

# Valoración del Excedente de Usuario al Implementar *Road Pricing* Kilométrico en Entornos Metropolitanos

Miller Salas Rondón

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia. Cátedra abertis - Universidad Politécnica de Cataluña.

Jordi-Girona, 1-3, B-1, 08034. Barcelona, España, Tel: (34) 934011947

E-mail: miller.salas@upc.edu

Francesc Robusté Antón

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.

E-mail: f.robuste@upc.edu

## RESUMEN

En este artículo presentamos un modelo que permite configurar diversos esquemas de *road pricing* y en este caso aplicamos un esquema de tipo kilométrico lineal, el cual permite disminuir la demanda hasta un nivel de aceptabilidad, estimar el cambio en el bienestar social a partir de la variación del excedente de usuario y el recaudo a obtener, si inicialmente existen peajes por motivos de financiación de la infraestructura. Los resultados muestran, que el cambio en el excedente de usuario depende del esquema tarifario, del tipo de viajes que se disuaden y del nivel de renta de los viajeros. No obstante, la magnitud de esa pérdida está influenciada por la función de demanda que se adopte y de los valores de la elasticidad y valor del tiempo. El modelo se aplicó sobre la red viaria de gran capacidad del Área Metropolitana de Barcelona empleando TransCAD.

*Palabras Clave:* Bienestar social, Excedente de usuario, *Road pricing*, Recaudo.

## ABSTRACT

In this paper we presented a model for assessing the consumer's surplus loss when implementing different road pricing systems and in this case, we analyzed a distance-based pricing scheme. With this model we reduced the traffic demand until a desirable level and we assessed the impacts that take place on user's surplus and revenues. The results show that consumer surplus change depends on the design of road pricing scheme, types of trips to be deterred, and of the income level of travelers. Also, the magnitude of this change depends on the demand function used, and the values of the elasticity and the value of time. The model was applied on the expressway network of the Metropolitan Area of Barcelona using TransCAD.

*Keywords:* Social welfare, Consumer surplus, Road pricing, Revenues.

## 1. INTRODUCCIÓN

Al centrarnos en el transporte por carretera y estudiar los efectos que producen los usuarios de este tipo de infraestructuras cuando realizan viajes o recorren kilómetros adicionales, se encuentra que, se están imponiendo costos adicionales sobre ellos mismos, sobre el proveedor de la infraestructura, sobre otros usuarios y sobre el resto de la sociedad. Dichos costos son conocidos como costos externos. La respuesta de los gobiernos para paliar estos costos externos, ha sido emplear una estrategia amplia que involucra instrumentos de tipo económico (cobro de una tarifa) y otras medidas complementarias tal que se proporcionen a los

usuarios del transporte incentivos apropiados para modificar su conducta de viaje. El concepto tarifario escogido se le conoce como *road pricing* (que establece que los conductores deberían pagar directamente una tarifa que corresponda al costo marginal social del viaje, incluyendo los costos de congestión y de infraestructura) y permitiría 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.

Dados los avances tecnológicos realizados para recaudar el pago de la tarifa y así administrar de forma óptima dichos ingresos, varias ciudades y áreas metropolitanas han procurado acercarse al concepto de *road pricing*. Para ello, han estudiado y configurado diversas 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; etc.) o en áreas metropolitanas (Helsinki, 2002; Bangkok, 2004; Washington, 2004; Estocolmo, 2006; futura ampliación de Londres, 2008).

En lo que se refiere a la tarificación basada en la distancia recorrida, se tiene que es un sistema continuo definido en un área determinada que busca que cada vehículo pague una tarifa de acuerdo con la distancia recorrida. Este esquema desanima al tráfico de paso a usar el área tarifada y estimula a la demanda que se origina en la zona de tarificación a usar las vías orbitales de mayor longitud pero no tarifadas. Si las tarifas son muy altas y las rutas orbitales no son atractivas, la congestión aumenta en las distancias cortas, Salas (2006).

La instauración de un esquema de *road pricing* genera una gran oposición, tanto pública como política, debida principalmente a los altos costos de implementación, la sensación de pérdida de privacidad y los efectos en la equidad. Actualmente lo que más preocupa a los investigadores son los efectos en la equidad, ya que al cobrarse la misma tarifa sin distinguir los niveles de renta de los usuarios puede llegar a inducir que son las personas de menores ingresos los más perjudicados. La compensación a los potenciales perdedores y la asignación apropiada del recaudo son objetivos claves para lograr una mayor aceptabilidad pública y política para la implementación de una medida tarifaria que regule la movilidad. Esto se ha confirmado en varias investigaciones, donde el apoyo a este tipo de medidas se incrementa si se manifiesta que el recaudo por concepto de peajes será reinvertido para disminuir impuestos o hacer mayor inversión en transporte público, Safirova et al. (2004).

La mayoría de investigaciones se han preguntado si la tarifación de la congestión beneficiaría a pobres o ricos. En varios estudios se argumenta que la tarifa por congestión favorecen a las personas con alto nivel de renta, ya que, estas personas son propensas a usar más sus coches y aunque pagan más en impuestos, tienen un beneficio superior al disminuirse la congestión, ya que valoran mucho más el tiempo. En dirección opuesta, otros estudios argumentan que las personas con menos ingresos serían los más beneficiados de la tarifa por congestión, sobre todo cuando la oferta de transporte público es eficiente en especial durante las horas punta. En el momento de implementar una tarifa que reduzca la congestión, esta se aplicaría sobre los vehículos particulares, es decir, sobre los grupos con mayor nivel de renta, y dado que las personas de menor renta usan mucho más el transporte público, no solamente serían los menos afectados por la tarifa sino que también resultarían más beneficiados si el recaudo de los peajes se destina al mejoramiento del transporte público, Eliasson y Mattsson (2006).

El propósito de este artículo es contribuir con el análisis del impacto sobre el excedente de usuario y el cambio en el bienestar social que se producen por la implementación de una estructura tarifaria basada en distancia para reducir la congestión. Para ello se ha propuesto un modelo que permite analizar dichos efectos cuando se implementa este u otro esquema tarifario, además de estimar la variación del recaudo que se obtendría con dicha medida, si previamente existen peajes por motivos de financiación en algunos arcos de la red en estudio.

## 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 km<sup>2</sup> conformada por 36 municipios; su índice de motorización es de 785 (veh/1000 hab), su índice de ocupación vehicular es 1.18 (pers/veh) y su red de vías de gran capacidad esta 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, formando 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 generados 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. Con la información anterior y usando el software TransCAD se conecta el grafo con los centroides de las zonas para generar la red que permitirá estimar la matriz de viajes origen-destino.

La matriz de viajes origen-destino se estima empleando el método desarrollado por Nielsen (1993) 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 ha realizado empleando el método estocástico de equilibrio de usuario (SUE). El algoritmo de Nielsen consiste en un procedimiento iterativo donde el volumen de viajeros 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.

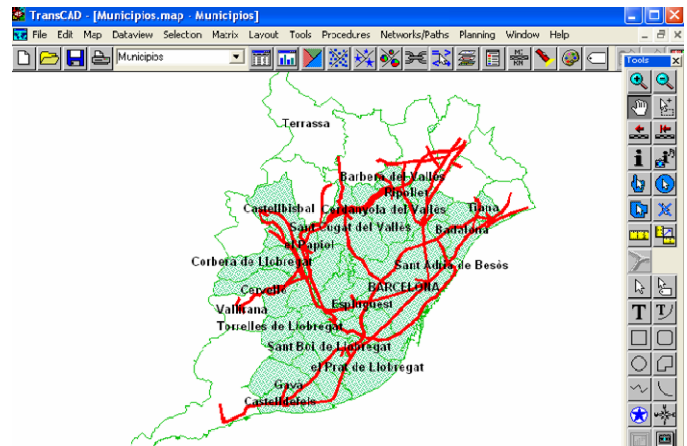


FIGURA 1: Red de Vías de Gran Capacidad del Área Metropolitana de Barcelona

Los vehículos se trabajan como flujos agregados, expresados en vehículos ligeros 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.

Obtenido el escenario base, se elabora el escenario futuro configurando el modelo para la estructura tarifarias a implementar. En este caso se busca estimar los efectos en la variación del bienestar que produce este tipo de sistema tarifario al querer reducir el 10% de todos los viajes que actualmente se hacen en vehículo privado. Esta reducción de uso del coche se justifica por ser la forma efectiva de reducir tanto el efecto de la congestión como de la polución. Además, concuerda con el Plan de Movilidad de Barcelona para el año 2018, que busca cumplir con el protocolo de Kyoto, reduciendo el uso del coche en este porcentaje, aumentar su índice de ocupación, promover el transporte público y aumentar el uso de biocombustibles.

Es de anotar que el enfoque utilizado en el modelo presenta algunas limitaciones y aunque se puede trabajar con diferentes valores del tiempo y elasticidad, la demanda de viajes no es desagregada ni en el propósito del viaje ni en cuanto al 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. Se indica que la metodología empleada para cuantificar la variación del bienestar social solo contempla el caso de una única modalidad de transporte (vehículo privado) y no se tuvo en cuenta los actuales modos alternativos.

### 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 diversos costos que intervienen en el viaje (el 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 ( $g_{ij}^0$ ) por kilómetro recorrido (en €/veh-km) para ir desde el origen  $i$  hasta el destino  $j$  de un vehículo representativo, donde el par  $ij \in W$  y  $W$  es el conjunto de pares O-D que pertenecen a la red en estudio. Dicho coste generalizado corresponde a la suma de: los gastos de operación del vehículo por kilómetro ( $f_{ij}^0$ ), del costo del tiempo por kilómetro ( $v_i t_{ij}^0$ ), donde  $t_{ij}^0$  es el tiempo

medio que se tarda en recorrer un kilómetro y  $v_i$  es el valor del tiempo (en €/veh-h); y del peaje ( $\tau_{ij}^0$ ) que actualmente se paga por motivos de financiación en algunos arcos de la red.

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

A partir de este costo generalizado inicial, las personas realizan una cantidad inicial de kilómetros  $q_{ij}^0$  hasta el punto donde el beneficio privado marginal iguala al costo total por kilómetro, 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  $arm$ ) se determina mediante la diferencia entre el beneficio del viaje (área  $rOq_{ij}^0m$ ) y el costo total del viaje (área  $aOq_{ij}^0m$ ).

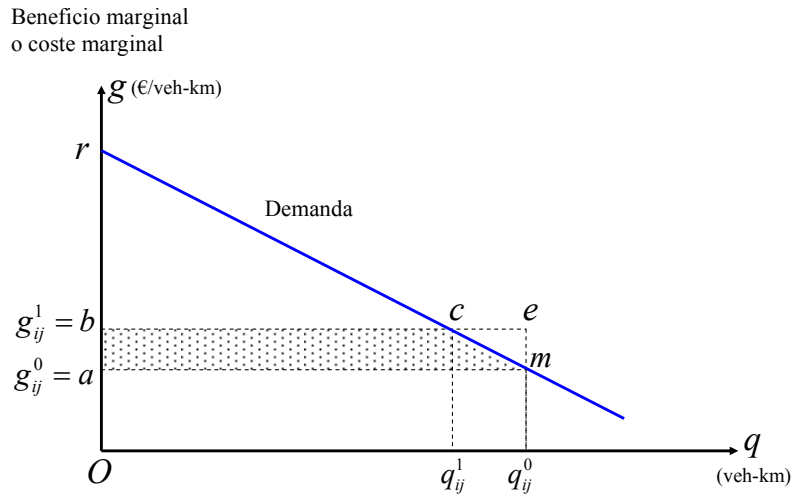


FIGURA 2: Efecto en el Excedente de Usuario debido a la Implementación de un Esquema de Road Pricing.

En la figura 2 se muestra que al implementar un esquema de *road pricing* (que evite la formación de congestión en otros puntos de la red en análisis), se tendrá que el costo generalizado en el escenario futuro  $g_{ij}^1 = b$  (ecuación 2, cuyos costos se definen de forma análoga a la ecuación 1, y el superíndice "1" representa las condiciones del escenario futuro), producirá una disminución de la demanda hasta un valor de  $q_{ij}^1$ , lo que originará a su vez una variación del bienestar social actual, cuyo efecto será mayor o menor dependiendo del esquema tarifario que se aplique. La pérdida de excedente de usuario (área  $abcm$ ) está dada por la diferencia entre la pérdida de renta debido al incremento del costo total (área  $abem$ ) y la ganancia debida a la reducción de kilómetros conducidos hasta un nivel de servicio favorable (área  $cem$ , que equivale al ahorro en costos de renunciar a conducir más).

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

El cambio en el excedente de usuario al variar el precio del viaje (costo generalizado) entre el par O-D  $ij \in W$ , se estima a partir de:

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

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:

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

Es de notar, que al esperarse una disminución en el número de kilómetros a recorrer después de implementada 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 función de tipo kilométrica lineal, tal como se ilustra en la siguiente ecuación:

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

Donde:  $\tau_u$  (€/veh-km) es la tarifa unitaria que se le aplicará a cada vehículo a medida que avanza en su viaje y constituye la pendiente de la recta tarifaria la cual debe ser siempre positiva y es la variable clave a determinar con el modelo;  $x_{ij}$  (km) es el trayecto recorrido entre el par O-D  $ij \in W$ .

Por otro lado, al presentarse un cambio en el costo generalizado del viaje entre el par O-D  $ij \in W$  provocará que la demanda futura varíe. Para analizar dicha variación se emplea habitualmente el concepto de elasticidad ( $\eta$ ) 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:  $\eta_{ij}$  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  $ij \in W$  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  $ij \in W$ . Con  $\mu < 0$ , la demanda es más inelástica con la distancia cómo 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 ( $\forall ij \in W$ ) la demanda futura se cuantifica de acuerdo con la expresión (7).

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

Donde:

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

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.

$$VEu_{ij} = \frac{1}{2} (\theta_{ij} \tau_u^2 + \varphi_{ij} \tau_u + \delta_{ij}) \quad (8)$$

Donde:

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

Luego al sumar las variaciones de todos los pares origen-destino  $ij \in W$ , se tiene que la pérdida neta de excedente de usuario en toda la red es:

$$VEu_T = \frac{1}{2} \left[ \sum_{ij \in W} \theta_{ij} \tau_u^2 + \sum_{ij \in W} \varphi_{ij} \tau_u + \sum_{ij \in W} \delta_{ij} \right] \quad (9)$$

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  $ij \in W$ , 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  $\tau_{ij}^1$  dados en las ecuaciones (7) y (5), respectivamente.

$$I_{ij}^1 = \theta_{ij} \tau_u^2 + \gamma_{ij} \tau_u \quad \forall ij \in W \quad (10)$$

Donde:

$$\gamma_{ij} = \beta_{ij} x_{ij} = q_{ij}^0 \left[ 1 + \eta_{ij} \nu_t \Delta t_{ij} / g_{ij}^0 - \eta_{ij} \tau_{ij}^0 / g_{ij}^0 \right] x_{ij} \quad (10a)$$

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 debido a la disminución del tráfico. Esta variación de ingresos estará dada por:

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

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

$$VW_T = VEu_T + VI_T \quad (12)$$

### 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. Al introducir una medida errónea de la elasticidad o el valor del tiempo afectará considerablemente la estimación de la tarifa a cobrar y de ahí la valoración de indicadores importantes como el recaudo a obtener y obviamente los efectos en el bienestar de los usuarios. 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 este trabajo, las simulaciones del modelo se han hecho con valores de elasticidad ( $\eta$ ) con respecto al costo generalizado de -0.3, -0.5 y -0.7 (con  $\mu = -0.1$ ) que son coherentes con los trabajos de Matas y Raymond (2003), Santos et al., (2001), May y Milne (2000); para la magnitud del valor del tiempo ( $\nu_t$ ) se han tomado los valores de 6, 9 y 12 €/veh-h, que son acordes a los niveles de renta de las personas y el tipo de viaje relacionado con el trabajo para el caso del Área Metropolitana de Barcelona. Para la cuantificación de los costos de operación vehicular se ha adoptado 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 obtienen los datos básicos de entrada para la aplicación del modelo, como son las matrices de caminos mínimos entre O-D de las variables: distancias, peajes, tiempos de viaje y el costo generalizado inicial.

Para estimar cada uno de los indicadores, se ha adoptado como parámetro de comparación la reducción de la demanda total actual en un 10% y a través de un proceso de asignación empleando el método estocástico de equilibrio de usuario (SUE) se determinan los tiempos futuros en los arcos (usando la función de demoras del *Bureau Public Roads, BPR* con alfa entre 0.15 y 0.35 y beta igual a 4) para así cuantificar los tiempos futuros del viaje.

A partir de la información anterior, se determina la tarifa unitaria ( $\tau_u$ ) que logra la reducción de este volumen de tráfico, dejando inicialmente la elasticidad al costo generalizado constante y variando el valor del tiempo; posteriormente se hace de forma inversa. Dado el número de matrices con las que trabaja el modelo, la determinación de la tarifa y la cuantificación de los indicadores: cambio en el excedente de usuario, variación del

recaudo y la variación del bienestar social total, se ejecutan a través de un algoritmo creado con el programa MATLAB 7.1 "MATrix LABoratory", cuyos resultados obtenidos se resumen en la tabla 1.

La tabla 1 muestra las grandes diferencias que se obtienen en la estimación de la tarifa y sus inmediatos efectos sobre el excedente de usuario, el recaudo y variación del bienestar social total, para las posibles combinaciones entre valores del tiempo y elasticidades de la demanda con respecto al costo generalizado. Suponiendo que el valor actual de la elasticidad es -0.5 y del tiempo 9 €/veh-h, al adoptar un valor de elasticidad de -0.3 para la misma magnitud del tiempo, se aprecia que la tarifa es mayor cuando la demanda es más inelástica y por lo tanto los ingresos, el excedente de usuario total y la variación de bienestar son superiores. Pero, si se adopta -0.7 como el valor de la elasticidad, las diferencias resultan ser contrarias al caso anterior pero en menor magnitud.

Las figuras 3 y 4 ilustran las diferentes variaciones que se pueden encontrar al no valorar de forma acertada los parámetros de elasticidad y valor del tiempo.

TABLA 1: Tarifas en Hora Punta de la Mañana: Efectos Sobre el Bienestar Social Total

Demanda inicial, Q0 (veh/h)	149.777								
Recaudo inicial, I0 (€/h)	127.866								
Porcentaje de disminución de demanda deseado, (%)	10%								
Elasticidad, $\epsilon$	-0,7			-0,5			-0,3		
Valor del tiempo, $v_t$ (€/veh-h)	6,0	9,0	12,0	6,0	9,0	12,0	6,0	9,0	12,0
Tarifa unitaria calculada, $t_u$ (€/veh-km)	0,080	0,100	0,120	0,100	0,120	0,150	0,150	0,180	0,210
Demanda final obrenida, Q1 (veh/h)	133.930	134.163	134.271	134.404	135.172	134.186	134.473	134.799	135.004
Recaudo final, I1 (€/h)	206.036	258.227	310.350	258.244	311.814	387.271	387.295	466.058	544.733
Variación del recaudo total, $V I_t$ (€/h)	78.170	130.361	182.483	130.378	183.947	259.405	259.428	338.192	416.867
Excedente de usuario total, $E u_t$ (€/h)	794.843	940.928	1.087.013	1.112.780	1.317.299	1.521.818	1.854.633	2.195.498	2.536.363
Variación del excedente de usuario total, $V E u_t$ (€/h)	142.166	158.687	175.043	197.031	214.235	257.208	333.331	377.811	422.155
Variación del bienestar social total, $V W_t$ (€/h)	220.336	289.048	357.526	327.409	398.183	516.613	592.759	716.003	839.022
Relación $V W_t / E u_t$ , (%)	27,72%	30,72%	32,89%	29,42%	30,23%	33,95%	31,96%	32,61%	33,08%

La figura 3 ilustra la variación del excedente de usuario entre un par O-D de la red, observándose que en el caso (a) tanto el excedente de usuario como su variación es mayor cuanto más se valore el tiempo, haciéndose evidente esta afirmación para una misma disminución de demanda, además, el ahorro que se obtiene por dejar de conducir (área *cem* de la figura 2) es proporcional a la valoración del tiempo. En el caso (b) se aprecia como el cambio en el excedente de usuario es mayor entre más inelástica sea la demanda y el ahorro por dejar de conducir es mayor cuanto más elástica sea la demanda.

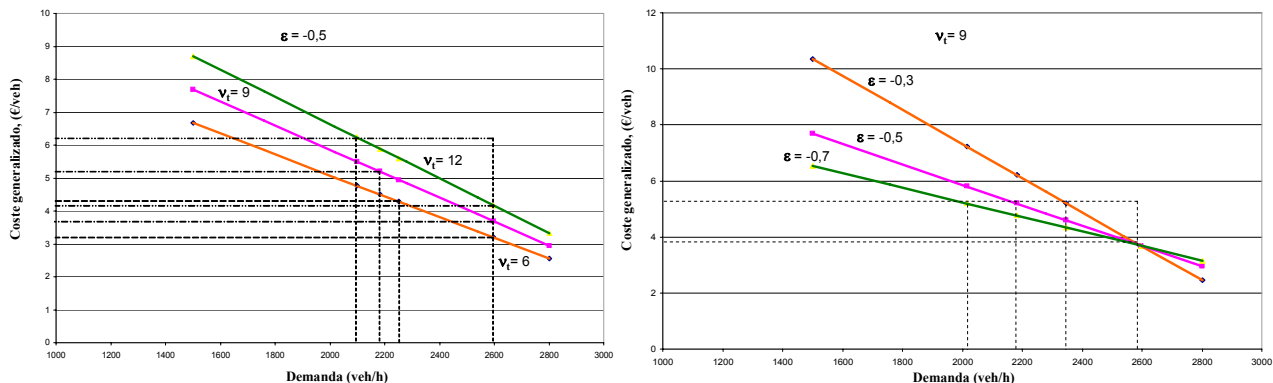


FIGURA 3: Cambio en el Excedente de Usuario entre un Par O-D de la Red, cuando (a) Varía el Valor del Tiempo para una Misma Elasticidad y (b) Varía la Elasticidad para un Mismo Valor del Tiempo

En la figura 4 se ilustra que, tanto en el caso (a) como en el caso (b) si las tarifas son bajas se presenta una gran pérdida del excedente de usuario debido al aumento de la congestión. Sin embargo, para el caso (a) se nota que cuanto mayor sea la valoración del tiempo habrá mayor pérdida del excedente de usuario debido a las tarifas bajas mientras que en el caso (b) estas diferencias son mínimas. Para la misma disminución de cantidad de tráfico se obtiene, que la variación del excedente de usuario es diferente en ambos casos, debido básicamente a la estimación de la tarifa para cada uno de ellos.

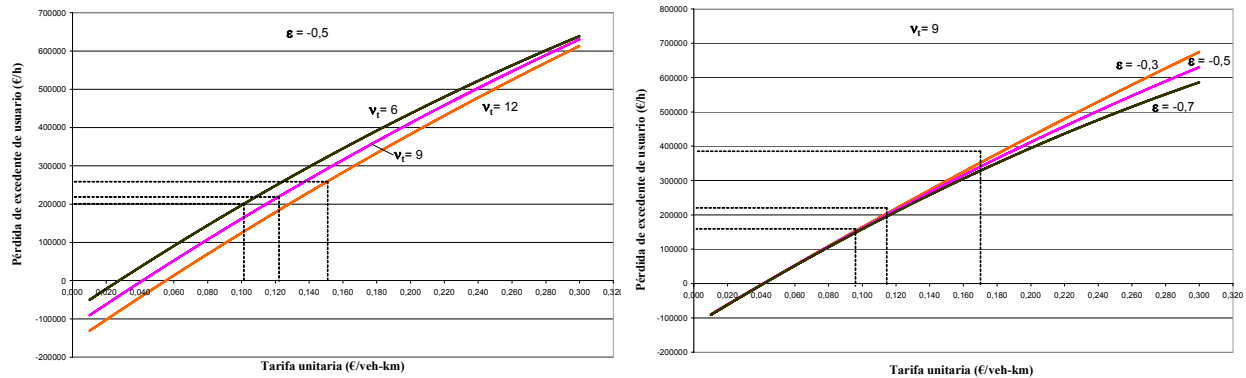


FIGURA 4: Pérdida del Excedente de Usuario Total en la Red, cuando (a) Varía el Valor del Tiempo para una Misma Elasticidad y (b) Varía la Elasticidad para un Mismo Valor del Tiempo

## 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 diferentes esquemas de *road pricing* y en este caso se emplea un sistema tarifario de tipo kilométrico. A partir del cálculo de la tarifa es posible estimar el recaudo a obtener, los efectos en el excedente de usuario y el cambio en la variación del bienestar que produce este tipo de medidas.

Para la obtención de los datos de entrada del modelo se utilizó el software TransCAD que permitió estimar la matriz de viajes O-D para la hora punta de la mañana y cuantificar las diferentes matrices de caminos mínimos con sus respectivas impedancias para así, obtener la matriz de mínimo costo generalizado inicial entre los diferentes pares O-D que conforman la red. La función de demanda asumida es de tipo lineal con una elasticidad con respecto al costo generalizado variable en función de la distancia del viaje. Se trabajaron diferentes valores de elasticidad y del valor del tiempo, los cuales se encuentran dentro del rango de magnitudes que se emplean para este tipo de estudios.

La pérdida de excedente de usuario depende básicamente del tipo de tráfico que se disuade al implementarse una tarifa por congestión. No obstante, la cantidad de esa pérdida está influenciada notablemente por el tipo de esquema de *road pricing* que se diseñe, la función de demanda que se adopte y de los valores que tomen los parámetros claves de la elasticidad y del valor del tiempo. Pues en el caso de subestimar la elasticidad (demanda más inelástica) o sobrevalorar el valor del tiempo, las tarifas que se obtienen son notablemente superiores y por lo tanto se producirán mayores variaciones en el bienestar, aunque suponga una mayor percepción de ingresos.

## AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece la colaboración de la Cátedra Abertis por su beca de apoyo a la investigación.

## REFERENCIAS

- Autoritat del Transport Metropolità de Barcelona. **Enquesta de Mobilitat Quotidiana 2001**. Disponible en [http://www.atm-transmet.org/cat/apartado4/apart4\\_04.htm](http://www.atm-transmet.org/cat/apartado4/apart4_04.htm)
- Daskin, M. S., J.L. Schofer y A.E. Haghani (1988) A quadratic programming model for designing and evaluating distance-based and zone fares for urban transit. **Transportation Research B**, 22: 1, 25-44.
- Doll, C. y J.O. Jansson (2005) User costs and benefits. In Nash, C. y B. Matthews Editors. **Measuring the Marginal Social Cost of Transport**. **Research in Transportation Economics**, Volume 14, 125-154. Elsevier. ISSN: 0739-8859.
- Eliasson J. y L. Mattsson (2006) Equity effects of congestion pricing quantitative methodology and a case study for Stockholm. **Transportation Research A**, 40, 602-620.
- Matas, A. y J.L. Raymond (2003) Demand Elasticity on Tolled Motorways. **Journal of Transportation and Statistics**, volumen 6, No. 2/3 ([www.bts.gov](http://www.bts.gov)), 91-108.
- May, A., y D. Milne (2000) Effects of alternative road pricing systems on network performance. **Transportation Research A**, 34, 407-436.
- Safirova, E., K. Gillingham, I. Parry, P. Nelson, W. Harrington y D. Mason (2004) Welfare and distributional effects of road pricing schemes for Metropolitan Washington DC. In Santos, G. editor. **Road pricing: Theory and evidence**. **Research in transportation economics**, volume 9, 179-206. Elsevier JAI. ISBN: 0-7623-0968-7. Amsterdam.
- Salas, M. (2006) **Análisis de estrategias tarifarias para la gestión de carreteras en entornos metropolitanos**. Proyecto de tesis Doctoral dirigida por F. Robusté. Escuela de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España.
- Santos, G., D. Newbery y L. Rojey (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.
- 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](http://www.vtpi.org/elasticities.pdf).