

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

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

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



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

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Tesis Doctoral

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

Autor:

Miller Humberto Salas Rondón
Ingeniero Civil

Director de la tesis:

Dr. Francesc Robusté Antón
Catedrático de Transporte de la UPC

Co-director de la tesis:

Dr. Sergi Saurí Marchán
Profesor de Transporte de la UPC

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

Barcelona, Septiembre de 2008

CAPÍTULO 5

GENERACIÓN Y MODELIZACIÓN DE DIVERSOS ESQUEMAS TARIFARIOS PARA UNA RED DE CARRETERAS

5.1 Introducción

Estructurada la metodología descrita en el capítulo 4, que permite analizar y comparar con respecto al escenario base, los cambios que se presentan en diversos indicadores operacionales, económicos y sociales al implantarse un determinado esquema de *road pricing*, a continuación se definen los diferentes tipos de esquemas que serán contrastados bajo el enfoque de la metodología desarrollada. Cada uno de los esquemas tarifarios a estudiar presenta ventajas y desventajas, sin embargo, se emplean para obtener dos objetivos generales: el primero es permitir la reducción hasta un nivel deseado del número de viajes totales o la cantidad de veh-km que realizan un grupo de usuarios con un nivel de renta determinado (especificado según el valor del tiempo) y segundo, generar el recaudo suficiente para cubrir los ingresos brutos que se obtienen inicialmente por razones de financiación de la infraestructura.

Las topologías tarifarias analizadas en este estudio pueden clasificarse básicamente en simples y complejas. Dentro de los sistemas simples se encuentran los esquemas con tarifa plana, kilométrica lineal que son los usados regularmente; mientras que los complejos resultan de la combinación de los anteriores en los que se incluyen posibilidades de descuento para los *commuters* que realizan viajes de largo recorrido y estructuras cóncavas para evitar los efectos frontera entre zonas tarifarias.

El criterio escogido consiste en establecer para cada esquema tarifario la expresión matemática correspondiente que permite cuantificar y analizar un determinado indicador, de tal forma que resulte sencillo su posterior evaluación y contrastación con los demás esquemas. Dentro de los indicadores evaluados se encuentran los ingresos brutos futuros, la pérdida de excedente de usuario y la variación de bienestar social en toda la red.

5.2 Tarifa plana

Es muy simple de explicar al público y tecnológicamente fácil de implementar ya que el mecanismo de tarificación es requerido en un punto. Este tipo de configuración se aplica cuando se quiere ingresar o abandonar una determinada zona geográfica durante el

periodo de cobro. Generalmente se aplica en entornos urbanos y metropolitanos, tal y como se ha hecho en Estocolmo, Londres, Oslo, Trondheim, Bergen, etc., a través de un cordón (o múltiples cordones con vías de enlace entre cordones para controlar los movimientos orbitales). También se emplea al querer incorporarse a una autopista de peaje.

El precio del viaje puede variar según la dirección, ya que en horas punta de la mañana la tarifa generalmente es más alta para los que quieren ingresar al área tarifada que los que deseen salir y viceversa en las horas punta de la tarde. Esta opción es inapropiada para tarifar las carreteras de enlace entre cordones ya que las tarifas direccionales fomentan la formación de congestión, la cual varía a lo largo de la dirección radial.

Los sistemas de tarifación a través de un punto requieren de tecnología *Electronic Toll Collection-ETC-* (actualmente disponible a través de *tags* con radio frecuencia o *transponders* que usan infrarrojos), con el objetivo de permitir circular bajo régimen de *free-flow* y evitar la formación de colas si el pago se hiciese de forma manual. Este tipo de sistemas tarifarios presenta las siguientes ventajas:

- La configuración del sistema generalmente es abierto¹⁰.
- Es un sistema simple que los usuarios entienden fácilmente.
- La tarifa puede variar según la dirección, tipo de vehículo y según la hora del viaje (mayor valor durante las horas punta).

Los inconvenientes que presenta son:

- La poca justicia para las distancias medias de recorrido, ya que no reconoce la tarifa por kilómetro.
- Probablemente cause pérdidas económicas a muchos usuarios, dado los efectos regresivos sobre los de menor renta.

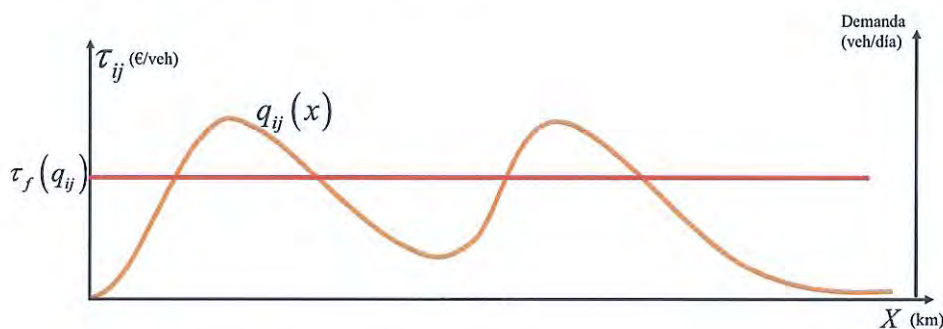


Fig. 5.1. Aplicación de tarifa plana entre un par O-D ij .

¹⁰ En el sistema abierto los usuarios pagan una cantidad dependiendo de la distancia que recorra, mientras que en el sistema cerrado al usuario se le provee de un ticket al ingresar a la carretera y lo entregara al abandonar el sistema, pagando proporcionalmente a la distancia recorrida.

En la figura 5.1 se ilustra este esquema tarifario, que brinda la posibilidad al usuario de pagar la misma tarifa independientemente del recorrido que haga entre los diversos pares origen-destino $ij \in \mathcal{W}$ de la red en estudio. En este caso la magnitud de la tarifa depende de la cantidad de tráfico que se desee disuadir.

La formulación matemática que caracteriza este tipo de estructura tarifaria se plasma mediante la expresión 5.1.

$$\tau_{ij}^1 = \tau_f(q_{ij}) \quad \forall ij \in \mathcal{W} \quad (5.1)$$

Sustituyendo la ecuación 5.1 en las formulaciones correspondientes a cada uno de los indicadores a evaluar, se presenta que la expresión que cuantifica la demanda futura entre el origen i y el destino j , está dada por:

$$q_{ij}^1 = q_{ij}^0 \left[\frac{\eta_{ij} \tau_f + g_{ij}^0 + \eta_{ij} v_t \nabla t_{ij} - \eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right] \quad (5.2)$$

En este caso, para evitar una demanda futura negativa se tiene que:

$$\tau_f \leq \frac{g_{ij}^0 + \eta_{ij} v_t \nabla t_{ij} - \eta_{ij} \tau_{ij}^0}{\eta_{ij}} \quad \forall ij \in \mathcal{W} \quad (5.3)$$

Al descomponer la expresión 5.2 esta se transforma en:

$$q_{ij}^1 = \alpha_{ij} \tau_f + \beta_{ij} \quad \forall ij \in \mathcal{W} \quad (5.4)$$

Donde:

$$\alpha_{ij} = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij} \quad \text{Siendo cada } \alpha_{ij} < 0 \quad (5.4a)$$

Y,

$$\beta_{ij} = q_{ij}^0 \left[1 + \frac{\eta_{ij} v_t \nabla t_{ij}}{g_{ij}^0} - \frac{\eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right] \quad \text{Siendo cada } \beta_{ij} > 0 \quad (5.4b)$$

En cuanto a la variación del excedente de usuario entre el par O-D ij , este se estima como:

$$\nabla Eu_{ij} = \frac{1}{2} (\alpha_{ij} \tau_f^2 + \rho_{ij} \tau_f + \delta_{ij}) \quad (5.5)$$

Donde:

$$Y, \quad \rho_{ij} = 2\beta_{ij} \quad \text{Siendo cada } \rho_{ij} > 0 \quad (5.5a)$$

$$\delta_{ij} = (v_t \nabla t_{ij} - \tau_{ij}^0) q_{ij}^0 \left(2 + \frac{\eta_{ij} v_t \nabla t_{ij}}{g_{ij}^0} - \frac{\eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \quad \text{Siendo cada } \delta_{ij} < 0 \quad (5.5b)$$

El valor de δ_{ij} es un parámetro relevante en la cuantificación tanto del excedente de usuario como del bienestar social, ya que mide la diferencia en costes entre el tiempo medio de viaje inicial y el tiempo medio de viaje futuro para una determinada reducción de viajes o veh-km.

Al sumar cada uno de los cambios del excedente de usuario de los diversos pares O-D de la red, se obtiene que la variación total se cuantifica de la siguiente forma:

$$\nabla Eu_T = \frac{1}{2} \left(\sum_{ij \in W} \alpha_{ij} \tau_f^2 + \sum_{ij \in W} \rho_{ij} \tau_f + \sum_{ij \in W} \delta_{ij} \right) \quad (5.6)$$

Si se sustituye, $\alpha = \sum_{ij \in W} \alpha_{ij}$, $\rho = \sum_{ij \in W} \rho_{ij}$ y $\delta = \sum_{ij \in W} \delta_{ij}$ en la ecuación 5.6, esta se transforma en:

$$\nabla Eu_T = \frac{1}{2} (\alpha \tau_f^2 + \rho \tau_f + \delta) \quad (5.7)$$

Como se aprecia, la ecuación 5.7 corresponde a una función cuadrática de tipo cóncava, cuya formulación permite que sea convergente en una única solución óptima para el valor de la tarifa plana dependiendo de la cantidad de flujo que se quiera disuadir.

En el caso del recaudo bruto que se obtendría entre el par O-D ij empleando una tarifa plana, se estimaría por medio de la expresión:

$$I_{ij} = \alpha_{ij} \tau_f^2 + \beta_{ij} \tau_f \quad (5.8)$$

Luego, el recaudo bruto total a obtener mediante la suma del ingreso de cada uno de los pares O-D que conforman la red, estará dado por:

$$I_T = \alpha \tau_f^2 + \beta \tau_f \quad (5.9)$$

Donde: $\beta = \sum_{ij \in W} \beta_{ij}$

Al querer restringir los valores que pueden tomar las tarifas, se nota que la ecuación 5.9 corresponde a una función cuadrática, donde en ausencia de restricciones el ingreso

bruto total I_T se maximiza cuando $\frac{\partial I_T}{\partial \tau_f} = 0$, por lo tanto al derivar dicha ecuación se tiene que $\frac{\partial I_T}{\partial \tau_f} = 2\alpha\tau_f^* + \beta = 0$, es decir:

$$\tau_f^* = -\beta/2\alpha \quad (5.9a)$$

En este punto se obtiene la demanda total mínima, al reemplazar el valor de τ_f^* en la expresión:

$$Q_{\min} = \sum_{ij \in W} q_{ij}^1 = \sum_{ij \in W} \alpha_{ij} \tau_f^* + \sum_{ij \in W} \beta_{ij} = 0,5\beta \quad \forall ij \in W \quad (5.10)$$

Dado que, se desea lograr un uso óptimo de la capacidad en toda la red de carreteras, es necesario establecer que la demanda total sea siempre superior a la demanda mínima Q_{\min} , por lo tanto, la demanda total debe cumplir con la siguiente restricción:

$$Q_T^1 = \sum_{ij \in W} q_{ij}^1 = \alpha\tau_f + \beta \geq Q_{\min} \quad \forall ij \in W \quad (5.11)$$

Otro tipo de restricción que se presenta en este modelo, es que la tarifa plana a pagar debe estar comprendida entre un rango de valores mínimo y máximo establecidos por el planificador, de la forma:

$$\tau_{ij_{\min}} \leq \tau_f < \tau_{ij_{\max}} \quad \forall ij \in W \quad (5.12)$$

Donde $\tau_{ij_{\min}}$ se puede establecer de manera que se garantice el ingreso inicial total I_T^0 , es decir:

$$\tau_f \geq \frac{I_T^0}{\sum_{ij \in W} q_{ij}^0} = \tau_{ij_{\min}} \quad \forall ij \in W \quad (5.12a)$$

Y el valor máximo $\tau_{ij_{\max}}$ se determina controlando que no se logre la demanda mínima total en la red, esto es:

$$\tau_f < \tau_f^* = \tau_{ij_{\max}} \quad \forall ij \in W \quad (5.12b)$$

Con base en la estimación del recaudo bruto futuro, la variación del excedente del productor se estima como sigue:

$$\Delta I_T = \alpha\tau_f^2 + \beta\tau_f - I_T^0 \quad (5.13)$$

Sumando la pérdida neta del excedente de usuario y la variación total del excedente del productor se obtiene el cambio del bienestar social que se produce al implantarse un esquema con tarifa plana Salas et al. (2008). Este cambio se cuantifica mediante la ecuación:

$$\Delta Bs_T = \frac{1}{2}(\alpha\tau_f^2 - \delta) - I_T^0 \quad (5.14)$$

La primera derivada de la expresión 5.14 indica que el cambio de bienestar es máximo cuando el valor de $\tau_f^0 = 0$, dado que el parámetro δ es válido para una reducción de tráfico definida. Es por ello que se requiere alcanzar diferentes valores de estos parámetros (a través de distintas disuaciones de demanda) para poder establecer correlaciones y poder definir el comportamiento del indicador ante un determinado cambio de tarifas.

La tabla 5.1, muestra en resumen la metodología empleada para cuantificar los cambios en los indicadores establecidos con respecto al escenario base al implantar una tarifa plana.

Tabla 5.1. Metodología secuencial para evaluar los cambios en diferentes indicadores al implantarse un esquema de tarifa plana.

Indicador a evaluar	Modelación	Parámetros
Demanda futura entre un par O-D,	$q_{ij}^1 = \alpha_{ij}\tau_f + \beta_{ij} \quad \forall ij \in W$	$g_{ij}^0 = f_{ij}^0 + v_i t_{ij}^0 + \tau_{ij}^0$
Demanda futura total en la red	$Q_T^1 = \sum_{ij \in W} q_{ij}^1 = \alpha\tau_f + \beta \geq Q_{\min}$	$I_T^0 = \sum_{ij \in W} q_{ij}^0 \tau_{ij}^0$
Variación del excedente de usuario entre un par O-D,	$\nabla Eu_{ij} = \frac{1}{2}(\alpha_{ij}\tau_f^2 + \rho_{ij}\tau_f^1 + \delta_{ij}) \quad \forall ij \in W$	$\alpha_{ij} = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0}\right) \eta_{ij} ; \quad \alpha = \sum_{ij \in W} \alpha_{ij}$
Variación del excedente de usuario total en la red	$\nabla Eu_T = \frac{1}{2}[\alpha\tau_f^2 + \rho\tau_f^1 + \delta]$	$\beta_{ij} = q_{ij}^0 \left[1 + \eta_{ij} v_i \nabla t_{ij} / g_{ij}^0 - \eta_{ij} \tau_{ij}^0 / g_{ij}^0\right] ; \quad \beta = \sum_{ij \in W} \beta_{ij}$
Recaudo bruto entre un par O-D,	$I_{ij} = \alpha_{ij}\tau_f^2 + \beta_{ij}\tau_f^1 \quad \forall ij \in W$	$\rho_{ij} = 2\beta_{ij} ; \quad \rho = \sum_{ij \in W} \rho_{ij}$
Recaudo bruto total en la red	$I_T = \alpha\tau_f^2 + \beta\tau_f^1$	$\delta_{ij} = (v_i \nabla t_{ij} - \tau_{ij}^0) q_{ij}^0 \left(2 + \eta_{ij} v_i \nabla t_{ij} / g_{ij}^0 - \eta_{ij} \tau_{ij}^0 / g_{ij}^0\right) ; \quad \delta = \sum_{ij \in W} \delta_{ij}$
Tarifa promedio para toda la red	$\tau_f^1 = \frac{I_T^1}{Q_T^1}$	$\eta_{ij} = \varepsilon x_{ij}^b$
Tarifa unitaria media para toda la red	$\tau_{um}^1 = \frac{1}{Q_T^1} \sum_{ij \in W} \frac{q_{ij}^1 \tau_f^1}{l_{ij}}$	$Q_{\min} = \sum_{ij \in W} q_{ij}^1 = \sum_{ij \in W} \alpha_{ij} \tau_f^1 + \sum_{ij \in W} \beta_{ij} ; \quad \tau_f^1 = -\beta / 2\alpha$
Variación del excedente del productor total en la red	$\Delta I_T = \alpha\tau_f^2 + \beta\tau_f^1 - I_T^0$	$\tau_{ij\min} \leq \tau_f < \tau_{ij\max}$
Variación del bienestar social total en la red	$\Delta Bs_T = \frac{1}{2}(\alpha\tau_f^2 - \delta) - I_T^0$	$\tau_f \geq \frac{I_T^0}{\sum_{ij \in W} q_{ij}^0} = \tau_{ij\min} ; \quad \tau_f < \tau_f^* = \tau_{ij\max}$

5.3 Tarifa solamente kilométrica

Este esquema hace parte de los sistemas de tarifación continua y en este caso consiste en aplicarles a los usuarios de las carreteras una tarifa proporcional al número de

kilómetros que recorran durante el viaje. Con los novedosos sistemas tecnológicos de ETC para el cobro de la tarifa, este tipo de estrategias está siendo aplicado en diversos países, inicialmente en vías interurbanas y básicamente a camiones y se espera que posteriormente se aplique al resto de categorías de vehículos.

La tarifa puede variar según la hora del viaje (mayor valor durante las horas punta), u otros factores relevantes y se cobra por ingresar a una red de carreteras dentro de una zona tarifada. Además, esta topología tarifaria permite distinguir la tarifa unitaria kilométrica según las *características del vehículo*, generalmente según el peso, la configuración de los ejes y las categorías de emisión según el tipo de combustible que se use. Las ventajas de este sistema son:

- Promueve la implementación y el uso de ETC;
- Permite la clasificación de usuarios por origen y destino;
- Mejora la percepción de los usuarios de un pago justo en la medida en que se cobra en función del número de kilómetros de recorrido;
- Mejora la visión integral del sistema, pero se requiere de compensaciones y una armonización tarifaria y;
- Es escalable a todas las posibles extensiones de la red.

Dentro de los inconvenientes, se tienen:

- Obliga a “cerrar” toda la red. Es decir, requiere la instalación de elementos de pago en todas las salidas del sistema de autopistas, así como la expedición de un ticket en todas las entradas;
- No es práctico para los usuarios que deseen hacer pagos manuales en ambientes urbanos mediante el uso de las *smart-cards*;
- Para grandes distancias resulta ser bastante disuasorio. En este sentido puede perjudicar a los viajeros frecuentes;
- No beneficia el efecto red al no permitir el equilibrio del tráfico. Si las tarifas son muy altas la congestión se incrementa en las distancias cortas.

Definir una tarifa justa que cubra de forma óptima el recorrido según el número de kilómetros es lo ideal en un proceso de tarifación, para ello se propone establecer dos tipos de estructuras tarifarias:

5.3.1 Tarifa kilométrica definida mediante función lineal

Este tipo de estructura tarifaria está definida por una función lineal creciente a lo largo de su recorrido como se ilustra la figura 5.2, aplicada sobre la demanda (veh/día o veh-km/día) entre un origen i y un destino j , $\forall ij \in W$. Este tipo de función es la que más se utiliza en esquemas tarifarios basados en distancia.

La expresión matemática que define este tipo de esquema tarifario está dada por:

$$\tau_{ij}^1 = \tau_u^k x_{ij} \quad \forall ij \in W \quad (5.15)$$

Donde: τ_u^k (€/veh-km) es la tarifa unitaria que se aplicaría según el tipo de vehículo k a medida que avanza en su viaje y constituye la pendiente de la recta tarifaria la cual debe ser siempre positiva y x_{ij} es el trayecto recorrido entre el par O-D $ij \in W$.

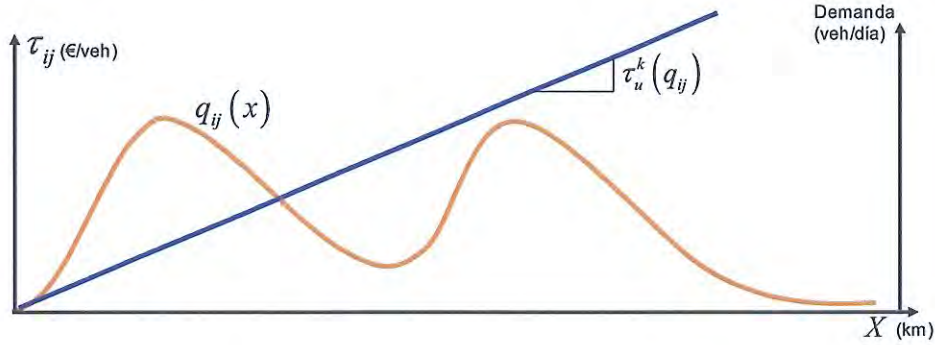


Fig. 5.2. Tarifación kilométrica de tipo lineal.

Siguiendo el procedimiento indicado para el esquema con tarifa plana y sustituyendo la ecuación 5.15 en las expresiones correspondientes a cada uno de los indicadores a evaluar, se tiene que la demanda esperada en vehículos livianos equivalentes entre el origen i y el destino j , se estima por medio de:

$$q_{ij}^1 = q_{ij}^0 \left[\frac{\eta_{ij} (\tau_u x_{ij}) + g_{ij}^0 + \eta_{ij} V_t \nabla t_{ij} - \eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right] \quad (5.16)$$

En este caso, para evitar una demanda futura negativa se tiene que:

$$\tau_u x_{ij} \leq \frac{g_{ij}^0 + \eta_{ij} V_t \nabla t_{ij} - \eta_{ij} \tau_{ij}^0}{\eta_{ij}} \quad \forall ij \in W \quad (5.16a)$$

Al descomponer la expresión 5.16 se transforma en:

$$q_{ij}^1 = \xi_{ij} \tau_u + \beta_{ij} \quad \forall ij \in W \quad (5.17)$$

Donde: β_{ij} se calcula igual que en la ecuación 5.4b y;

$$\xi_{ij} = \alpha_{ij} x_{ij} = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij} x_{ij} \quad \text{Siendo cada } \xi_{ij} < 0 \quad (5.17a)$$

Bajo el mismo enfoque, la estimación del cambio del excedente de usuario entre el origen i y el destino j , se realiza a través de:

$$\nabla Eu_{ij} = \frac{1}{2} (\theta_{ij} \tau_u^2 + \varphi_{ij} \tau_u + \delta_{ij}) \quad (5.18)$$

Donde: δ_{ij} permanece igual que en la ecuación 5.5b y;

$$\theta_{ij} = \alpha_{ij} x_{ij}^2 = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij} x_{ij}^2 \quad \text{Siendo cada } \theta_{ij} < 0 \quad (5.18a)$$

Y,

$$\varphi_{ij} = \rho_{ij} x_{ij} = 2\beta_{ij} x_{ij} \quad \text{Siendo cada } \varphi_{ij} > 0 \quad (5.18b)$$

Luego, el cambio total del excedente de usuario en la red se calcula como:

$$\nabla E u_T = \frac{1}{2} (\theta \tau_u^2 + \varphi \tau_u + \delta) \quad (5.19)$$

$$\text{Donde: } \theta = \sum_{ij \in W} \theta_{ij}, \quad \varphi = \sum_{ij \in W} \varphi_{ij} \quad \text{y} \quad \delta = \sum_{ij \in W} \delta_{ij}$$

En cuanto al recaudo bruto que se obtendría entre el par O-D ij empleando una tarifa kilométrica lineal, este se valora por medio de la expresión:

$$I_{ij} = \theta_{ij} \tau_u^2 + \gamma_{ij} \tau_u \quad \forall ij \in W \quad (5.20)$$

Donde: θ_{ij} se calcula mediante la ecuación 5.18a y;

$$\gamma_{ij} = \beta_{ij} x_{ij} = q_{ij}^0 \left[1 + \frac{\eta_{ij} v_t \nabla t_{ij}}{g_{ij}^0} - \frac{\eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right] x_{ij} \quad \text{Siendo cada } \gamma_{ij} > 0 \quad (5.20a)$$

Por lo tanto, el recaudo bruto total que se genera de la suma de los ingresos recaudados en cada uno de los pares O-D de la red, se determina a través de la función cuadrática:

$$I_T = \theta \tau_u^2 + \gamma \tau_u \quad (5.21)$$

$$\text{Donde: } \gamma = \sum_{ij \in W} \gamma_{ij}$$

Al igual que en el caso anterior, la expresión 5.21 corresponde a una función cuadrática, donde en ausencia de restricciones los ingresos totales I_T se maximizan cuando

$$\frac{\partial I_T}{\partial \tau_u} = 0, \quad \text{por lo tanto, al derivar dicha expresión se tiene que: } \frac{\partial I_T}{\partial \tau_u} = 2\theta \tau_u^* + \gamma = 0$$

, por lo tanto:

$$\tau_u^* = -\gamma / 2\theta \quad (5.22)$$

Además, en este punto se alcanza la demanda total mínima al reemplazar τ_u^* en la ecuación 5.16 y sumando todos los pares O-D $ij \in W$, luego:

$$Q_{\min} = \sum_{ij \in W} \xi_{ij} \tau_u^* + \sum_{ij \in W} \beta_{ij} = \xi \tau_u^* + \beta \quad \forall ij \in W \quad (5.23)$$

Donde: $\xi = \sum_{ij \in W} \xi_{ij}$

Al querer utilizar de manera eficiente la capacidad limitada de la red de carreteras es necesario establecer que la demanda total sea superior o en el peor de los casos, igual a la demanda mínima Q_{\min} , por lo tanto se presenta la siguiente restricción al implantarse un esquema basado en la distancia de recorrido:

$$Q = \sum_{ij \in W} q_{ij} = \xi \tau_u + \beta \geq Q_{\min} \quad \forall ij \in W \quad (5.24)$$

Otro tipo de restricción que se presenta en este modelo, es que la tarifa a pagar debe estar comprendida entre un rango de valores mínimo y máximo establecidos por el planificador, es decir:

$$\tau_{ij_{\min}} \leq \tau_u x_{ij} \leq \tau_{ij_{\max}} \quad \forall ij \in W \quad (5.25)$$

Por lo tanto, basados en la distancia más corta x_{\min} entre cualquier par O-D de la red y en el camino más corto entre los dos nodos más distanciados de la red x_{\max} , se tiene:

$$\tau_u x_{\min} \geq \tau_{ij_{\min}} \quad \forall ij \in W \quad (5.25a)$$

$$\tau_u x_{\max} \leq \tau_{ij_{\max}} \quad \forall ij \in W \quad (5.25b)$$

Otra restricción es con respecto a la tarifa unitaria, la cual debe estar comprendida entre un rango de valores mínimo y máximo, es decir:

$$\tau_{u_{\min}} \leq \tau_u \leq \tau_{u_{\max}} \quad \forall ij \in W \quad (5.26)$$

Donde $\tau_{u_{\min}}$ se puede establecer de tal forma que se garantice el ingreso inicial total I_T^0 , por lo tanto:

$$\tau_{u_{\min}} \geq \frac{I_T^0}{\sum_{ij \in W} q_{ij}^0} \quad \forall ij \in W \quad (5.26a)$$

Y el valor máximo $\tau_{u_{\max}}$ se determina estableciendo un nivel de servicio apropiado (de acuerdo con el nivel de tráfico que se quiera reducir en la red).

A partir de la estimación del recaudo bruto total en el escenario futuro, se determina la variación del excedente del productor como:

$$\Delta I_T = \theta \tau_u^2 + \gamma \tau_u - I_T^0 \tag{5.27}$$

Por lo tanto, el cambio del bienestar social que se produce al implantarse este sistema tarifario, se establece como:

$$\Delta BS_T = \frac{1}{2} (\theta \tau_u^2 - \delta) - I_T^0 \tag{5.28}$$

La primera derivada de la expresión 5.28 indica que el cambio de bienestar es máximo cuando el valor de $\tau_f^0 = 0$, dado que el parámetro δ es válido para una determinada reducción de tráfico. Es por ello que se requiere obtener diferentes valores de estos parámetros (a través de distintas disuasiones de demanda) para poder establecer correlaciones y poder definir el comportamiento del indicador ante un determinado cambio de tarifas.

La tabla 5.2, muestra en resumen la metodología que evalúa los cambios en los indicadores establecidos con respecto al escenario base al implantar una tarifa basada en la distancia recorrida.

Tabla 5.2. Metodología para evaluar los cambios en diferentes indicadores al implantarse un esquema con tarifa kilométrica lineal.

Indicador a evaluar	Modelación	Parámetros
Demanda futura entre un par O-D,	$q_{ij}^1 = \xi_{ij} \tau_u + \beta_{ij} \quad \forall ij \in W$	$g_{ij}^0 = f_{ij}^0 + v_i t_{ij}^0 + \tau_{ij}^0$; $I_T^0 = \sum_{ij \in W} q_{ij}^0 \tau_{ij}^0$
Demanda futura total en la red	$Q_T^1 = \sum_{ij \in W} q_{ij}^1 = \xi \tau_u + \beta \geq Q_{\min}$	$\xi_{ij} = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij} x_{ij}$; $\xi = \sum_{ij \in W} \xi_{ij}$
Variación del excedente de usuario entre un par O-D,	$\nabla Eu_{ij} = \frac{1}{2} (\theta_{ij} \tau_u^2 + \varphi_{ij} \tau_u + \delta_{ij}) \quad \forall ij \in W$	$\beta_{ij} = q_{ij}^0 \left[1 + \frac{\eta_{ij} v_i \nabla t_{ij}}{g_{ij}^0} - \frac{\eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right]$; $\beta = \sum_{ij \in W} \beta_{ij}$
Variación del excedente de usuario total en la red	$\nabla Eu_T = \frac{1}{2} [\theta \tau_u^2 + \varphi \tau_u + \delta]$	$\varphi_{ij} = 2 \beta_{ij} x_{ij}$; $\varphi = \sum_{ij \in W} \varphi_{ij}$
Recaudo bruto entre un par O-D,	$I_{ij} = \theta_{ij} \tau_u^2 + \gamma_{ij} \tau_u \quad \forall ij \in W$	$\delta_{ij} = (v_i \nabla t_{ij} - \tau_{ij}^0) q_{ij}^0 \left(2 + \frac{\eta_{ij} v_i \nabla t_{ij}}{g_{ij}^0} - \frac{\eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right)$; $\delta = \sum_{ij \in W} \delta_{ij}$
Recaudo bruto total en la red	$I_T = \theta \tau_u^2 + \gamma \tau_u$	$\theta_{ij} = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij} x_{ij}^2$; $\theta = \sum_{ij \in W} \theta_{ij}$
Tarifa promedio para toda la red	$\tau_p^1 = \frac{I_T^1}{Q_T^1}$	$\gamma_{ij} = \beta_{ij} x_{ij}$; $\gamma = \sum_{ij \in W} \gamma_{ij}$
Tarifa unitaria media para toda la red	$\tau_{um}^1 = \tau_u$	$\eta_{ij} = \varepsilon x_{ij}^b$
Variación del excedente del productor total en la red	$\Delta I_T = \theta \tau_u^2 + \gamma \tau_u - I_T^0$	$Q_{\min} = \sum_{ij \in W} q_{ij}^1 = \sum_{ij \in W} \xi_{ij} \tau_u + \sum_{ij \in W} \beta_{ij}$; $\tau_u^* = -\gamma / 2\theta$
Variación del bienestar social total en la red	$\Delta BS_T = \frac{1}{2} (\theta \tau_u^2 - \delta) - I_T^0$	$\tau_{ij_{\min}} \leq \tau_u x_{ij} < \tau_{ij_{\max}}$; $\tau_{u_{\min}} \leq \tau_u < \tau_{u_{\max}}$
		$\tau_{u_{\max}} \geq \frac{I_T^0}{\sum_{ij \in W} q_{ij}^0}$; $\tau_{u_{\max}} \leq \tau_u^*$

5.3.2 Tarifa kilométrica definida mediante función cóncava

Este tipo de estructura tarifaria basada en distancia, está definida por una función creciente a lo largo de su recorrido de tipo cóncava, cómo la que ilustra la figura 5.3, aplicada sobre la demanda (veh/día o veh-km/día) entre un origen i hasta un destino j , $\forall ij \in W$.

Este tipo de funciones cóncavas, tienen como objetivo favorecer los trayectos largos y sobre todo la equidad en los viajeros frecuentes o *commuters* en sus grandes recorridos semanales. Lo que se busca es compensar un poco el coste de la tarifa a pagar con los costes mayores del tiempo y operación que se producen en los trayectos largos, sin olvidar, los beneficios que reciben este tipo de usuarios (menores gastos de alquiler y propiedad, mayor privacidad, etc.) comparado con los que viven cerca del CBD.

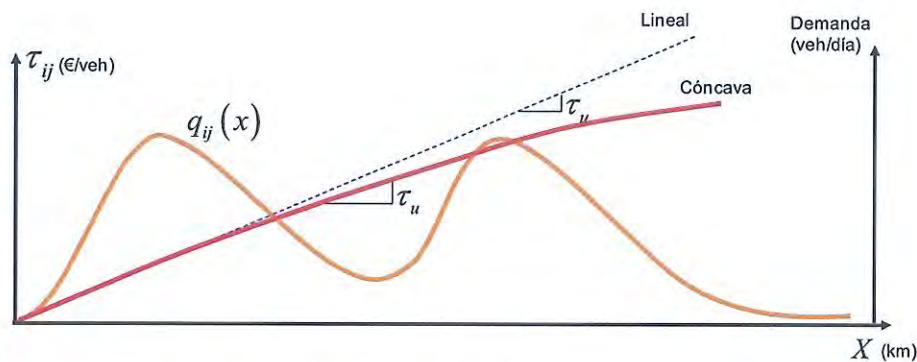


Fig. 5.3. Tarifación kilométrica de tipo cóncava.

Análogo al proceso seguido para la estructura kilométrica de tipo lineal, se tiene que la formulación matemática que caracteriza este tipo de estructura tarifaria viene dada por la expresión 5.29.

$$\tau_{ij}^1 = \tau_u \chi_{ij} \quad \forall ij \in W \quad (5.29)$$

Donde: τ_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 χ_{ij} (km) se define por la función cóncava creciente de la expresión 5.30 y cuya concavidad se demuestra en el Anexo 3.

$$\chi_{ij} = x_{ij}^m e^{x_{ij} \ln^2 n} \quad \forall ij \in W \quad (5.30)$$

Donde: x_{ij} es el trayecto recorrido entre el par O-D $ij \in W$, m y n son dos parámetros a calibrar entre el intervalo (0,1) y dependerán del tipo de descuento (respecto a la estructura kilométrica lineal) que se quiera implementar en una determinada distancia, tal como se ilustra en la figura 5.4, en la cual se muestran descuentos entre el 10% y 20% al recorrer una distancia de 100 km.

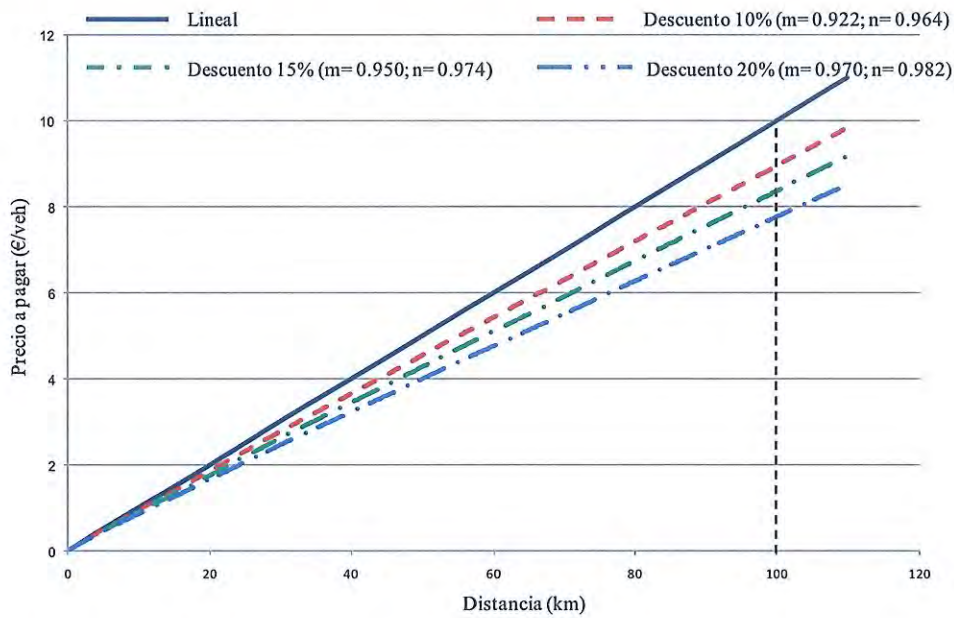


Fig. 5.4. Tarifación kilométrica Lineal vs. Cónca. Los parámetros m y n se calibran de acuerdo con el descuento que se quiera realizar en determinada distancia.

La expresión que determina la demanda futura entre el origen i y el destino j , $\forall ij \in W$ al implantarse la estructura tarifaria expresada en 5.29 es:

$$q_{ij}^1 = q_{ij}^0 \left[\frac{\eta_{ij} (\tau_u \chi_{ij}) + g_{ij}^0 + \eta_{ij} V_t \nabla t_{ij} - \eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right] \tag{5.31}$$

En este caso, para evitar una demanda futura negativa se tiene que:

$$\tau_u \chi_{ij} \leq \frac{g_{ij}^0 + \eta_{ij} V_t \nabla t_{ij} - \eta_{ij} \tau_{ij}^0}{\eta_{ij}} \quad \forall ij \in W \tag{5.31a}$$

Al descomponer la expresión 5.31 y simplificando su notación, se transforma en:

$$q_{ij}^1 = \xi_{ij}^c \tau_u + \beta_{ij} \quad \forall ij \in W \tag{5.32}$$

Donde: β_{ij} se calcula igual que en la ecuación 5.4b y;

$$\xi_{ij}^c = \alpha_{ij} \chi_{ij} = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij} \chi_{ij} \quad \text{Siendo cada } \xi_{ij}^c < 0 \tag{5.32a}$$

Empleando el mismo criterio de los anteriores esquemas tarifarios, se obtiene la expresión para calcular la pérdida de excedente de usuario que se produce entre el origen i y el destino j .

$$\nabla E u_{ij} = \frac{1}{2} (\theta_{ij}^c \tau_u^2 + \varphi_{ij}^c \tau_u + \delta_{ij}) \quad \forall ij \in W \quad (5.33)$$

Donde: δ_{ij} permanece igual que en la ecuación 5.5b y;

$$\theta_{ij}^c = \alpha_{ij} \chi_{ij}^2 = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij} \chi_{ij}^2 \quad \text{Siendo cada } \theta_{ij}^c < 0 \quad (5.33a)$$

Y,

$$\varphi_{ij}^c = 2\beta_{ij} \chi_{ij} = 2q_{ij}^0 \left(1 + \frac{\eta_{ij} v_t \nabla t_{ij}}{g_{ij}^0} - \frac{\eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \chi_{ij} \quad \text{Siendo cada } \varphi_{ij}^c > 0 \quad (5.33b)$$

Por consiguiente, la pérdida total de excedente de usuario en la red se evalúa como:

$$\nabla E u_T = \frac{1}{2} (\theta^c \tau_u^2 + \varphi^c \tau_u + \delta) \quad (5.34)$$

$$\text{Donde: } \theta^c = \sum_{ij \in W} \theta_{ij}^c, \quad \varphi^c = \sum_{ij \in W} \varphi_{ij}^c \quad \text{y} \quad \delta = \sum_{ij \in W} \delta_{ij}$$

Con respecto al recaudo bruto que se lograría entre el par O-D ij empleando este tipo de esquema tarifario, este se cuantifica como:

$$I_{ij} = \theta_{ij}^c \tau_u^2 + \gamma_{ij}^c \tau_u \quad \forall ij \in W \quad (5.35)$$

Donde:

$$\gamma_{ij}^c = \beta_{ij} \chi_{ij} = q_{ij}^0 \left[1 + \frac{\eta_{ij} v_t \nabla t_{ij}}{g_{ij}^0} - \frac{\eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right] \chi_{ij} \quad \text{Siendo cada } \gamma_{ij}^c > 0 \quad (5.35a)$$

Luego, los ingresos totales alcanzados con esta estructura tarifaria estarán dados por:

$$I_T = \theta^c \tau_u^2 + \gamma^c \tau_u \quad (5.36)$$

$$\text{Donde: } \gamma^c = \sum_{ij \in W} \gamma_{ij}^c$$

Análogamente al esquema tarifario anterior, en ausencia de restricciones los ingresos brutos totales I_T se maximizan si:

$$\tau_u^* = \frac{-\gamma^c}{2\theta^c} \quad (5.37)$$

En el caso de aplicar la tarifa (τ_u^*) que permite obtener los mayores ingresos, la demanda total se reduce a su valor mínimo y se cuantificaría través de la expresión:

$$Q_{\min} = \sum_{ij \in W} \xi_{ij}^c \tau_u^* + \sum_{ij \in W} \beta_{ij} = \xi^c \tau_u^* + \beta \quad \forall ij \in W \quad (5.38)$$

Donde: $\xi^c = \sum_{ij \in W} \xi_{ij}^c$

Ya que el objetivo del esquema tarifario es lograr un uso óptimo de la capacidad en la red de carreteras, se impone como restricción al modelo, que la demanda total sea superior o igual a la demanda mínima Q_{\min} , es decir:

$$Q = \sum_{ij \in W} q_{ij} = \xi^c \tau_u + \beta \geq Q_{\min} \quad \forall ij \in W \quad (5.39)$$

Al igual que en el caso anterior, la ecuación 5.40 presenta otras restricciones que debe cumplir el valor óptimo de la tarifa a encontrar con este esquema de tipo cóncavo:

$$\tau_{ij_{\min}} \leq \tau_u \chi_{ij} \leq \tau_{ij_{\max}} \quad \forall ij \in W \quad (5.40a)$$

$$\tau_u \chi_{\min} \geq \tau_{ij_{\min}}, \tau_u \chi_{\max} \leq \tau_{ij_{\max}} \quad \forall ij \in W \quad (5.40b)$$

$$\tau_{u_{\min}} \leq \tau_u \leq \tau_{u_{\max}} \quad \forall ij \in W \quad (5.40c)$$

$$\tau_{u_{\min}} \geq \frac{I_T^0}{\sum_{ij \in W} q_{ij}^0}, \tau_{u_{\max}} \leq \tau_u^* \quad \forall ij \in W \quad (5.40d)$$

Valorado el recaudo bruto total en el escenario futuro se determina la variación del excedente del productor como:

$$\Delta I_T = \theta^c \tau_u^2 + \gamma^c \tau_u - I_T^0 \quad (5.41)$$

Luego la variación total de bienestar social que se produce al implantarse este sistema tarifario se determina así:

$$\Delta BS_T = \frac{1}{2} (\theta^c \tau_u^2 - \delta) - I_T^0 \quad (5.42)$$

Sin tener en cuenta ninguna restricción, el valor máximo que se obtendría para este cambio de bienestar social se produce cuando la tarifa unitaria es:

$$\tau_u^* = \frac{\Psi_T^c}{2\theta^c} \quad (5.42a)$$

Resumiendo, la tabla 5.3 muestra la metodología usada para obtener cada una de las variaciones que se producen en los indicadores establecidos con respecto al escenario base al implantar una estructura tarifaria de tipo cóncavo y basada en la distancia del viaje.

Nótese que para alcanzar los mismos objetivos planteados en este estudio, las tarifas unitarias de las funciones lineal y cóncava deben ser distintas. Sin embargo, estas diferencias son insignificantes en distancias cortas para los diversos pares O-D de la red.

Tabla 5.3. Metodología para evaluar los cambios en diferentes indicadores al implantarse un esquema con tarifa kilométrica cóncava.

Indicador a evaluar	Modelación	Parámetros
Demanda futura entre un par O-D,	$q_{ij}^1 = \xi_{ij}^c \tau_u + \beta_{ij} \quad \forall ij \in W$	$g_{ij}^0 = f_{ij}^0 + v_i t_{ij}^0 + \tau_{ij}^0 \quad I_T^0 = \sum_{ij \in W} q_{ij}^0 \tau_{ij}^0$
Demanda futura total en la red	$Q_T^1 = \sum_{ij \in W} q_{ij}^1 = \xi^c \tau_u + \beta \geq Q_{\min}$	$\chi_{ij} = x_{ij}^m e^{x_{ij} \ln^2 n} \quad \eta_{ij} = \varepsilon \chi_{ij}^b$
Variación del excedente de usuario entre un par O-D,	$\nabla E u_{ij} = \frac{1}{2} (\theta_{ij}^c \tau_u^2 + \varphi_{ij}^c \tau_u + \delta_{ij}) \quad \forall ij \in W$	$\xi_{ij}^c = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij} \chi_{ij} \quad ; \quad \xi^c = \sum_{ij \in W} \xi_{ij}^c$
Variación del excedente de usuario total en la red	$\nabla E u_T = \frac{1}{2} [\theta^c \tau_u^2 + \varphi^c \tau_u + \delta]$	$\beta_{ij} = q_{ij}^0 \left[1 + \eta_{ij} v_i \nabla t_{ij} / g_{ij}^0 - \eta_{ij} \tau_{ij}^0 / g_{ij}^0 \right] \quad ; \quad \beta = \sum_{ij \in W} \beta_{ij}$
Recaudo bruto entre un par O-D,	$I_{ij} = \theta_{ij}^c \tau_u^2 + \gamma_{ij}^c \tau_u \quad \forall ij \in W$	$\varphi_{ij}^c = 2 \beta_{ij} \chi_{ij} \quad ; \quad \varphi^c = \sum_{ij \in W} \varphi_{ij}^c$
Recaudo bruto total en la red	$I_T = \theta^c \tau_u^2 + \gamma^c \tau_u$	$\delta_{ij} = (v_i \nabla t_{ij} - \tau_{ij}^0) q_{ij}^0 \left(2 + \eta_{ij} v_i \nabla t_{ij} / g_{ij}^0 - \eta_{ij} \tau_{ij}^0 / g_{ij}^0 \right) \quad ; \quad \delta = \sum_{ij \in W} \delta_{ij}$
Tarifa promedio para toda la red	$\tau_p^1 = \frac{I_T^1}{Q_T^1}$	$\theta_{ij}^c = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij} \chi_{ij}^2 \quad ; \quad \theta^c = \sum_{ij \in W} \theta_{ij}^c \quad \gamma_{ij}^c = \beta_{ij} \chi_{ij} \quad ; \quad \gamma^c = \sum_{ij \in W} \gamma_{ij}^c$
Tarifa unitaria media para toda la red	$\tau_{um}^1 = \frac{1}{Q_T^1} \sum_{ij} \frac{q_{ij}^1 \tau_u \chi_{ij}}{l_{ij}}$	$Q_{\min} = \sum_{ij \in W} q_{ij}^1 = \sum_{ij \in W} \xi_{ij}^c \tau_u^* + \sum_{ij \in W} \beta_{ij} \quad ; \quad \tau_u^* = -\gamma^c / 2\theta^c$
Variación del excedente del productor total en la red	$\Delta I_T = \theta^c \tau_u^2 + \gamma^c \tau_u - I_T^0$	$\tau_{ij_{\min}} \leq \tau_u \chi_{ij} < \tau_{ij_{\max}} \quad ; \quad \tau_{u_{\min}} \leq \tau_u < \tau_{u_{\max}}$
Variación del bienestar social total en la red	$\Delta B S_T = \frac{1}{2} (\theta^c \tau_u^2 - \delta) - I_T^0$	$\tau_{u_{\min}} \geq \sum_{ij \in W} \frac{I_T^0}{q_{ij}^0} \quad ; \quad \tau_{u_{\max}} \leq \tau_u^*$

5.4 Tarifa de entrada más kilométrica

Este esquema forma parte de los sistemas complejos de tarificación ya que está compuesto por dos tarifas (*two part charges*). La primera consiste en una tarifa $\tau_e(k)$ (€/veh) 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. La segunda tarifa corresponde a una estructura que depende de la distancia del viaje y del tipo de vehículo ($\tau_u(k) x_{ij}$) y puede ser de tipo lineal o cóncavo. En esta tesis se escoge la kilométrica de tipo lineal.

Entonces, si convertimos todos los vehículos a livianos equivalentes, el esquema tarifario a estudiar entre un par O-D $ij \in \mathcal{W}$ viene dado por la estructura expresada como:

$$\tau_{ij}^1 = \tau_e + \tau_u x_{ij} \quad (5.43)$$

Donde: τ_e es la tarifa de entrada (€/veh), τ_u (€/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 $ij \in \mathcal{W}$. Este tipo de sistema tarifario se representa mediante la figura 5.5.

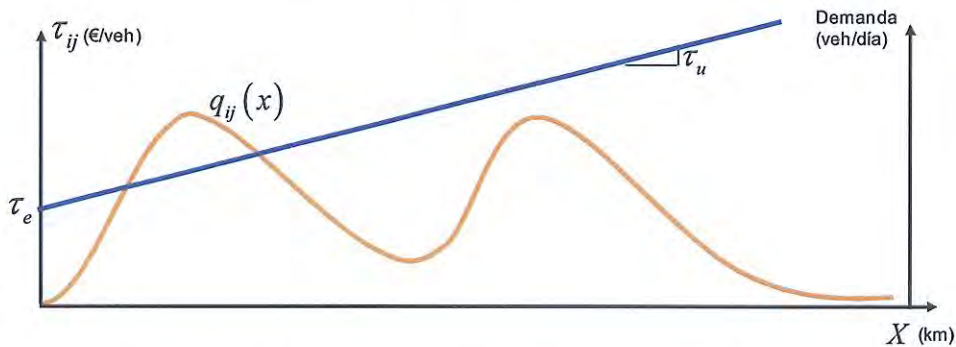


Fig. 5.5. Tarifa de entrada más tarifa kilométrica de tipo lineal.

Este tipo de esquema tarifario presenta las siguientes ventajas:

- Es escalable a posibles extensiones de la red;
- Es simple y fácil de entender e implantar con la ayuda de ETC;
- Controla los viajes cortos recorridos y permite valorar los viajes de mayor distancia;
- Las tarifas pueden variar según la dirección, tipo de vehículo y según la hora del viaje.

La demanda esperada en el escenario futuro entre el par O-D ij al aplicarse el esquema tarifario formulado en 5.43, viene dada por:

$$q_{ij}^1 = q_{ij}^0 \left[\frac{\eta_{ij} (\tau_e + \tau_u x_{ij}) + g_{ij}^0 + \eta_{ij} v_t \nabla t_{ij} - \eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right] \quad (5.44)$$

Para evitar una demanda futura negativa al implantarse este esquema, se debe cumplir que:

$$\tau_e + \tau_u x_{ij} \leq \frac{g_{ij}^0 + \eta_{ij} v_t \nabla t_{ij} - \eta_{ij} \tau_{ij}^0}{\eta_{ij}} \quad \forall ij \in \mathcal{W} \quad (5.44a)$$

Reduciendo la expresión 5.44 a su mínima expresión se obtiene que:

$$q_{ij}^1 = \alpha_{ij}\tau_e + \xi_{ij}\tau_u + \beta_{ij} \quad \forall ij \in W \quad (5.45)$$

Donde: α_{ij} , ξ_{ij} y β_{ij} se calculan de forma semejante con las ecuaciones 5.4a, 5.17a y 5.4b, respectivamente.

En cuanto a la cuantificación de la pérdida de excedente de usuario que se produce entre el origen i y el destino j , esta se valora a través de:

$$\nabla Eu_{ij} = \frac{1}{2}(\alpha_{ij}\tau_e^2 + \xi_{ij}2\tau_e\tau_u + \theta_{ij}\tau_u^2 + \rho_{ij}\tau_e + \varphi_{ij}\tau_u + \delta_{ij}) \quad \forall ij \in W \quad (5.46)$$

Donde: θ_{ij} , ρ_{ij} , φ_{ij} y δ_{ij} se estiman mediante las ecuaciones 5.18a, 5.5a; 5.18b, 5.5b, respectivamente.

Al sumar cada uno de las pérdidas de excedente de usuario de los diversos pares O-D de la red, se obtiene que la pérdida total es:

$$\nabla Eu_T = \frac{1}{2}(\alpha\tau_e^2 + \xi2\tau_e\tau_u + \theta\tau_u^2 + \rho\tau_e + \varphi\tau_u + \delta) \quad (5.47)$$

Donde: $\alpha = \sum_{ij \in W} \alpha_{ij}$, $\xi = \sum_{ij \in W} \xi_{ij}$, $\theta = \sum_{ij \in W} \theta_{ij}$, $\rho = \sum_{ij \in W} \rho_{ij}$, $\varphi = \sum_{ij \in W} \varphi_{ij}$, y $\delta = \sum_{ij \in W} \delta_{ij}$.

Por otro lado, el recaudo bruto que se captaría entre el par O-D ij al instaurarse este esquema tarifario combinado, estaría dado por:

$$I_{ij} = \alpha_{ij}\tau_e^2 + \xi_{ij}2\tau_e\tau_u + \theta_{ij}\tau_u^2 + \beta_{ij}\tau_e + \gamma_{ij}\tau_u \quad \forall ij \in W \quad (5.48)$$

Donde γ_{ij} se estima mediante la ya formulada ecuación 5.20a.

Luego el recaudo bruto total que se obtiene al sumar los ingresos captados de los diferentes pares O-D de la red se estima a través de la expresión:

$$I_T = \alpha\tau_e^2 + \xi2\tau_e\tau_u + \theta\tau_u^2 + \beta\tau_e + \gamma\tau_u \quad (5.49)$$

Donde: $\gamma = \sum_{ij \in W} \gamma_{ij}$.

De la misma manera que en los casos anteriores, la función 5.49 es cuadrática y se puede formular con la ayuda de matrices de la forma:

$$I_T = \mathbf{U}'\mathbf{V}\mathbf{U} + \mathbf{U}'\mathbf{Z} \quad (5.50)$$

Donde: U' es la matriz transpuesta de U y;

$$U = \begin{pmatrix} \tau_e \\ \tau_u \end{pmatrix} \quad (5.50a)$$

$$V = \begin{pmatrix} \alpha & \xi \\ \xi & \theta \end{pmatrix} \quad (5.50b)$$

Y,

$$Z = \begin{pmatrix} \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \quad (5.50c)$$

En ausencia de restricciones los ingresos totales se maximizan igualando el gradiente de I_T a cero, es decir:

$$\frac{\partial I_T}{\partial U} = \begin{pmatrix} \partial I_T / \partial \tau_e \\ \partial I_T / \partial \tau_u \end{pmatrix} = 0, \text{ por lo tanto al derivar dicha expresión con respecto a } \tau_e \text{ y } \tau_u \text{ se}$$

obtiene que: $\partial I_T / \partial U = 2VU + Z = 0$, luego:

$$U^* = \begin{pmatrix} \tau_e^* \\ \tau_u^* \end{pmatrix} = -\frac{1}{2} V^{-1} Z \quad (5.51)$$

Donde: V^{-1} es la función inversa de la matriz V y en este caso por ser una matriz cuadrada su valor estará dado por:

$$V^{-1} = \frac{1}{\alpha\theta - \xi^2} \begin{pmatrix} \theta & -\xi \\ -\xi & \alpha \end{pmatrix} \quad (5.51a)$$

Al reemplazar 5.54a en 5.54 se obtienen los valores de τ_e^* y τ_u^* , respectivamente. Es decir:

$$\tau_e^* = \frac{\xi\gamma - \theta\beta}{2(\alpha\theta - \xi^2)} \quad (5.51a)$$

Y,

$$\tau_u^* = \frac{\xi\beta - \alpha\gamma}{2(\alpha\theta - \xi^2)} \quad (5.51b)$$

En el momento de aplicar la pareja de tarifas (τ_e^*, τ_u^*) , la demanda total se reduce a su valor mínimo, estimándose mediante la ecuación:

$$Q_{\min} = \alpha\tau_e^* + \xi\tau_u^* + \beta \quad \forall ij \in W \quad (5.52)$$

Ya que se busca lograr un uso óptimo de la capacidad viaria en toda la red, se requiere que las tarifas (τ_e, τ_u) óptimas reduzcan la demanda total hasta un nivel superior o igual en el peor de los casos, a la demanda mínima Q_{\min} , es decir:

$$Q = \sum_{ij \in W} q_{ij} = \alpha\tau_e + \xi\tau_u + \beta \geq Q_{\min} \quad \forall ij \in W \quad (5.53)$$

Los otros tipos de restricciones que debe cumplir la pareja de tarifas óptimas (τ_e, τ_u) se resume en las expresiones:

$$\tau_{ij_{\min}} \leq \tau_e + \tau_u x_{ij} \leq \tau_{ij_{\max}} \quad \forall ij \in W \quad (5.54)$$

$$\tau_e + \tau_u x_{\min} \geq \tau_{ij_{\min}} \text{ ,y, } \tau_e + \tau_u x_{\max} \leq \tau_{ij_{\max}} \quad \forall ij \in W \quad (5.54a)$$

$$\tau_{e_{\min}} \leq \tau_e \leq \tau_{e_{\max}} \text{ ,y, } \tau_{u_{\min}} \leq \tau_u \leq \tau_{u_{\max}} \quad \forall ij \in W \quad (5.54b)$$

Donde: $(\tau_{e_{\min}}, \tau_{u_{\min}})$ se establecen de tal forma que se garantice el ingreso inicial total I_T^0 para cubrir gastos de financiación de la infraestructura y $(\tau_{e_{\max}}, \tau_{u_{\max}})$ se limitan con la obtención de una demanda total que supere el valor mínimo como se mencionó en la restricción 5.53.

Cuantificado el recaudo bruto total futuro, se determina la variación del excedente del productor a través de la formulación:

$$\Delta I_T = \alpha\tau_e^2 + \xi 2\tau_e\tau_u + \theta\tau_u^2 + \beta\tau_e + \gamma\tau_u - I_T^0 \quad (5.55)$$

Por ende, el cambio del bienestar social que se produce al implantarse este sistema tarifario, se determina como:

$$\Delta B_{S_T} = \frac{1}{2}(\alpha\tau_e^2 + \theta\tau_u^2 - \delta) + \xi\tau_e\tau_u - I_T^0 \quad (5.56)$$

La solución a esta ecuación cuadrática 5.56 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) , las cuales son cribadas para escoger aquellos valores prácticos (c€/veh y c€/veh-km).

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 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,

es decir,
$$\frac{\partial(\Delta Bs_T)}{\partial U} = \begin{pmatrix} \frac{\partial(\Delta Bs_T)}{\partial \tau_e} \\ \frac{\partial(\Delta Bs_T)}{\partial \tau_u} \end{pmatrix} = 0$$
, por lo tanto al derivarse esta expresión con

respecto a τ_e y τ_u se obtiene que:

$$\frac{\partial(\Delta Bs_T)}{\partial U} = \tau_e^\otimes (\alpha + \xi) + \tau_u^\otimes (\theta + \xi) = 0 \tag{5.57}$$

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.

La tabla 5.4 muestra en resumen la metodología que cuantifica los cambios en los indicadores establecidos con respecto al escenario base al implantar un esquema tarifario compuesto de dos tarifas.

Tabla 5.4. Metodología para evaluar los cambios en diferentes indicadores al implantarse un esquema con tarifa de entrada y kilométrica lineal.

Indicador a evaluar	Modelación	Parámetros
Demanda futura entre un par O-D,	$q_{ij}^1 = \alpha_{ij}\tau_e + \xi_{ij}\tau_u + \beta_{ij} \quad \forall ij \in W$	$g_{ij}^0 = f_{ij}^0 + v_{ij}t_{ij}^0 + \tau_{ij}^0 ; I_T^0 = \sum_{ij \in W} q_{ij}^0 \tau_{ij}^0$
Demanda futura total en la red	$Q_T^1 = \sum_{ij \in W} q_{ij}^1 = \alpha \tau_e + \xi \tau_u + \beta \geq Q_{min}$	$\alpha_{ij} = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij} ; \alpha = \sum_{ij \in W} \alpha_{ij} \quad \eta_{ij} = \varepsilon x_{ij}^0$
Variación del excedente de usuario entre un par O-D, $\forall ij \in W$	$\nabla Eu_{ij} = \frac{1}{2} (\alpha_{ij}\tau_e^2 + \xi_{ij}2\tau_e\tau_u + \theta_{ij}\tau_u^2 + \rho_{ij}\tau_e + \varphi_{ij}\tau_u + \delta_{ij})$	$\xi_{ij} = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij} x_{ij} ; \xi = \sum_{ij \in W} \xi_{ij}$
Variación del excedente de usuario total en la red	$\nabla Eu_T = \frac{1}{2} [\alpha \tau_e^2 + \xi 2\tau_e\tau_u + \theta \tau_u^2 + \rho \tau_e + \varphi \tau_u + \delta]$	$\beta_{ij} = q_{ij}^0 \left[1 + \eta_{ij} v_{ij} \frac{\nabla t_{ij}}{g_{ij}^0} - \frac{\eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right] ; \beta = \sum_{ij \in W} \beta_{ij}$
Recaudo bruto entre un par O-D, $\forall ij \in W$	$I_{ij} = \alpha_{ij}\tau_e^2 + \xi_{ij}2\tau_e\tau_u + \theta_{ij}\tau_u^2 + \beta_{ij}\tau_e + \gamma_{ij}\tau_u$	$\varphi_{ij} = 2\beta_{ij}x_{ij} ; \varphi = \sum_{ij \in W} \varphi_{ij}$
Recaudo bruto total en la red	$I_T = \alpha \tau_e^2 + \xi 2\tau_e\tau_u + \theta \tau_u^2 + \beta \tau_e + \gamma \tau_u$	$\delta_{ij} = (v_{ij} \nabla t_{ij} - \tau_{ij}^0) q_{ij}^0 \left(2 + \eta_{ij} v_{ij} \frac{\nabla t_{ij}}{g_{ij}^0} - \frac{\eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) ; \delta = \sum_{ij \in W} \delta_{ij}$
Tarifa promedio para toda la red	$\tau_p^1 = \frac{I_T}{Q_T^1}$	$\theta_{ij} = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij} x_{ij}^2 ; \theta = \sum_{ij \in W} \theta_{ij}$
Tarifa unitaria media para toda la red	$\tau_{um}^1 = \frac{1}{Q_T^1} \sum_{ij \in W} \frac{q_{ij}^1 (\tau_e + \tau_u l_{ij})}{l_{ij}}$	$\gamma_{ij} = \beta_{ij} x_{ij} ; \gamma = \sum_{ij \in W} \gamma_{ij}$
Variación del excedente del productor total en la red	$\Delta I_T = \alpha \tau_e^2 + \xi 2\tau_e\tau_u + \theta \tau_u^2 + \beta \tau_e + \gamma \tau_u - I_T^0$	$Q_{min} = \alpha \tau_e^* + \xi \tau_u^* + \beta ; \tau_e^* = \frac{\xi \gamma - \theta \beta}{2(\alpha \theta - \xi^2)} ; \tau_u^* = \frac{\xi \beta - \alpha \gamma}{2(\alpha \theta - \xi^2)}$
Variación del bienestar social total en la red $\forall ij \in W$	$\Delta Bs_T = \frac{1}{2} (\alpha \tau_e^2 + \theta \tau_u^2 - \delta) + \xi \tau_e \tau_u - I_T^0$	$\tau_{ij_{min}} \leq \tau_e + \tau_u x_{ij} \leq \tau_{ij_{max}} ; \tau_{e_{min}} \leq \tau_e \leq \tau_{e_{max}}$ $\tau_{u_{min}} \leq \tau_u \leq \tau_{u_{max}}$

Se pueden establecer múltiples combinaciones entre los valores de τ_e y τ_u de tal forma que se garanticen tanto el ingreso inicial total I_T^0 como un nivel de servicio apropiado (de acuerdo con el nivel de tráfico que se quiera reducir en la red).

5.5 Tarifa plana en una zona cubierta por un cordón más kilométrica

Al igual que el esquema anterior este tipo de estructuras se clasifican dentro de los sistemas complejos de tarifación al estar compuestos por dos tipos de tarifas. La primera está constituida por una tarifa plana $\tau_f(k)$ en (€/veh) la cual sería pagada por el usuario por acceder a una zona que está limitada con un cordón o un área de la ciudad generalmente el *Central Business District* –CBD. En este tipo de estructuras tarifarias la topología viaria de la zona de estudio juega un papel fundamental para definir el perímetro del cordón.

El precio a pagar con esta tarifa plana depende del tipo de vehículo y el sentido del flujo y básicamente, busca cumplir con dos razones: (i) garantizar que el operador ofrezca un nivel de calidad mínimo (confiabilidad en tiempo de viaje, seguridad, mantenimiento de la vía para unas condiciones de confort en la conducción, etc.) el cual se mantiene en todas las vías de la zona tarifada y (ii) controlar los viajes que recorren hasta una distancia $x_{c_{ij}}$ que en el caso de vías radiales corresponde a la distancia óptima que logra disuadir la mayor cantidad de viajes con trayectos cortos generadores de congestión. En otros casos, se usan las rondas orbitales que rodean la ciudad como perímetro del cordón, estableciéndose un valor variable de $x_{c_{ij}}$ dependiendo de la ruta que tenga como zona origen o zona destino el área cubierta por el cordón. Superada la distancia $x_{c_{ij}}$ se cobra una tarifa en función del número de kilómetros por uso de la red de autopistas, tal como se muestra en la figura 5.6.

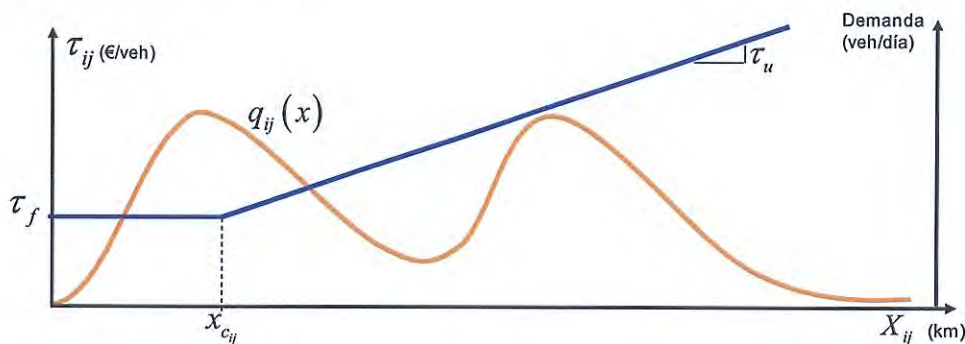


Fig. 5.6. Estructura tarifaria compuesta por una tarifa plana y una kilométrica de tipo lineal.

Este tipo de modelo presenta las siguientes ventajas:

- Es escalable a posibles extensiones de la red;
- Es simple y similar al modelo con tarifa de entrada más kilométrica, requiere el uso de sistemas de cobro ETC;

- Se adapta fácilmente a los patrones de movilidad inicial;
- Es fácil de entender para los usuarios;
- Reduce la generación de viajes cortos en la zona del cordón;
- Valora los viajes de largo recorrido sobre la red de autopistas.

El inconveniente que presenta es que depende de la configuración topológica de la red, lo cual puede desequilibrar algunos tramos generando congestión en algunos sectores.

Por lo tanto, la estructura tarifaria para este tipo de esquemas entre un par O-D $ij \in W$ viene dada por la ecuación 5.58.

$$\begin{aligned} \tau_{ij}^1 &= \tau_f & \text{Si } 0 < x_{ij} \leq x_c ; \forall ij \in W \\ \tau_{ij}^1 &= \tau_f + \tau_u (x_{ij} - x_c) & \text{Si } x_{ij} > x_c ; \forall ij \in W \end{aligned} \quad (5.58)$$

Es de notar que el valor de x_c depende del tamaño del cordón y de la cantidad de tráfico que se quiera disuadir en esa zona de mayor congestión.

Dado que el ámbito de aplicación para esta Tesis son los entornos metropolitanos (aunque también es aplicable a entornos urbanos), en esta parte se estudia los viajes que superan la distancia x_c . Esto quiere decir que $\forall x_{ij} > x_c > 0$ la demanda futura que se espera obtener entre el origen i y el destino j , estaría dada por:

$$q_{ij}^1 = q_{ij}^0 \left[\frac{\eta_{ij} [\tau_f + \tau_u (x_{ij} - x_c)] + g_{ij}^0 + \eta_{ij} v_t \nabla t_{ij} - \eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right] \quad (5.59)$$

En este caso, para evitar una demanda futura negativa se tiene que:

$$\tau_{ij}^1 = \tau_f + \tau_u (x_{ij} - x_c) \leq \frac{g_{ij}^0 + \eta_{ij} v_t \nabla t_{ij} - \eta_{ij} \tau_{ij}^0}{\eta_{ij}} \quad \text{Si } x_{ij} > x_c ; \forall ij \in W \quad (5.60)$$

Al descomponer la expresión 5.59, es posible simplificarla de la forma:

$$q_{ij}^1 = \alpha_{ij} \tau_f + \xi'_{ij} \tau_u + \beta_{ij} \quad \forall ij \in W \quad (5.61)$$

Donde: α_{ij} , y β_{ij} se calculan empleando las ecuaciones 5.4a, y 5.4b, respectivamente, y;

$$\xi'_{ij} = \alpha_{ij} (x_{ij} - x_c) = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij} (x_{ij} - x_c) \quad \text{Siendo cada } \xi'_{ij} < 0 \quad (5.61a)$$

También, al instituir este esquema tarifario se da una pérdida de excedente de usuario entre cada par O-D ij de la red. Dicha pérdida se estima empleando la expresión:

$$\nabla Eu_{ij} = \frac{1}{2} \left(\alpha_{ij} \tau_f^2 + \xi'_{ij} 2\tau_f \tau_u + \theta'_{ij} \tau_u^2 + \rho_{ij} \tau_f + \varphi'_{ij} \tau_u + \delta_{ij} \right) \quad (5.62)$$

Donde: ρ_{ij} , y δ_{ij} se determinan usando las expresiones 5.5a y 5.18b, respectivamente, y;

$$\theta'_{ij} = \alpha_{ij} (x_{ij} - x_c)^2 = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij} (x_{ij} - x_c)^2 \quad \text{Siendo cada } \theta'_{ij} < 0 \quad (5.62a)$$

$$\varphi'_{ij} = \rho_{ij} (x_{ij} - x_c) = 2\beta_{ij} (x_{ij} - x_c) \quad \text{Siendo cada } \varphi'_{ij} < 0 \quad (5.62b)$$

Por lo tanto, al sumar cada una de las pérdidas de excedente de usuario para toda la red, se tiene que la el cambio total estaría dado por:

$$\nabla Eu_T = \frac{1}{2} \left(\alpha \tau_f^2 + \xi' 2\tau_f \tau_u + \theta' \tau_u^2 + \rho \tau_f + \varphi' \tau_u + \delta \right) \quad (5.63)$$

Donde: $\alpha = \sum_{ij \in W} \alpha_{ij}$, $\xi' = \sum_{ij \in W} \xi'_{ij}$, $\theta' = \sum_{ij \in W} \theta'_{ij}$, $\rho = \sum_{ij \in W} \rho_{ij}$, $\varphi' = \sum_{ij \in W} \varphi'_{ij}$, y $\delta = \sum_{ij \in W} \delta_{ij}$.

En cuanto al recaudo bruto que se adquiere entre el par O-D ij al implantarse este esquema tarifario combinado estaría dado por:

$$I_{ij} = \alpha_{ij} \tau_f^2 + \xi'_{ij} 2\tau_f \tau_u + \theta'_{ij} \tau_u^2 + \beta_{ij} \tau_f + \gamma'_{ij} \tau_u \quad \forall ij \in W \quad (5.64)$$

Donde:

$$\gamma'_{ij} = \beta_{ij} (x_{ij} - x_c) \quad \text{Siendo cada } \gamma'_{ij} < 0 \quad (5.64a)$$

Inmediatamente, el recaudo bruto total que se obtiene al sumar el ingreso percibido entre cada uno de los pares O-D de la red, se cuantifica como:

$$I_T = \alpha \tau_f^2 + \xi' 2\tau_f \tau_u + \theta' \tau_u^2 + \beta \tau_f + \gamma' \tau_u \quad (5.65)$$

Donde: $\gamma' = \sum_{ij \in W} \gamma'_{ij}$.

Tal como se hizo para la estructura tarifaria anterior, la función 5.65 es cuadrática y se puede formular empleando matrices y se transforma en:

$$I_T = \mathbf{U}' \mathbf{V} \mathbf{U} + \mathbf{U}' \mathbf{Z} \quad (5.66)$$

Donde: \mathbf{U}' es la matriz transpuesta de \mathbf{U} y;

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \tau_f \\ \tau_u \end{pmatrix} \quad (5.66a)$$

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \alpha & \xi' \\ \xi' & \theta \end{pmatrix} \quad (5.66b)$$

Y,

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} \beta \\ \gamma' \end{pmatrix} \quad (5.66c)$$

Sin tener en cuenta ninguna restricción, el recaudo total se maximiza cuando la derivada de I_T se iguala a cero, es decir:

$$\frac{\partial I_T}{\partial \mathbf{U}} = \begin{pmatrix} \partial I_T / \partial \tau_f \\ \partial I_T / \partial \tau_u \end{pmatrix} = 0, \text{ por lo tanto al derivar dicha expresión con respecto a } \tau_f \text{ y } \tau_u \text{ se}$$

obtiene que: $\partial I_T / \partial \mathbf{U} = 2\mathbf{V}\mathbf{U} + \mathbf{Z} = 0$, luego:

$$\mathbf{U}^* = \begin{pmatrix} \tau_f^* \\ \tau_u^* \end{pmatrix} = -\frac{1}{2} \mathbf{V}^{-1} \mathbf{Z} \quad (5.67)$$

Donde: \mathbf{V}^{-1} es la función inversa de la matriz \mathbf{V} y en este caso por ser una matriz cuadrada su valor estará dado por:

$$\mathbf{V}^{-1} = \frac{1}{\alpha\theta' - \xi'^2} \begin{pmatrix} \theta' & -\xi' \\ -\xi' & \alpha \end{pmatrix} \quad (5.67a)$$

Al reemplazar 5.67a en 5.67 se obtienen los valores de τ_f^* y τ_u^* , respectivamente. Es decir:

$$\tau_f^* = \frac{\xi' \gamma' - \theta' \beta}{2(\alpha\theta' - \xi'^2)} \quad (5.68a)$$

Y,

$$\tau_u^* = \frac{\xi' \beta - \alpha \gamma'}{2(\alpha\theta' - \xi'^2)} \quad (5.68b)$$

En el momento de cobrar la pareja de tarifas (τ_f^*, τ_u^*) , la demanda total se reduce a su valor mínimo, la cual se cuantifica mediante la expresión:

$$Q_{\min} = \alpha \tau_f^* + \xi' \tau_u^* + \beta \quad \forall ij \in W \quad (5.69)$$

Al plantearse como objetivo dar un uso eficiente de la capacidad viaria de toda la red, se requiere que el par de tarifas (τ_f, τ_u) sean optimizadas y reduzcan la demanda total hasta un nivel superior o igual a la demanda mínima Q_{\min} , es decir que:

$$Q = \alpha \tau_f + \xi' \tau_u + \beta \geq Q_{\min} \quad \forall ij \in W \quad (5.70)$$

Los otros tipos de restricciones que debe cumplir la pareja de tarifas óptimas (τ_f, τ_u) se resume en las expresiones:

$$\tau_{ij_{\min}} \leq \tau_f + \tau_u (x_{ij} - x_c) \leq \tau_{ij_{\max}} \quad \forall ij \in W \quad (5.71)$$

$$\tau_f + \tau_u (x_{ij} - x_c)_{\min} \geq \tau_{ij_{\min}}, y, \tau_f + \tau_u (x_{ij} - x_c)_{\max} \leq \tau_{ij_{\max}} \quad \forall ij \in W \quad (5.71a)$$

$$\tau_{f_{\min}} \leq \tau_f \leq \tau_{f_{\max}}, y, \tau_{u_{\min}} \leq \tau_u \leq \tau_{u_{\max}} \quad \forall ij \in W \quad (5.71b)$$

Donde: $(\tau_{f_{\min}}, \tau_{u_{\min}})$ se establecen de tal forma que se garantice el ingreso inicial total I_T^0 para cubrir gastos de financiación de la infraestructura y $(\tau_{f_{\max}}, \tau_{u_{\max}})$ se limitan con la obtención de una demanda total que supere el valor mínimo como se mencionó en la restricción 5.70.

Cuantificado el recaudo bruto total futuro se determina el cambio del excedente del productor a través de la expresión:

$$\Delta I_T = \alpha \tau_f^2 + \xi' 2\tau_f \tau_u + \theta' \tau_u^2 + \beta \tau_f + \gamma' \tau_u - I_T^0 \quad (5.72)$$

Por lo tanto, el cambio del bienestar social que se produce al implantarse este sistema tarifario se valora como:

$$\Delta BS_T = \frac{1}{2} (\alpha \tau_f^2 + \theta' \tau_u^2 - Z_T \tau_f - \Psi_T' \tau_u - \delta + Y_T) + \xi' \tau_f \tau_u - I_T^0 \quad (5.73)$$

Al igual que en la estructura tarifaria anterior, la solución a la ecuación cuadrática 5.73 que determina la magnitud de la variación de bienestar cuando se produce una reducción de tráfico se logra estableciendo infinitas combinaciones del par de tarifas (τ_f, τ_u) , las cuales son filtradas para escoger aquellos valores prácticos (c€/veh y c€/veh-km).

Para estipular 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 que producen 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_f, τ_u) .

Encontrados los parámetros generales y sin considerar ningún tipo de restricción, la máxima variación del bienestar social se obtiene cuando el gradiente de ΔBs_T es cero,

es decir,
$$\frac{\partial(\Delta Bs_T)}{\partial U} = \begin{pmatrix} \frac{\partial(\Delta Bs_T)}{\partial \tau_f} \\ \frac{\partial(\Delta Bs_T)}{\partial \tau_u} \end{pmatrix} = 0$$
, por lo tanto al derivarse esta expresión con

respecto a τ_f y τ_u se obtiene que:

$$\frac{\partial(\Delta Bs_T)}{\partial U} = \tau_f^\otimes (\alpha + \xi) + \tau_u^\otimes (\theta + \xi) = 0 \tag{5.74}$$

La primera derivada del cambio en el bienestar respecto al par de tarifas (τ_f, 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_f, τ_u, z) , donde z corresponde a la máxima magnitud del cambio en el bienestar.

Tabla 5.5. Metodología para evaluar los cambios en diferentes indicadores al implantarse un esquema combinado con tarifas plana y kilométrica lineal.

Indicador a evaluar	Modelación	Parámetros
Demanda futura entre un par O-D,	$q_{ij}^1 = \alpha_{ij} \tau_f + \xi_{ij} \tau_u + \beta_{ij} \quad \forall ij \in W$	$g_{ij}^0 = f_{ij}^0 + v_{ij} \tau_{ij}^0 + \tau_{ij}^0 ; \quad I_T^0 = \sum_{ij \in W} q_{ij}^0 \tau_{ij}^0$
Demanda futura total en la red	$Q_T^1 = \sum_{ij \in W} q_{ij}^1 = \alpha \tau_f + \xi \tau_u + \beta \geq Q_{min}$	$\alpha_{ij} = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij} ; \quad \alpha = \sum_{ij \in W} \alpha_{ij} \quad \eta_{ij} = \varepsilon x_{ij}^d$
Variación del excedente de usuario entre un par O-D, $\forall ij \in W$	$\nabla Eu_{ij} = \frac{1}{2} (\alpha_{ij} \tau_f^2 + \xi_{ij}^2 2 \tau_f \tau_u + \theta_{ij} \tau_u^2 + \rho_{ij} \tau_f + \varphi_{ij} \tau_u + \delta_{ij})$	$\xi_{ij} = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij} (x_{ij} - x_c) ; \quad \xi' = \sum_{ij \in W} \xi_{ij}'$
Variación del excedente de usuario total en la red	$\nabla Eu_T = \frac{1}{2} [\alpha \tau_f^2 + \xi^2 2 \tau_f \tau_u + \theta \tau_u^2 + \rho \tau_f + \varphi \tau_u + \delta]$	$\beta_{ij} = q_{ij}^0 \left[1 + \frac{\eta_{ij} v_{ij} \nabla \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} - \frac{\eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right] ; \quad \beta = \sum_{ij \in W} \beta_{ij}$
Recaudo bruto entre un par O-D, $\forall ij \in W$	$I_{ij} = \alpha_{ij} \tau_f^2 + \xi_{ij} 2 \tau_f \tau_u + \theta_{ij} \tau_u^2 + \beta_{ij} \tau_f + \gamma_{ij} \tau_u$	$\varphi_{ij}' = 2 \beta_{ij} (x_{ij} - x_c) ; \quad \varphi' = \sum_{ij \in W} \varphi_{ij}'$
Recaudo bruto total en la red	$I_T = \alpha \tau_f^2 + \xi^2 2 \tau_f \tau_u + \theta \tau_u^2 + \beta \tau_f + \gamma \tau_u$	$\delta_{ij} = (v_{ij} \nabla \tau_{ij}^0 - \tau_{ij}^0) q_{ij}^0 \left(2 + \frac{\eta_{ij} v_{ij} \nabla \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} - \frac{\eta_{ij} \tau_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) ; \quad \delta = \sum_{ij \in W} \delta_{ij}$
Tarifa promedio para toda la red	$\tau_p^1 = \frac{I_T^1}{Q_T^1}$	$\theta_{ij} = \left(\frac{q_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right) \eta_{ij} (x_{ij} - x_c)^2 ; \quad \theta = \sum_{ij \in W} \theta_{ij}$
Tarifa unitaria media para toda la red	$\tau_{um}^1 = \frac{1}{Q_T^1} \sum_{ij \in W} \frac{q_{ij}^1 [\tau_f + \tau_u (l_{ij} - x_c)]}{l_{ij}}$	$\gamma_{ij}' = \beta_{ij} (x_{ij} - x_c) ; \quad \gamma' = \sum_{ij \in W} \gamma_{ij}'$
Variación del excedente del productor total en la red	$\Delta M_T = \alpha \tau_f^2 + \xi^2 2 \tau_f \tau_u + \theta \tau_u^2 + \beta \tau_f + \gamma \tau_u - I_T^0$	$Q_{min} = \alpha \tau_f + \xi \tau_u + \beta ; \tau_f^* = \frac{\xi \gamma' - \theta \beta}{2(\alpha \theta' - \xi^2)} ; \tau_u^* = \frac{\xi \beta - \alpha \gamma'}{2(\alpha \theta' - \xi^2)}$
Variación del bienestar social total en la red $\forall ij \in W$	$\Delta Bs_T = \frac{1}{2} (\alpha \tau_f^2 + \theta \tau_u^2 - \delta) + \xi \tau_f \tau_u - I_T^0$	$\tau_{ij_{min}} \leq \tau_f + \tau_u x_{ij} \leq \tau_{ij_{max}} ; \quad \tau_{f_{min}} \leq \tau_f \leq \tau_{f_{max}}$ $\tau_{u_{min}} \leq \tau_u \leq \tau_{u_{max}}$

La tabla 5.5, muestra en resumen la metodología que cuantifica los cambios en los indicadores establecidos con respecto al escenario base al implantar un esquema tarifario compuesto por una tarifa plana y otra tarifa kilométrica.

Se pueden establecer múltiples combinaciones entre los valores de τ_f y τ_u de tal forma que se garanticen tanto el ingreso inicial total I_T^0 como un nivel de servicio apropiado (de acuerdo con el nivel de tráfico que se quiera reducir en la red).

5.6 Algoritmo para la modelización de los efectos al implantar un determinado esquema tarifario

El impacto que se produce sobre diversos indicadores al ajustar una tarifa por congestión, depende en gran medida del tipo de esquema tarifario que se desee aplicar. Para la modelización de estos efectos se utiliza la metodología presentada en el capítulo 4, la cual es compilada a través de un algoritmo que se ejecuta empleando hojas de cálculo y MATLAB a partir de los resultados que se obtienen de TransCAD.

El algoritmo se compone de varias fases las cuales constituyen el proceso ordenado a seguir en un estudio estándar de planificación del transporte, cuyo objetivo es seleccionar el esquema de *road pricing* que produce los resultados más eficientes para la gestión de la movilidad en una determinada área metropolitana. Cada fase está representada a través de un diagrama de flujo. Las fases del algoritmo pueden clasificarse como:

Fase 1: Modelización del escenario base

Fase 2: Modelización del escenario futuro

Fase 3: Implantación de un determinado esquema de *road pricing* y obtención de la(s) tarifa(s) óptima(s).

Fase 4: Análisis de resultados y selección del esquema de *road pricing*.

5.6.1 Fase 1: Modelización del escenario base

Esta fase que se resume en la figura 5.7, pretende caracterizar la situación actual y determinar los diversos parámetros susceptibles a un incremento en el coste generalizado del viaje. Inicialmente se requiere recolectar la información necesaria para poder construir la red de estudio. Como punto de partida se precisa de un SIG (Sistema de Información Geográfica) de la zona de estudio, en el cual se incluyen datos de población, área y límites geográficos de los municipios que conforman tanto el área metropolitana como los que están fuera de ella, inventario de la oferta viaria clasificada según el número de calzadas. Para cada arco de la red de carreteras se debe disponer de los atributos físicos (número de carriles, pendientes, longitud, capacidad, etc.) y operativos (flujos de tráfico, clasificación vehicular, velocidad de operación, peajes actuales, etc.).

A partir de la información básica introducida en archivos *.shp “archivos geográficos con formato de ArcView” que se leen desde TransCAD, se procede a definir el número

de zonas O-D relevantes en el área metropolitana. Con base en esta zonificación y con el grafo de las vías de gran capacidad, objeto de este estudio, se originan los arcos de enlace “conectores” entre los centroides de las zonas y el grafo. Lograda esta unión, el siguiente paso es generar la red de trabajo.

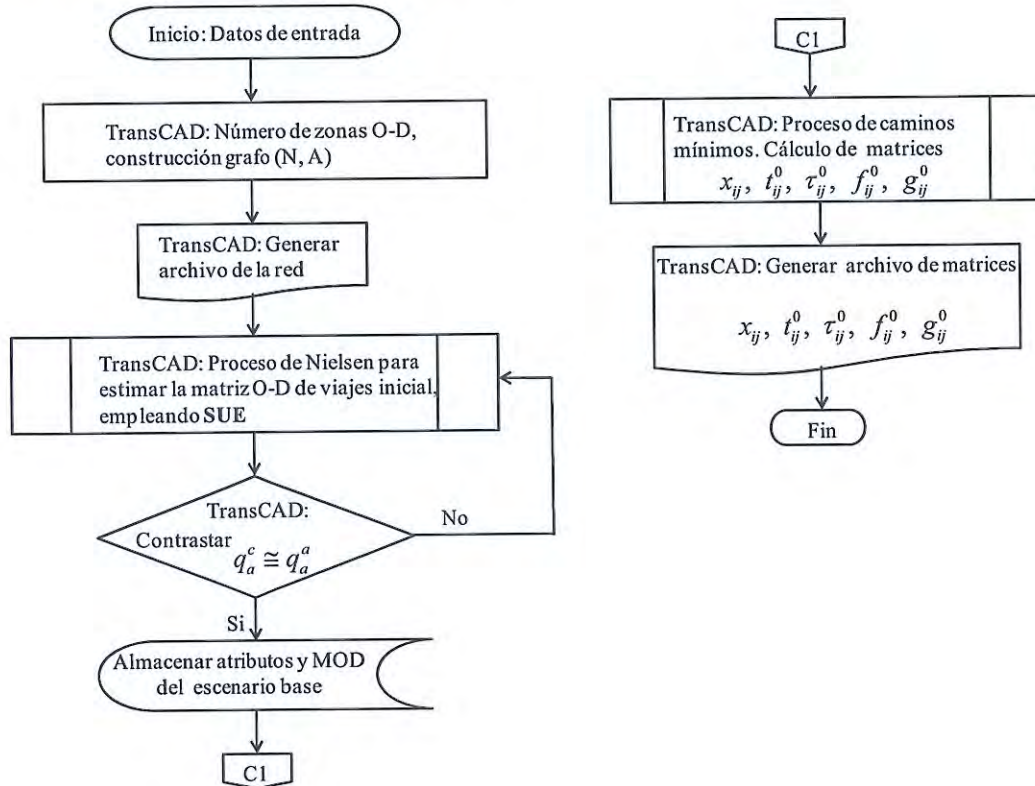


Fig. 5.7. Diagrama de flujo de la fase 1 “modelización del escenario base”.

Creada la red, TransCAD permite actualizar o generar la matriz de viajes entre las diferentes zonas O-D (MOD). En este caso se empleó el método desarrollado por Nielsen para estimar la MOD a partir de los datos del tráfico actual en la red. El algoritmo de Nielsen utiliza para el proceso de asignación del tráfico el método estocástico de equilibrio de usuario (SUE), y mediante un proceso iterativo se contrastan los flujos de cada arco de los conteos actuales (q_a^c) con los flujos resultantes del proceso de asignación (q_a^a). Hechos los ajustes correspondientes para reducir progresivamente las diferencias entre los datos contrastados, se obtiene para el escenario base la MOD inicial entre zonas heterogéneas (q_{ij}^0) y los demás atributos (tiempo de viaje, relación volumen-capacidad, velocidad, etc.) para cada arco.

Realizado el paso anterior, se ejecuta un proceso de caminos mínimos (con base en la minimización del tiempo de viaje) para calcular las matrices O-D de las siguientes variables: distancias de viaje (x_{ij}), tiempos de viaje (t_{ij}^0), peajes actuales (τ_{ij}^0), costes de operación (f_{ij}^0), y por último el coste generalizado del viaje (g_{ij}^0). Cada una de estas matrices generadas permite caracterizar el escenario actual sobre el cual se implantará un esquema de *road pricing*.

5.6.2 Fase 2: Modelización del escenario futuro

Esta fase que se resume en la figura 5.8, se inicia cargando en TransCAD la red y las características del escenario base fundamentalmente la matriz inicial de viajes (q_{ij}^0) y los diferentes atributos de cada arco. La condición básica para la obtención del escenario futuro es alcanzar una reducción en un porcentaje determinado (5%, 10% y 15%) de la cantidad de viajes o veh-km totales de la matriz O-D.

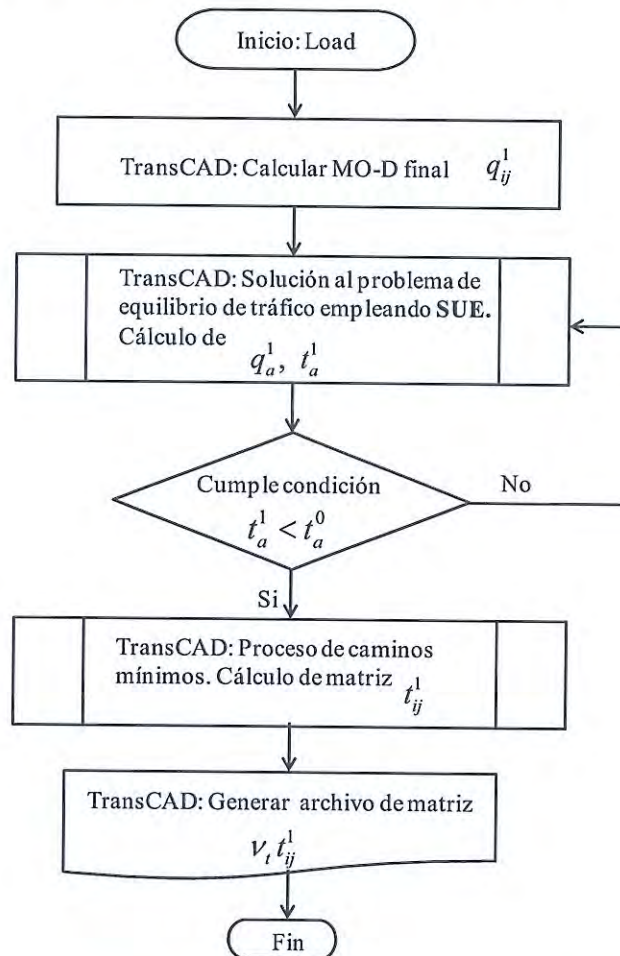


Fig. 5.8. Diagrama de flujo de la fase 2 "modelización del escenario futuro".

El procedimiento empleado para lograr la reducción de viajes totales es disminuir en el mismo porcentaje cada uno de los pares O-D que conforma la matriz, produciéndose la matriz O-D final (q_{ij}^1). Realizado el paso anterior y empleando TransCAD, a continuación se ejecuta un proceso de asignación de tráfico empleando el método estocástico de equilibrio de usuario (SUE) y la misma función de demoras BPR con la que se realizó la fase 1. Este proceso permite obtener para cada arco sus atributos correspondientes (tiempo de viaje, relación volumen-capacidad, velocidad, etc.). En este caso se debe verificar para cada arco la condición $t_a^1 < t_a^0$ para evitar el efecto *spill-over* en otros sectores, es decir, la formación de congestión en otros arcos.

Cumplida la condición anterior, se elabora un proceso de caminos mínimos para obtener la matriz final de tiempos de viaje (t_{ij}^1) que da origen a la generación de la matriz del valor de los tiempos de viaje ($v_t t_{ij}^1$). La obtención de esta última matriz junto con la matriz final de viajes, establece las condiciones necesarias para comparar los distintos esquemas de *road pricing*.

5.6.3 Fase 3: Implantación de un determinado esquema de road pricing y obtención de la(s) tarifa(s) óptima(s)

Para la ejecución de esta fase se emplean los resultados generados en las dos fases anteriores por TransCAD y se recurre a hojas de cálculo y al programa MATLAB para cuantificar las tarifas que permiten la reducción establecida de la demanda actual. Esta fase se presenta a través del diagrama de flujo en la figura 5.9. Primeramente se cargan los archivos que contienen las matrices del escenario base (x_{ij} , t_{ij}^0 , τ_{ij}^0 , f_{ij}^0 , y g_{ij}^0) y la matriz de tiempos de viaje (t_{ij}^1) del escenario futuro. Junto con la información anterior, se genera la matriz de elasticidades (η_{ij}), la cual es una función de la matriz de distancias (x_{ij}).

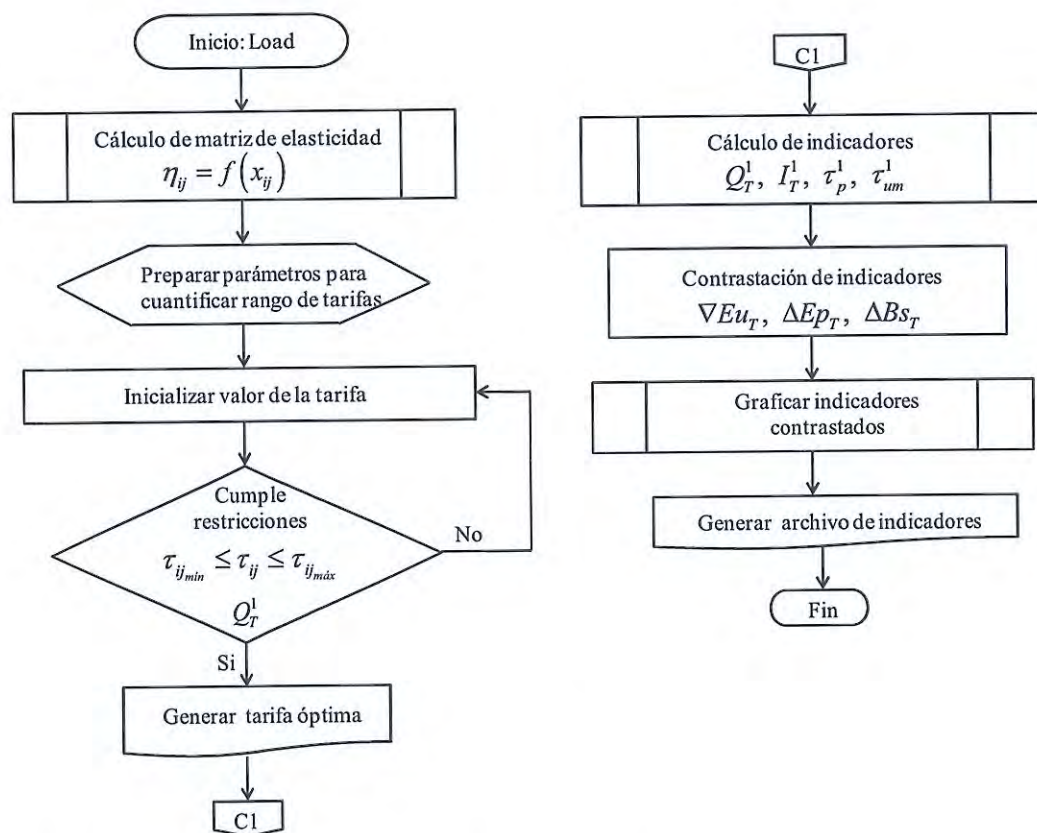


Fig. 5.9. Diagrama de flujo de la fase 3 "Implantación de un determinado esquema de road pricing y obtención de la(s) tarifa(s) óptima(s)".

Almacenadas cada una de estas matrices y con base en la metodología descrita para cada tipo de *road pricing*, se preparan los diferentes parámetros (α_{ij} , β_{ij} , δ_{ij} , ...) que intervienen en la cuantificación de la(s) tarifa(s). Para un determinado esquema y a partir del valor total de cada parámetro, se estructura la formulación para la obtención del valor de la(s) tarifa(s) óptima(s) que permite(n) cumplir con todas las restricciones pertinentes de cada esquema. Nótese, que el valor inicial que adopta la tarifa debe estar comprendido entre el valor mínimo y máximo previamente cuantificados.

Calculado el valor de la(s) tarifa(s) óptima(s) el siguiente paso es cuantificar cada uno de los indicadores a evaluar “demanda total (Q_T^1), tarifa promedio (τ_p^1), tarifa unitaria media (τ_{um}^1), recaudo bruto (I_T^1)”. Posteriormente, se estiman los cambios que se producen en el excedente de usuario (∇Eu_T^1), excedente de productor (ΔEp_T^1) y del bienestar social total (ΔBs_T). A través de la generación de gráficos es posible analizar el comportamiento de estos cambios al variar la tarifa para una mayor comprensión de los efectos.

5.6.4 Fase 4: Análisis de resultados y selección del esquema de road pricing

Con esta última fase del algoritmo se busca seleccionar el esquema de tarifación que origina los mejores resultados al querer reducir una determinada cantidad de los viajes en toda la red de análisis. Esta fase se resume con el diagrama de flujo de la figura 5.10.

Inicialmente, se procede a rescatar los resultados producidos en las fases 1 y 3, ya que como base de comparación de los esquemas se ha establecido el mismo porcentaje de reducción de viajes o veh-km. Con base en esta información se analizan las magnitudes de los diferentes efectos sobre cada indicador establecido y para cada uno de los esquemas de *road pricing* evaluados. Dicho análisis es detallado mediante gráficas que ilustran el comportamiento de estos efectos frente a los diversos niveles de reducción de la demanda.

Hecho el análisis anterior, el siguiente paso es seleccionar el esquema tarifario que produce los resultados más eficientes. Para ello se recurre a la teoría de análisis de decisión a través de un proceso analítico de jerarquización (explicado en el capítulo 4) para evitar problemas de subvaloración en los indicadores estudiados y también para reincorporar otros criterios de diseño que debe cumplir cualquier esquema tarifario.

Teniendo como objetivo fundamental la selección de la estructura tarifaria a aplicar en el área urbana o metropolitana de estudio, se definen los criterios que cumplen con tal objetivo. Los criterios se comparan dos a dos y se acuerda asignar sus respectivos pesos. En cada una de las matrices se debe cumplir el concepto de reciprocidad y la matriz de comparación debe ser consistente, para ello se debe cumplir que la razón de consistencia RC debe ser inferior al 10%, para que el vector de pesos seleccionado sea válido.

Igualmente y considerando de forma particular cada uno de los criterios, se obtienen los pesos de las alternativas. La cuantificación del mayor rango global de una alternativa

permitirá seleccionarla entre las demás. El rango global de cada alternativa se encuentra asumiendo una utilidad lineal por multiplicación acumulada de los pesos de los diferentes niveles de jerarquía.

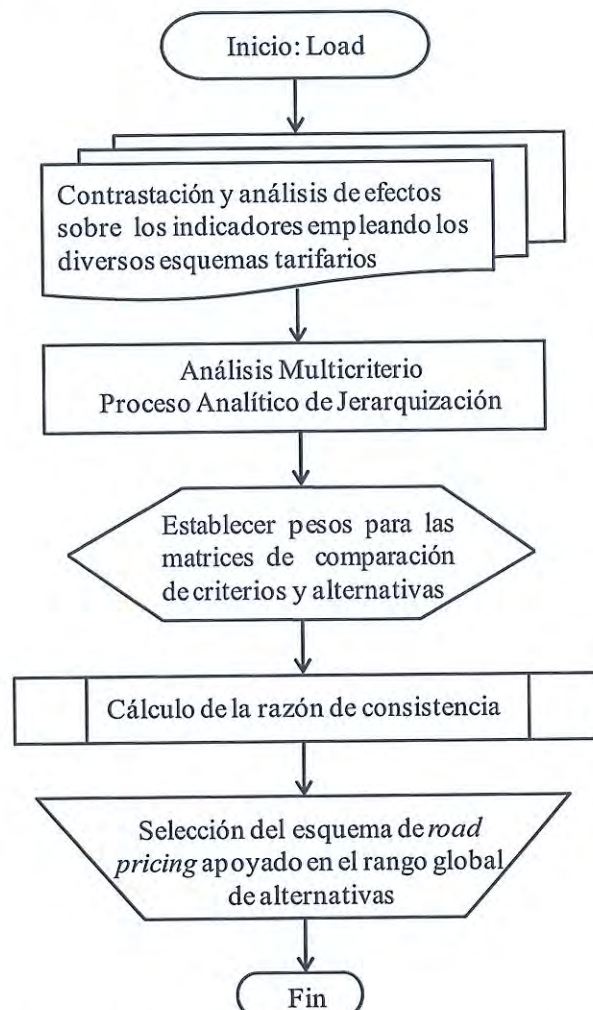


Fig. 5.10. Diagrama de flujo de la fase 4 "Análisis de resultados selección del esquema de road pricing a implantar".

5.7 Parámetros de sensibilidad en la modelización

Una de las grandes dificultades en los estudios para la posible implantación de una medida tarifaria que gestione la movilidad, es la cuantificación coherente y sensata de la elasticidad y del valor del tiempo del viaje, pues son parámetros que afectan directamente la estimación de la demanda futura independientemente del modelo de demanda que se emplee. Al introducir una medida errónea del valor del tiempo o de la elasticidad de la demanda, afectará considerablemente la estimación de la tarifa a cobrar y de ahí la "exactitud" con que se valoran todos los indicadores, particularmente el recaudo a obtener y obviamente los efectos en el bienestar de los usuarios.

5.7.1 Sensibilidad al valor del tiempo

De acuerdo con la relación lineal adoptada para la cuantificación del coste generalizado del viaje, se tiene que la magnitud de este coste es directamente proporcional a la valoración (v_t) que se le dé al tiempo. Por lo tanto, si hay un error en el valor del tiempo asumido, habrá un error en la cuantificación del peaje óptimo estimado.

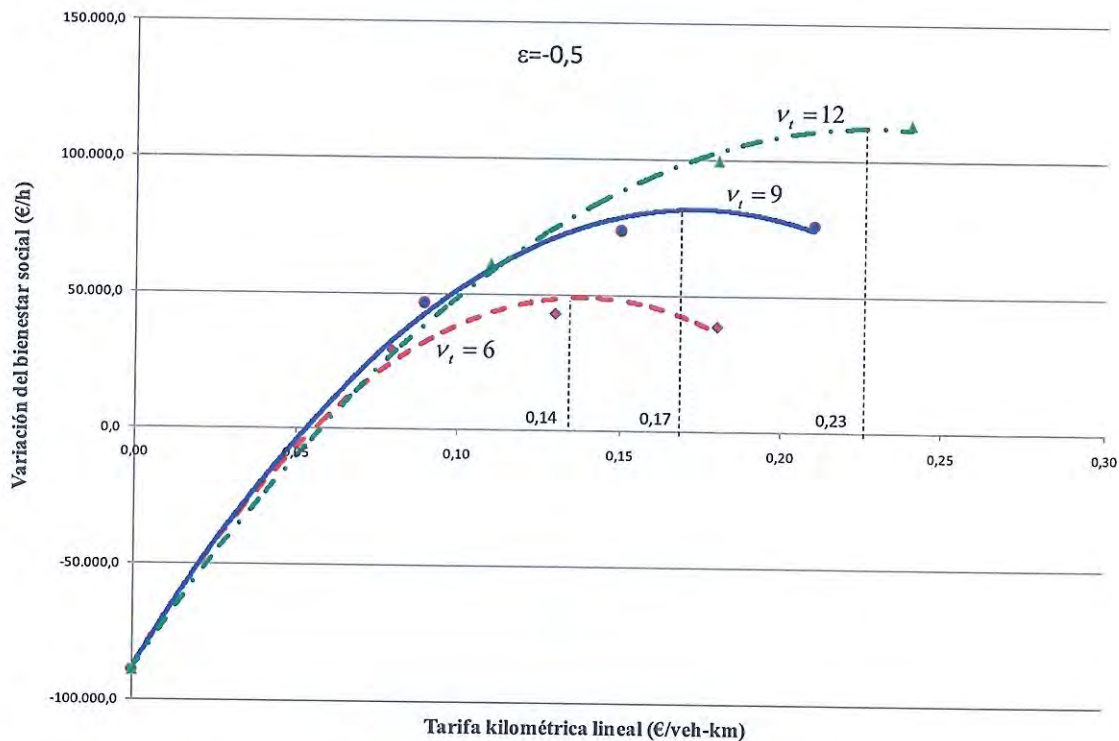


Fig. 5.11. Variación del bienestar social con respecto a un esquema de road pricing kilométrico y una valoración del tiempo diferente.

Independientemente del esquema de *road pricing* que se analice, el incremento o disminución del valor del tiempo hace que la cuantificación de la magnitud de todos los indicadores se incrementen o se disminuyan en esa misma proporción. La figura 5.11 muestra el caso de la variación del bienestar social con respecto a un esquema tarifario de tipo kilométrico, donde la magnitud de la elasticidad permanece constante pero con una valoración del tiempo variable (en €/veh-h). Con esta figura se busca destacar que según la valoración que se le asigne al tiempo se obtiene que: (i) al apreciarse más el tiempo, se requiere una mayor tarifa para disuadir una misma cantidad de vehículos, causando el efecto contradictorio de generar por un lado mayores ingresos pero por el otro mayor pérdida de excedente de usuario y (ii) la magnitud del cambio máximo en el bienestar social es mayor entre más se valore el tiempo.

Dado lo anterior, se resalta la importancia de la cuantificación atinada del valor del tiempo según el tipo de vehículo, el tipo de viaje y según el nivel de renta de las personas, antes de la elaboración de estudios de *road pricing*.

5.7.2 Sensibilidad de la elasticidad basada en la distancia

Para este trabajo de investigación se adoptó que la elasticidad (η_{ij}) de la demanda respecto al coste generalizado expresada como una función de la distancia entre cualquier par O-D $ij \in W$ de la forma $\eta_{ij} = \varepsilon x_{ij}^b$, donde $\varepsilon < 0$ y $b \leq 0$. La figura 5.12 ilustra la variación de la elasticidad respecto a la distancia para diferentes valores de b . En el caso de que $b = 0$, $\eta_{ij} = \varepsilon$ para todos los pares O-D $ij \in W$. Si $b < 0$ entonces la demanda es más inelástica con la distancia, tal como se demostró en el capítulo 4.

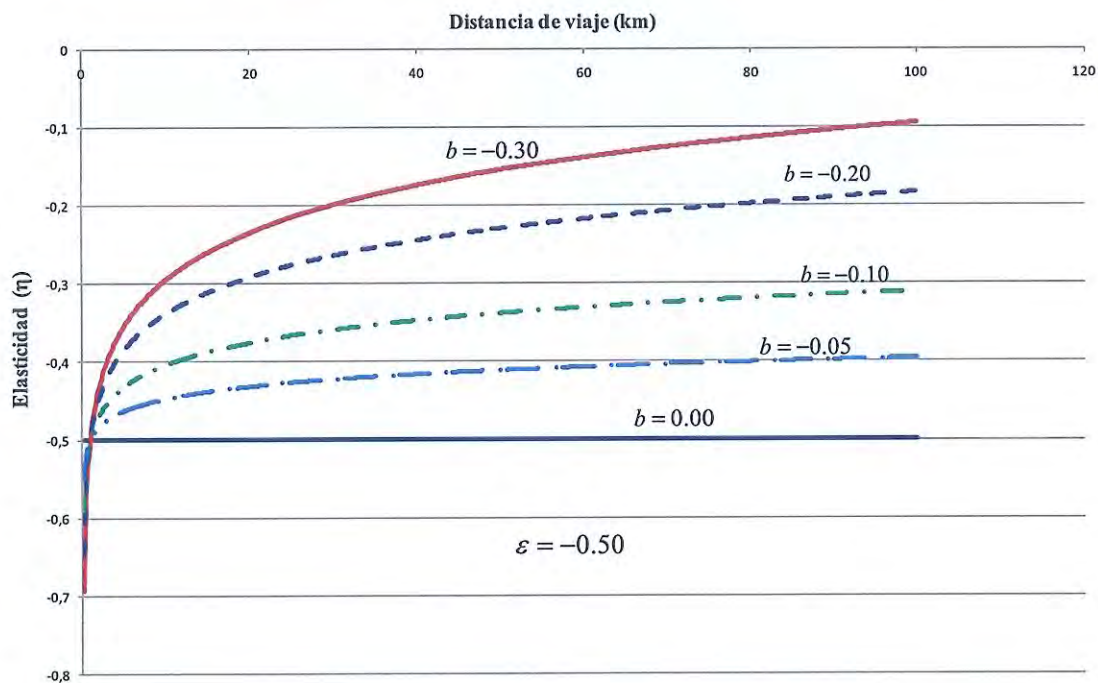


Fig. 5.12. Cambio de la elasticidad (η_{ij}) respecto a la distancia para diferentes valores del parámetro b .

En el Anexo 2 se describen las diferentes magnitudes que adopta la elasticidad (ε) respecto a cada uno de los componentes monetarios del coste generalizado, demostrándose en la mayoría de los casos la poca sensibilidad de la demanda ante un incremento de los precios. Sin embargo, al igual que ocurre con la valoración del tiempo, si se asume un valor erróneo de la elasticidad, éste conduce a errores en la cuantificación del peaje y por ende en la magnitud de los cambios que se producen en los diversos indicadores evaluados.

La figura 5.13 muestra el caso de la variación del recaudo futuro con respecto a un esquema tarifario combinado (suma de una tarifa de entrada más otra unitaria basada en la distancia), donde la valoración del tiempo (en €/veh-h) permanece constante pero la magnitud de la elasticidad (ε) es variable. Con esta figura se manifiesta que para reducir la demanda en una determinada cantidad de viajes se requiere una mayor tarifa

cuanto más inelástica es la demanda, lo que origina una mayor estimación en la magnitud de los ingresos brutos.

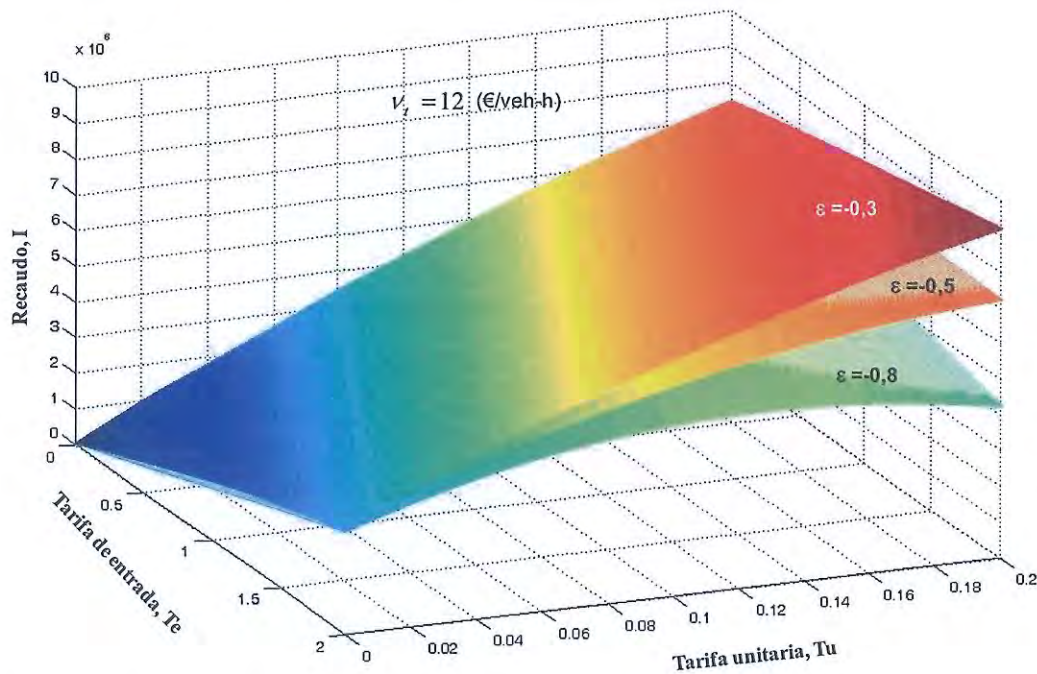


Fig. 5.13. Variación del ingreso futuro con respecto a un esquema de road pricing compuesto de dos tarifas y una valoración de la elasticidad diferente.

Dada la dificultad de predecir la respuesta de la demanda antes de la implantación de un esquema de *road pricing*, resulta necesario contar con un estudio detallado de elasticidades para los diferentes tipos de usuarios a través de pruebas piloto y de esta forma cuantificar la tarifa que logre la mayor eficiencia de la capacidad de las carreteras.

La introducción de la variable distancia en la cuantificación de la elasticidad, permite aproximarse más a la realidad durante el proceso de modelación. Tal es el caso de los *commuters*, cuya presencia permanente en los viajes de tipo metropolitano hace que su demanda sea más inelástica con la distancia, debido que necesariamente deben usar el transporte privado debido a las deficiencias de transporte público (en cuanto a servicio, accesibilidad y frecuencia) y al poco uso de los modos lentos fuera del ámbito urbano.