hora punta. τ_u (en €/veh-km) es la tarifa unitaria que se le aplicará a cada vehículo a medida que avanza en su recorrido y la cual debe ser siempre positiva ($\tau_u > 0$) y x_{ij} es la distancia del viaje entre el par O-D (en km).

Por otro lado, al presentarse un cambio en el costo generalizado del viaje entre el par O-D ij provocará que la demanda futura varíe. Para analizar dicha variación se emplea habitualmente el concepto de elasticidad (η) y en este caso se hace a través de la siguiente relación de tipo lineal:

$$q_{ij}^1 = q_{ij}^0 \left[1 + \eta_{ij} \frac{g_{ij}^1 - g_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right] \quad (6)$$

Donde: η_{ij} corresponde a la elasticidad variable de la demanda con respecto al costo generalizado del viaje desde el origen i hasta el destino j y de acuerdo con Daskin et al. (1988), la elasticidad puede expresarse como una función de la distancia entre cualquier par O-D ij de la forma:

$$\eta_{ij} = \varepsilon x_{ij}^\mu \quad (6a)$$

Donde: $\varepsilon < 0$ y $\mu \leq 0$. En el caso de que $\mu = 0$ entonces $\eta_{ij} = \varepsilon$ para todos los pares O-D ij . Con $\mu < 0$, la demanda es más inelástica con la distancia como normalmente se presenta para los *commuters* que viven fuera del área urbana y tienen un transporte público deficiente.

Al sustituir las ecuaciones (1), (2) y (5) en (6), se obtiene que la demanda futura se cuantifica de acuerdo con la expresión (7).

$$q_{ij}^1 = \alpha_{ij} \tau_e + \xi_{ij} \tau_u + \beta_{ij} \quad (7)$$

Donde:

$$\alpha_{ij} = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij}, \quad \xi_{ij} = \alpha_{ij} x_{ij}, \quad y, \quad \beta_{ij} = q_{ij}^0 \left[1 + \frac{\eta_{ij} v_t \Delta t_{ij}}{g_{ij}^0} - \frac{\eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right] \quad (7a)$$

Al reemplazar la ecuación (7) en (4), se formula el modelo de la expresión (8) que permite estimar la pérdida de excedente de usuario entre el par O-D $ij \in W$ en función del esquema de *road pricing* kilométrico a implementar.

$$\Delta Eu_{ij} = \frac{1}{2} \left(\alpha_{ij} \tau_e^2 + \xi_{ij} 2\tau_e \tau_u + \theta_{ij} \tau_u^2 + \rho_{ij} \tau_e + \varphi_{ij} \tau_u + \delta_{ij} \right) \quad (8)$$

Donde:

$$\theta_{ij} = \alpha_{ij} x_{ij}^2, \quad \rho_{ij} = 2\beta_{ij}, \quad \varphi_{ij} = \rho_{ij} x_{ij}, \quad y, \quad \delta_{ij} = (v_t \Delta t_{ij} - \tau_{ij}^0) q_{ij}^0 \left(2 + \frac{\eta_{ij} v_t \Delta t_{ij}}{g_{ij}^0} - \frac{\eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \quad (8a)$$

Luego, al sumar las variaciones de todos los pares O-D, se tiene que la pérdida neta de excedente de usuario en toda la red es:

$$\Delta Eu_T = \frac{1}{2} \left[\sum_{ij \in W} \alpha_{ij} \tau_e^2 + 2 \sum_{ij \in W} \xi_{ij} \tau_e \tau_u + \sum_{ij \in W} \theta_{ij} \tau_u^2 + \sum_{ij \in W} \rho_{ij} \tau_e + \sum_{ij \in W} \varphi_{ij} \tau_u + \sum_{ij \in W} \delta_{ij} \right] \quad (9)$$

Como se aprecia, la ecuación (9) corresponde a una función cuadrática de tipo cóncava, cuya formulación permite que sea convergente en una única solución.

En cuanto a la estimación del recaudo bruto que se obtendría al aplicar el esquema de *road pricing* entre cualquier par O-D, se emplea la expresión $I_{ij}^1 = q_{ij}^1 \tau_{ij}^1$, la cual se transforma en la ecuación (10) al reemplazar los valores de q_{ij}^1 y τ_{ij}^1 dados en las ecuaciones (7) y (5), respectivamente.

$$I_{ij} = \alpha_{ij} \tau_e^2 + \xi_{ij} 2\tau_e \tau_u + \theta_{ij} \tau_u^2 + \beta_{ij} \tau_e + \gamma_{ij} \tau_u \quad \forall ij \in W \quad (10)$$

Donde:

$$\gamma_{ij} = \beta_{ij} x_{ij} \quad (10a)$$

Por lo tanto, la variación de los ingresos totales estaría dada por la diferencia entre $(\tau_{ij}^1 - \tau_{ij}^0) q_{ij}^1$, que es la recaudación obtenida al incrementarse la tarifa y $(q_{ij}^0 - q_{ij}^1) \tau_{ij}^0$, que es la pérdida de recaudación debida a la disminución del tráfico. Esta variación de ingresos estará dada por:

$$\Delta I_T = \sum_{ij \in W} \tau_{ij}^1 q_{ij}^1 - \sum_{ij \in W} \tau_{ij}^0 q_{ij}^0 \quad (11)$$

Con base en la variación neta del excedente de usuario y la variación total de los ingresos, se determina la variación del bienestar social (ΔBs_T) para toda la red, mediante la ecuación:

$$\Delta Bs_T = \frac{1}{2} \left[\sum_{ij \in W} \alpha_{ij} \tau_e^2 + 2 \sum_{ij \in W} \xi_{ij} \tau_e \tau_u + \sum_{ij \in W} \theta_{ij} \tau_u^2 - 2I_T^0 - \sum_{ij \in W} \delta_{ij} \right] \quad (12)$$

La solución a esta ecuación cuadrática que define la magnitud de la variación de bienestar cuando se produce una reducción de tráfico se logra estableciendo infinitas combinaciones del par de tarifas (τ_e, τ_u). Para fijar cuál es el porcentaje óptimo de disminución de demanda que produce la ganancia máxima de bienestar, se requiere realizar varias simulaciones con las familias de puntos en 3D (τ_e, τ_u, z) que causan los diferentes niveles de disuasión de viajes. Con los diversos parámetros encontrados se establece una correlación no lineal para hallar los parámetros generales de comportamiento de ΔBs_T frente a las múltiples combinaciones de tarifas (τ_e, τ_u).

Hallados los parámetros generales y sin considerar ningún tipo de restricción, la máxima variación del bienestar social se adquiere cuando el gradiente de ΔBs_T es cero. Por lo tanto al derivarse esta expresión respecto a τ_e y τ_u se obtiene que:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial(\Delta Bs_T)}{\partial \tau_e} \\ \frac{\partial(\Delta Bs_T)}{\partial \tau_u} \end{pmatrix} = \tau_e^\otimes (\alpha + \xi) + \tau_u^\otimes (\theta + \xi) = 0 \quad (13)$$

La primera derivada del cambio en el bienestar respecto al par de tarifas (τ_e, τ_u) indica que la solución es una recta cuya pendiente depende del nivel de reducción de demanda que se desee. Dicha recta estaría formada por infinitos puntos de (τ_e, τ_u, z), donde z corresponde a la máxima magnitud del cambio en el bienestar.

Para la obtención de las tarifas óptimas que permiten alcanzar la mayor ganancia de bienestar social, se realiza un algoritmo que inicialmente busca lograr un uso óptimo de la capacidad varía en toda la red, se requiere que las tarifas (τ_e, τ_u) reduzcan la demanda total hasta un nivel deseado y posteriormente se aplican otros tipos de restricciones tal que se garantice el ingreso inicial total I_T^0 para cubrir gastos de financiación de la infraestructura.

3.2. Parámetros de sensibilidad

Una de las grandes dificultades en los estudios para la posible implementación de una medida tarifaria que gestione la movilidad, es la cuantificación coherente y sensata de la elasticidad y el valor del tiempo del viaje, pues son parámetros que al estar involucrados en el costo generalizado del viaje afectan directamente la estimación de la demanda futura independientemente del modelo de demanda que se emplee. Dentro de la bibliografía consultada existe una gran diversidad de medidas tanto para la elasticidad como para el valor

del tiempo, ya que son muchas las variables que intervienen para su estimación. Para una revisión y explicación de la magnitud de estos parámetros puede consultarse VTPI (2006), y Doll y Janson (2005).

Para las condiciones del Área Metropolitana de Barcelona, las simulaciones del modelo se han realizado con una elasticidad (ϵ) con respecto al costo generalizado de -0.5 (con $\mu = -0.1$) que es coherente con los trabajos de Matas y Raymond (2003), Santos et al (2001), May y Milne (2000); para la valoración del tiempo (v_t) se escogió el valor de 0.15 €/veh-min, que es acorde a los niveles de renta de las personas y el tipo de viaje relacionado con el trabajo. Para la cuantificación de los costos de operación vehicular se optó por un valor de 0.18 €/veh-km.

4. DATOS DE ENTRADA Y RESULTADOS DEL MODELO

A partir de la información introducida en el Software TransCAD, se obtuvieron los datos básicos de entrada para la aplicación del modelo, entre ellos las matrices de caminos mínimos entre O-D de las variables: distancias, peajes, tiempos de viaje y el costo generalizado inicial.

Para estimar los impactos sobre cada uno de los indicadores, se optó como parámetro de comparación la cuantificación del par de tarifas (τ_e, τ_u) que permiten reducir la demanda total actual de viajes en varios porcentajes. Dichos porcentajes son 5% (bajo), 10% (medio) y 15% (alto). Empleando como método de asignación el estocástico de equilibrio de usuario (SUE) se determinan los tiempos futuros en los arcos (el proceso de asignación itera con una reducción uniforme de la matriz total O-D de viajes hasta alcanzar la convergencia) y posteriormente se cuantifica la matriz de caminos mínimos de los tiempos futuros del viaje. Para cualquier arco de la red de autopistas, la relación costo-flujo se basa en la función de demoras del BPR (Bureau Public Roads) expresada como:

$$t_a = t'_a \left[1 + \kappa \left(\frac{q_a}{c_a} \right)^\lambda \right] \quad (14)$$

Donde:

t'_a = Tiempo de viaje a flujo libre sobre el arco a

c_a = Capacidad del arco a

q_a = Flujo sobre el arco a

κ, λ = Constantes, y en este caso $\kappa = 0.35$ and $\lambda = 4.0$

La aplicación de esta estructura tarifaria sobre toda la red genera cambios en los diferentes indicadores establecidos, los cuales se resumen en la tabla 1. Dadas las *infinitas soluciones* que se pueden establecer entre el par de tarifas (τ_e, τ_u) para disuadir una determinada cantidad de vehículos, dichas soluciones se han depurado escogiendo aquellas que tienen valores prácticos (es decir, las aproximadas a c€/veh o c€/viajes). Al explorar los efectos que produce este esquema de *road pricing* sobre algunas rutas de mínimo costo entre pares O-D, se encuentra que: (i) al incrementar la tarifa de acceso a la autopista y dejar una tarifa kilométrica baja, se evita mayor cantidad de viajes de corto recorrido pero se benefician los

viajes con trayectos largos. En este caso se producen menores pérdidas de excedente de usuario a cambio de una menor percepción de ingresos. (ii) cuando se establece una tarifa de acceso baja y se aumenta la tarifa por kilómetro se obtiene gran permisividad con los viajes cortos y se es restrictivo con los viajes de largo recorrido. Este segundo caso que fomenta los viajes cortos, produce una mayor cantidad de recaudo bruto pero a cambio genera mayores pérdidas de excedente de usuario para la misma cantidad de tráfico evitado.

La tabla 1 muestra las grandes diferencias que se obtienen para toda la red en la estimación de las tarifas media y unitaria, los efectos sobre el excedente de usuario, el recaudo bruto y variación del bienestar social total, para cada una de las reducciones de demanda. Las magnitudes de las tarifas seleccionadas corresponden a los niveles medios dentro de la familia de posibles soluciones. Los resultados muestran que si la demanda se reduce en un 10% se obtiene un cambio favorable en el bienestar social superior al 58% que si se reduce la demanda solo un 5%. Mientras que si se reduce un 15%, dicha variación de bienestar tan solo se incrementa en un 11% con respecto a una disuasión de la demanda del 10%.

Revisar el comportamiento de cada uno de los indicadores ante el cambio de las tarifas de entrada y por kilómetro, se convierte en un proceso complejo, dado el análisis tridimensional que esto implica. Al establecer como parámetro de comparación el valor de las tarifas que reducen la matriz total del número de vehículos en diversos porcentajes, se determina que la implantación de este esquema tarifario compuesto producirá infinitas combinaciones de tarifas (τ_e, τ_u) que logran cumplir con la fiabilidad del tiempo de viaje que es requerido para el escenario futuro. Por lo tanto, para evaluar un determinado indicador (z) se obtienen tres familias de puntos (soluciones 3D (τ_e, τ_u, z) que logran una determinada reducción de la demanda) las cuales deben correlacionarse junto con el valor inicial del escenario base y ajustarse a la función original que las produjo. Para ello se empleó la opción de modelos de regresión no lineal del programa SPSS (software que permite realizar análisis estadísticos y tratamiento de datos) para obtener los parámetros generales de la ecuación final ajustada. Encontrados los parámetros que definen el comportamiento de cada indicador con respecto al par de tarifas (τ_e, τ_u) se graficaron empleando MATLAB. Dichas figuras permiten visualizar la sensibilidad de cada uno de los indicadores analizados con respecto al incremento tanto de la tarifa por kilómetro como de la tarifa de entrada a la autopista para toda la red.

La figura 3 muestra las superficies de la pérdida del excedente de usuario, la variación excedente del productor y el cambio en el bienestar social. Estas superficies representan el comportamiento de estos indicadores ante las infinitas combinaciones del par de tarifas (τ_e, τ_u) . También, se aprecia que cuando las tarifas son nulas se conservan los valores iniciales del escenario base (los cuales son negativos tanto para el excedente del productor como para la variación del bienestar social debido a los ingresos iniciales que se obtienen por motivos de la financiación de algunos tramos de autopistas), y a medida que se van incrementando se refleja la ganancia esperada en el excedente del productor así como la pérdida creciente en el excedente de usuario, lo cual conduce a que la superficie de la variación del bienestar social señale valores máximos para múltiples combinaciones del par de tarifas.

En cuanto al paraboloides que representa la variación del bienestar social con respecto al par de tarifas (τ_e, τ_u) se encuentra que el ajuste de cada una de las familias de puntos procedentes de las reducciones de vehículos en los diferentes porcentajes se realizó de

acuerdo a la ecuación resultante del cambio en el bienestar social, cuya primera derivada indica que los valores máximos son infinitos puntos que forman una recta. La figura 4 detalla la variación del bienestar social en función del porcentaje de reducción de la demanda. En ella se muestran las familias de resultados que son solución a una reducción específica de vehículos. Dado que todos estos puntos proceden de una función cuadrática, el ajuste se hizo siguiendo esta relación, con lo cual se obtiene que la máxima variación de bienestar social (87948 €h) se da cuando se produce una reducción del número de viajes del 12.4%, aplicándose las tarifas $\tau_e = 1.61$ €/veh y $\tau_u = 0.10$ €/veh-km.

5. CONCLUSIONES

Con este artículo se presenta un modelo que permite gestionar el tráfico en una red de vías de gran capacidad en ámbitos metropolitanos a través del cobro de una tarifa por congestión. Este modelo permite amoldarse a distintos esquemas de *road pricing* y en este caso se empleó un sistema tarifario compuesto por una tarifa de entrada más una tarifa kilométrica. Las tarifas se cuantificaron para diferentes porcentajes de reducción de la matriz total de viajes estableciéndose tres niveles de reducción 5% (bajo), 10% (medio), y 15% (alto). Para cada uno de estos niveles se evaluaron los efectos sobre los excedentes de usuario y productor y el cambio sobre el bienestar social con respecto al escenario inicial.

La variación del bienestar social depende básicamente de la cantidad de tráfico que es disuadido al implantar una tarifa por congestión. No obstante, la magnitud de este cambio está notablemente influenciada por el tipo de esquema de *road pricing* que se diseñe, la función de demanda que se adopte y los valores tanto de la elasticidad como del valor del tiempo.

Los resultados muestran que con esta topología tarifaria se obtienen diversos impactos ya que al incrementar la tarifa de acceso a la autopista y dejar una tarifa kilométrica baja, se evitan mayor cantidad de viajes de corto recorrido beneficiando los viajes con trayectos largos. Además, se producen menores pérdidas de excedente de usuario a cambio de una menor captación de ingresos y una mayor ganancia de bienestar. Por otro lado, cuando se establece una tarifa de acceso baja y se aumenta la tarifa por kilómetro se obtiene gran permisividad con los viajes cortos y se es coercitivo con los viajes de largo recorrido. En este segundo caso, se genera mayor cantidad de recaudo bruto pero a cambio se producen mayores pérdidas de excedente de usuario y menores ganancias de bienestar social para la misma cantidad de tráfico evitado.

En cuanto al cambio del bienestar social que se produce, se encontró que al reducir la demanda en un 10% se obtuvo un cambio favorable del 58% comparado cuando solo se disminuyó la demanda un 5%. Mientras que si se reduce un 15%, dicha variación de bienestar tan solo se incrementó en un 11% con respecto a una disuasión de la demanda del 10%.

REFERENCIAS

Autoritat del Transport Metropolità de Barcelona. *Enquesta de Mobilitat Quotidiana 2001*. Disponible en http://www.atm-transmet.org/cat/apartado4/apart4_04.htm

Daskin, M. S., Schofer, J. L., and Haghani, A. E. (1988). A quadratic programming model for designing and evaluating distance-based and zone fares for urban transit. *Transportation Research B*, 22: 1, 25-44.

DeCorla-Souza, P. (2006). Congestion Pricing A Primer. Federal Highway Administration. Office of Transportation Management, HOTM. Available in <http://ops.fhwa.dot.gov/publications/congestionpricing/index.htm>

Doll, C. and Jansson, J. O. (2005). User costs and benefits. In Nash, C. y Matthews. B. Editors. *Measuring the Marginal Social Cost of Transport. Research in Transportation Economics*, Volume 14, 125-154. Elsevier. ISSN: 0739-8859.

Hau, T. D. (1998). Congestion pricing and road investment. In Button, K. and Verhoef, E. (Eds). *Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment: Issues of Efficiency and Social Feasibility*, Edward Elgar, Cheltenham.

Matas, A. y Raymond, J. L. (2003). Demand Elasticity on Tolled Motorways. *Journal of Transportation and Statistics*, volumen 6, No. 2/3 (www.bts.gov), 91-108.

May, A., and Milne, D. (2000). Effects of alternative road pricing systems on network performance. *Transportation Research A*, 34, 407-436.

Mun, S., Konishi, K. y Yoshikawa, K. (2003). Optimal cordon pricing. *Journal of Urban Economics* 54: 21-38.

Nash, C. and Matthews, B. (2005). Transport pricing policy and the research agenda. In Nash, C. y Matthews. B. Editors. *Measuring the Marginal Social Cost of Transport. Research in Transportation Economics*, Volume 14, 1-18. Elsevier. ISSN: 0739-8859.

O'Mahony, M., Geraghty, D., y Humphreys, I. (2000). Distance and time based pricing in Dublin. *Traffic Engineering and Control*, 41 (1).

Robusté, F. (2002). El peaje en autopistas como precio por un servicio y como garante de sostenibilidad. *Revista de Obras Públicas*, Extraordinario, Octubre 2002/No. 3425, páginas 127 – 139.

Rouwendal, J., and Verhoef, E. (2006). Basic economic principles of road pricing: From theory to applications. *Transport Policy*, 13, 106-114.

Salas, M. y Robusté, F. (2007). Valoración del Excedente de Usuario al Implementar *Road Pricing* Kilométrico en Entornos Metropolitanos. *XIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte CD-ROM*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile. ISSN: 0717-3482.

Salas, M., Robusté, F. and Saurí S. (2008). Effects on Social Welfare due to Alternative Road Pricing Schemes. *Transportation Research Board. 87th Annual Meeting CD-ROM*, National Research Council, Washington, D.C.

Santos, G., Newbery, D., Rojey L. (2001). Static vs Demand Sensitive Models and the Estimation of Efficient Cordon Tolls: An Exercise for Eight English Towns. *Transportation Research Record* 1747, 44-50.

Sumalee, A. (2004). Optimal road user charging cordon design: A heuristic optimisation approach. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 19, 377-392.

Verhoef, E. T. (2002). Second-best congestion pricing in general networks. Heuristic algorithms for finding second-best optimal toll levels and toll points. *Transportation Research B* 36: 707-729.

Victoria Transport Policy Institute (2006). *Transportation elasticities. How prices and other factors affect travel behaviour*. This report is available at www.vtpi.org/elasticities.pdf.

Yang, H., and Huang, H.J., (1998). Principle of marginal-cost pricing: How does it work in a general road network?. *Transportation Research* 32A, 45–54.

Zhang, X. y Yang, H. (2004). The optimal cordon-based network congestion pricing problem. *Transportation Research B* 38: 517–537.

Tabla 1 Efectos sobre diversos indicadores al implantarse una estructura tarifaria compuesta por una tarifa de acceso a la autopista + tarifa por kilómetro

Indicador a evaluar	Tarifa de entrada + kilométrica		
Demanda inicial, Q^0 ($*10^5$ veh/h)	1,30		
Recaudo inicial, I^0 ($*10^5$ €h)	0,89		
Valor del tiempo, v_t (€/veh-min)	0,15		
Elasticidad, ε	-0,5		
Porcentaje de disminución de demanda deseado, (%)	5%	10%	15%
Tarifa de entrada, τ_e (€/veh)	0,81	1,24	2,18
Tarifa kilométrica, τ_u (€/veh-km)	0,05	0,09	0,10
Demanda final, Q^1 ($*10^5$ veh/h)	1,24	1,17	1,11
Recaudo final, I^1 ($*10^5$ €h)	2,50	4,02	5,14
Variación del recaudo, ΔI_t ($*10^5$ €h)	1,61	3,13	4,25
Tarifa promedio en toda la red, τ_p (€/veh)	2,02	3,44	4,65
Tarifa unitaria media en toda la red, τ_u (€/veh-km)	0,09	0,17	0,24
Excedente de usuario inicial total, Eu ($*10^5$ €h)	15,60		
Variación del Excedente de usuario, ∇Eu ($*10^5$ €h)	1,13	2,37	3,41
Variación total del Bienestar Social, ΔBs_t ($*10^5$ €h)	0,48	0,76	0,84
Relación $\Delta Bs_t/Eu$ (%)	3,1%	4,9%	5,4%
Relación $\Delta Bs_t/\nabla Eu$ (%)	42,3%	32,2%	24,8%

Figura 1. Red de vías de gran capacidad del Área Metropolitana de Barcelona

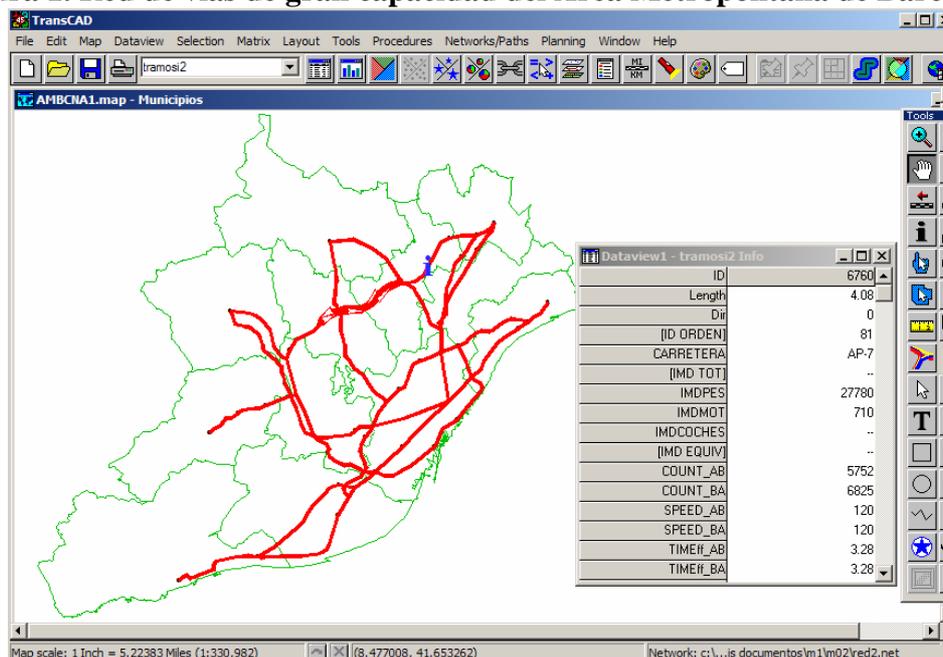


Figura. 2. Efecto en el excedente de usuario debido a la implantación de un esquema de road pricing

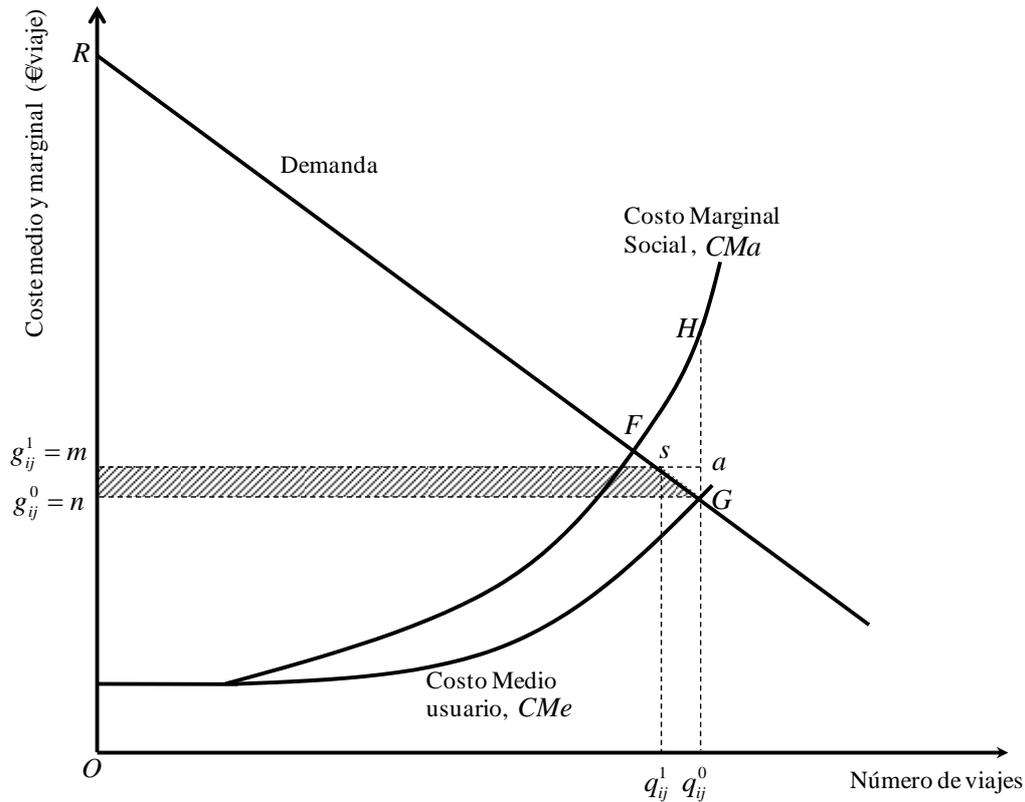


Figura 3. Variación total del bienestar social y de los excedentes de usuario y productor al implantar una tarifa de acceso + tarifa por kilómetro

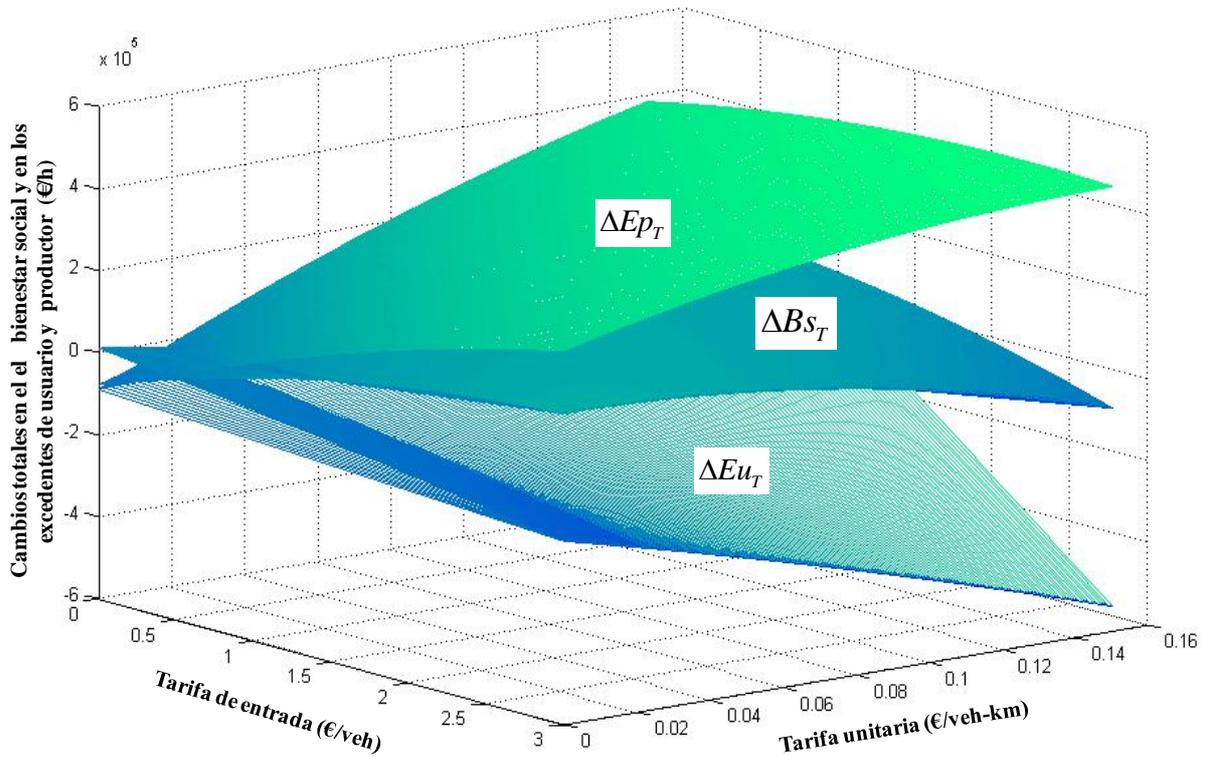


Figura 4. Variación total del bienestar social en función del porcentaje de reducción de la demanda

