# ANÁLISIS DEL COBRO POR CONGESTIÓN EN BOGOTÁ DESDE UNA PERSPECTIVA DESAGREGADA

# CHARGING CONGESTION ANALYSIS IN BOGOTA FROM A DISAGGREGATED PERSPECTIVE

José Luis Barrera Acevedo[1]
Joaquín Antonio Tibatá Chitivo[2]

1 Ingeniero de Transporte y Vías. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Especialista en Geotecnia Vial y Pavimentos. Universidad Santo Tomas Tunja. Contacto: joseluisbarrera10@hotmail.com

2 Joaquín Antonio Tibatá Chitivo. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Especialista en Geotecnia Vial y Pavimentos. Universidad Santo Tomas Tunja. Contacto: ing.joaquinantoniotibata@gmail.com

## RESUMEN

Aunque los beneficios del cobro por congestión han sido demostrados por la literatura económica, su implementación tiene baja aceptación en la práctica porque los usuarios de auto la entienden como una medida injusta. El presente artículo estima un modelo desagregado de demanda, basado en la teoría de la utilidad aleatoria, para identificar los factores que determinan el diseño de un mecanismo de tarificación desde la perspectiva de aceptación de los usuarios de auto. El modelo econométrico aporta información para la evaluación económica de la medida y permite modelar el comportamiento individual en diferentes escenarios de cobro por congestión.



**Palabras claves:** cargo por congestión, externalidades del transporte, modelos de elección discreta.



## ABSTRACT

Although the benefits of congestion charging have been demonstrated by the economic literature; in practice, its implementation has low acceptance because auto users understand it as an unfair measure. Based on the random utility theory, this paper estimates a disaggregated demand model in order to identify the factors that determine the design of a congestion charging scheme from the perspective of acceptability of auto users. The econometric model provides information for the economic evaluation of the measure and it allows to model individual behavior in different congestion charging scenarios.



**Keywords:** transport externalities, congestion charging, discrete choice models.

# INTRODUCCIÓN

El transporte es un ejemplo clásico de industria con externalidades (Fernández & Olmedillas, 2002). Es bien conocido que la producción de servicios de transporte genera externalidades negativas como la congestión, la accidentalidad, el ruido, la contaminación atmosférica, el efecto invernadero y el efecto barrera[3], entre otras, (Litman & Burwell, 2006). Y aunque es menos conocido, gracias a la aglomeración de usuarios de los sistemas de transporte público[4], se generan también externalidades positivas como el efecto Mohring. La correlación existente entre la congestión y las demás externalidades negativas del transporte ha sido demostrada (Barth & Boriboonsomsin, 2008; Makarewicz & Galuszka, 2011; Zhang, Batterman & Dion, 2011; Grote, Williams, Preston & Kemp, 2016) y, en consecuencia, la adopción de mecanismos orientados a reducir la congestión, producirá también efectos sobre las demás externalidades, tal como ha sido evidenciado en algunos estudios empíricos (Beevers & Carslaw, 2004).

La economía del transporte cuenta con una larga tradición en la ciencia económica, y se ha ocupado de estudiar, entre otros, aspectos normativos, asignación eficiente de recursos, equidad, distribución de renta, tarificación óptima y externalidades (Fernández & Olmedillas, 2002). De hecho, la congestión, definida técnicamente como la pérdida de tiempo causada por la fricción entre los vehículos que componen el flujo de tránsito (Thompson & Bull, 2002), es posiblemente la primera externalidad de la industria del transporte tratada en la literatura económica (Pigou, 1912), dando paso a una vasta literatura sobre cobros por congestión con importante auge en la década de los sesenta (Walters, 1961; Marchant, 1968; Vickrey, 1969) y que recientemente ha tomado varias direcciones, entre las que se resaltan análisis del segundo mejor (Verhoef, Nijkamp & Rietveld, 1996; Small & Yan, 2001) e interacción entre economías de aglomeración y políticas sobre congestión (Safirova, 2002), entre otros importantes desarrollos.

En Colombia, se han realizado algunas investigaciones para valorar el tiempo de viaje (Márquez, 2013) y estudiar algunas estrategias para reducir la congestión, como la tarificación de parqueaderos (Márquez, Gallo & Chacón, 2011) y la implantación de carriles de alta ocupación vehicular en Bogotá (Márquez, Aldana & Prieto, 2016), enfocados principalmente al análisis de aceptación. Sin embargo, a excepción del trabajo de Ardila (1995) ha sido poca la atención prestada al análisis del cobro por congestión y sus efectos. Para aportar nuevo conocimiento sobre este tema en el contexto colombiano, el objetivo del presente trabajo es identificar

3 El efecto barrera se refiere a la modificación de las relaciones sociales, básicamente la reducción de la interacción social en los espacios públicos, cuando se presentan condiciones peligrosas o incómodas. Un buen ejemplo del efecto barrera es la construcción de una gran avenida en una zona residencial ya que la provisión de esta nueva infraestructura rompe el tejido social existente debido a la circulación de vehículos a alta velocidad, lo que obliga a peatones y ciclistas a desarrollar nuevas estrategias de movilidad que implican pérdida de bienestar.

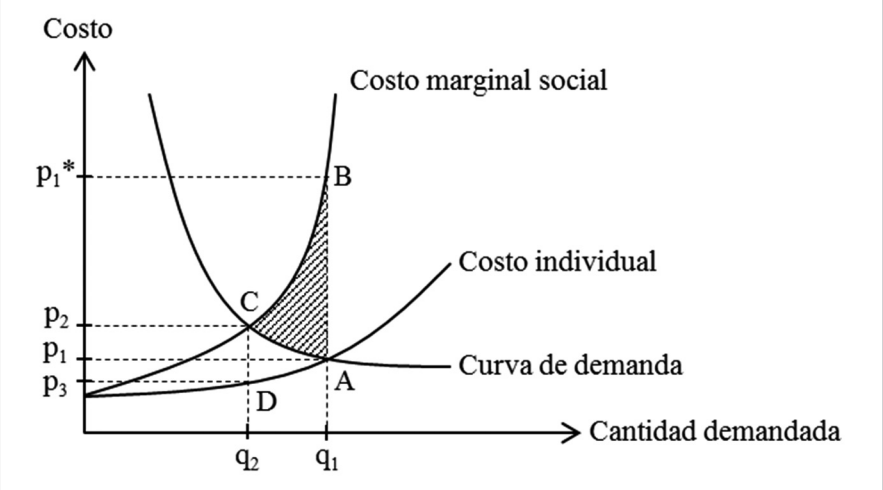
4 La aglomeración de usuarios aumenta la demanda de una ruta, esto justifica ofrecer una mayor frecuencia de buses que genera mayor bienestar para todos los pasajeros de la ruta porque en promedio tienen que esperar menos tiempo para tomar el servicio. Sin embargo, una mayor frecuencia implica mayores costos totales de operación, siendo necesario encontrar un equilibrio entre nivel de servicio y costos de operación.

y valorar los atributos que permitan estudiar un esquema de tarificación vial para Bogotá, con base en preferencias declaradas de tipo elección. En la misma línea del trabajo de Bascuñán (2009), la presente investigación se sustenta en la estimación de un modelo desagregado de demanda, que es una herramienta microeconómica apropiada para estudiar el grado de aceptación de la implementación del cobro por congestión en la ciudad de Bogotá. El trabajo, además de aportar evidencia empírica relevante para el diseño y evaluación de un mecanismo de cobro de congestión en Bogotá, hace una valoración microeconómica del tiempo de viaje y simula el comportamiento de los usuarios en posibles escenarios de tarificación.

## REFERENTES TEÓRICOS Y EMPÍRICOS

Según el primer principio de Wardrop (1952), conocido en la literatura como el equilibrio de usuario, se entiende que cada usuario elige el camino que es mejor para sí mismo, siendo imposible que un usuario reduzca su tiempo de viaje o costo mediante una acción unilateral. Así, en condiciones de equilibrio de usuario, todos aquellos que viajen entre un par origen destino determinado experimentarán el mismo tiempo de viaje por cualquiera de las rutas disponibles. Entonces, la cantidad de vehículos que usan una infraestructura vial estará dada por el equilibrio del costo individual de los usuarios y la demanda, tal como lo ilustra el punto A de la Figura 1.

Figura 1. Diagrama típico de oferta y demanda de transporte




Fuente: Autores del proyecto.

Claramente, a mayor cantidad de usuarios, mayor costo. Esto es particularmente crítico ya que la demanda de transporte es dinámica en el tiempo y genera problemas de congestión en los periodos de alta demanda y una notoria subutilización de la capacidad vial en los periodos valles. Además, como el transporte es un servicio, la oferta no puede ser almacenada y por tal razón se presentan estos importantes desequilibrios entre los distintos periodos del día (Ortúzar & Willumsen, 2011). Estos problemas se exacerban puesto que los usuarios perciben su propio costo

individual y no el costo marginal social. En consecuencia, en la situación de equilibrio de usuario A, el costo marginal social estaría dado por B, siendo la diferencia entre $p_1^*$ y $p_1$ el costo que cada usuario les impone a los demás.

El segundo principio de Wardrop (1952), conocido en la literatura como el equilibrio óptimo del sistema, deja a un lado la óptica individual caracterizada por un comportamiento "egoísta" y dice que, en el equilibrio, el tiempo total de los usuarios del sistema de transporte es mínimo, lo que implica un comportamiento "cooperativo" de cada usuario del sistema, que podría lograrse mediante un mecanismo de tarificación. El punto de equilibrio C de la Figura 1 sería entonces el óptimo social ya que en este punto todos internalizan el costo impuesto a los demás. Sin embargo, para que esto ocurra, los usuarios tienen que percibir el costo $p_2$, que es mayor al costo individual percibido $p_1$ en el equilibrio de usuario. En consecuencia, $p_2–p_3$ sería el cargo por congestión y se tendría una reducción de la cantidad demandada igual a $q_1–q_2$.

## Curvas de costo individual y marginal social

En la economía del transporte, las curvas de costo son especificadas normalmente mediante funciones volumen-demora que establecen una relación matemática entre la cantidad demandada (volumen o flujo) y el costo (tiempo). La función BPR (Bureau of Public Roads, hoy Federal Highway Administration) es una de las más usadas gracias a su simplicidad (Márquez, García & Guarín, 2014). Alternativamente son usadas otras funciones, como la propuesta por Spiess (1990) que si bien es más compleja, agiliza la convergencia de los algoritmos de asignación[5]. Las funciones volumen-demora multiplican el tiempo de viaje a flujo libre por una función en la que el volumen es normalizado al ser dividido entre la capacidad, como se puede ver en [1].

$$t = t_o \cdot f\left(\frac{v}{C}\right) \qquad [1]$$

Donde,

- $t$: Tiempo de viaje en las condiciones de demanda
- $t_o$: Tiempo de viaje a flujo libre
- $v$: Cantidad demandada, es decir volumen o flujo
- $C$: Capacidad de la infraestructura vial

El costo marginal social, es decir la contribución al tiempo total por la adición marginal de un vehículo al flujo, se puede expresar mediante la ecuación [2], donde el segundo término adiciona la contribución marginal del tiempo sobre el flujo total.

$$\mathrm{C_{mg}} = t + v\frac{\partial t}{\partial v} \qquad [2]$$

Si se mantiene la misma notación empleada en [1], siendo $\alpha$ y $\beta$ y parámetros

5 La manera tradicional de abordar el problema de la modelación del transporte supone la interrelación de tres macro-variables: sistema de actividades, sistema de transporte y patrón de flujos. Como el patrón de flujos depende tanto del sistema de transporte como de las actividades, es evidente que cualquier cambio que afecte al sistema de transporte o al sistema de actividades producirá una variación en el patrón de flujos, es decir en la cantidad demandada. El enfoque más utilizado para predecir el patrón de flujos es el modelo clásico de transporte, que se presenta como una secuencia de cuatro etapas: generación de viajes, distribución, reparto modal y asignación. Esta última etapa ocupa funciones de volumen-demora y emplea algoritmos computacionales para asignar el flujo vehicular de tal manera que resulte consistente con el comportamiento de elección de ruta de los usuarios.

a calibrar, la forma general de la función BPR se puede escribir como sigue:

$$t = t_o \cdot \left[1 + \alpha \left(\frac{v}{C}\right)^{\beta}\right] \qquad [3]$$

La primera derivada de la función BPR es:

$$\frac{\partial t}{\partial v} = \beta t_0 \alpha \left(\frac{v}{C}\right)^{\beta-1} \left(\frac{1}{C}\right) \qquad [4]$$

Entonces, de acuerdo con [2] la función de costo marginal BPR es:

$$C_{mg} = t_o \left[1 + \alpha \left(\frac{v}{C}\right)^{\beta} (1 + \beta)\right] \qquad [5]$$

**Curvas de demanda**

Hoy por hoy, los modelos desagregados son una herramienta de análisis adecuada para abordar el problema de modelar la demanda de transporte (Ortúzar & Willumsen, 2011). Dada la naturaleza de no divisibilidad que caracteriza a la demanda de transporte, la evidencia empírica ha demostrado que normalmente las decisiones económicas implican la elección entre un conjunto de alternativas discretas y en consecuencia lo que importa no es cuánto se consume sino el qué (Ortúzar & Román, 2003). Por ejemplo, un incremento en la tarifa del parqueadero del auto particular puede hacer que un individuo prefiera otra alternativa, como el transporte público, o que simplemente siga usando su vehículo a un mayor costo (Márquez, Gallo & Chacón, 2011), lo cual es consistente con uno de los postulados que modifica la teoría económica clásica, al señalar que la utilidad se deriva de las características de los bienes y no de los bienes *per se* (Lancaster, 1966).

El consumo de un individuo, limitado por su restricción presupuestal, estaría dado por las cantidades que consume de bienes divisibles y por la elección de alternativas discretas que están representadas por una serie de atributos que reflejan sus características. Dicha elección de alternativas se puede estudiar mediante modelos de elección discreta, cuyo sustento se encuentra en la teoría de la utilidad aleatoria (Thurstone, 1927; McFadden, 1974; Manski, 1977). Los modelos de elección discreta representan el comportamiento de un individuo *n* que se enfrenta a la elección de una única alternativa *i*, entre un conjunto finito *I* de alternativas disponibles (Train, 2003). Como el individuo busca maximizar su utilidad, prefiere la alternativa *i* sobre la *j* si:

$$U_{ni} > U_{nj} \qquad [6]$$

Si bien el problema es determinístico para el individuo, dado que el investigador observa solo algunos atributos de decisión y algunos atributos del individuo, debe tratar la función de utilidad con un error aleatorio de media cero y, por lo tanto:

$$U_{ni} = V_{ni} + \varepsilon_{ni} \qquad [7]$$

Entonces, la utilidad representativa o sistemática es una función que requiere para su calibración el ajuste de los parámetros $\theta$ que acompañan a las variables o atributos incluidos en la función de utilidad determinística (Train, 2003). Los distintos modelos de comportamiento de maximización de la utilidad aleatoria se diferencian principalmente en la especificación que suponen para la densidad de los factores no observados. Al suponer que los términos de error distribuyen en forma idéntica e independiente Gumbel, se obtiene el modelo Logit Multinomial (MNL),

que configura la demanda individual, es decir la probabilidad de que un individuo *n* elija la alternativa *i*:

$$p_{ni} = e^{V_{ni}} / \sum_j e^{V_{nj}} \qquad [8]$$

Donde, $V_{nj}$ es la utilidad representativa o sistemática. En la mayor parte de los modelos de elección discreta que se emplean en la actualidad, se especifican funciones lineales y se considera que los parámetros $\theta$ son constantes para todos los individuos pero pueden variar entre las alternativas (Train, 2003), así:

$$V_{ni} = \sum_k \theta_k \cdot X_{kni} \qquad [9]$$

Una vez que el mejor modelo es elegido, además de su empleo para realizar pronósticos de elecciones en diferentes escenarios, puede aprovecharse para medir elasticidades con respecto a diferentes variables tales como el cargo por congestión. Así, la variación porcentual en la probabilidad de utilizar una alternativa *i* con respecto a la variación porcentual del atributo *k* se calcula como:

$$E_{ik_{ni}} = -\theta_k (1 - p_{ni}) X_{kni} \qquad [10]$$

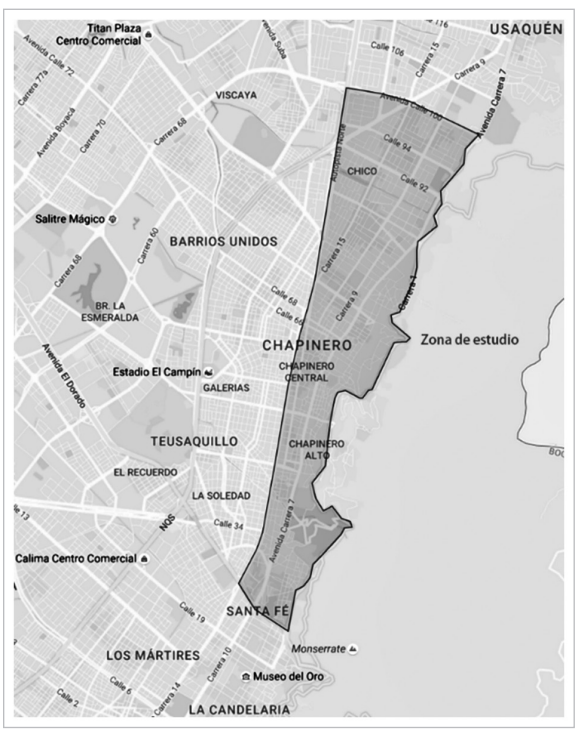
# ASPECTOS METODOLÓGICOS

La estimación del modelo desagregado de demanda se basó en una encuesta de preferencias declaradas, que implicó delimitar el área donde se aplicaría el cobro por congestión, diseñar el experimento de elección discreta, acopiar la información y estimar los modelos de elección.

### Delimitación del área de estudio

Con base en entrevistas no estructuradas sostenidas con funcionarios de la Secretaría de Movilidad de Bogotá y con soporte en documentos de trabajo, se determinó que el centro de la ciudad reunía las características para experimentar con una medida de cobro por congestión: altos niveles de congestión, ruido, y emisión de gases, así como una importante heterogeneidad en las actividades económicas. Inicialmente se propuso un diseño de seis anillos; sin embargo, debido a su gran tamaño, que abarcaba buena parte del territorio urbano de Bogotá, se consideró más conveniente delimitar una zona única en el centro económico, financiero y educativo de la ciudad. Como se puede ver en la Figura 2, la zona definitiva, de 11.1 km$^2$, fue delimitada por las calles 26 y 100, y por las avenidas Caracas y Circunvalar. Esta zona alberga entidades del estado, universidades, empresas, centros comerciales y centros hoteleros, entre otros usos de suelo.

Figura 2. Delimitación de la zona de estudio.




Fuente: Autores del proyecto.

## Experimento de elección

El experimento de elección consideró dos alternativas de cobro por congestión para que cada individuo expresara su preferencia por alguna de ellas. Con base en la realización de grupos focales fueron identificadas las variables relevantes que se incluyeron en el experimento de elección.

- **Cargo por congestión.** Es el principal atributo que tiene en cuenta el usuario al momento de tomar la decisión de viajar o no en vehículo particular.
- **Ahorro en tiempo de viaje.** La idea subyacente al cargo por congestión es que se reducen los tiempos de viaje.
- **Destino de los recursos.** Tiene relevancia para los usuarios que se verían más o menos dispuestos a pagar, dependiendo del destino dado a los recursos económicos recaudados.
- **Estrategia de cobro.** Referida a la forma como se cobraría el cargo por congestión.
- **Periodo de cobro.** Relacionado con los días y horas en que se aplicaría el cobro por congestión.

Los niveles de cada atributo que fueron tomados como base para el diseño del experimento son mostrados en la Tabla 1. La encuesta se basó en un diseño ortogonal de 16 tratamientos divididos en 2 bloques de 8 situaciones de elección cada uno, evitando así una carga cognitiva excesiva a cada individuo, pues como lo sugiere la literatura, no es recomendable enfrentar a cada individuo a más de 9 situaciones de elección (Caussade, Ortúzar, Rizzi & Hensher, 2005).

Tabla 1. *Atributos y niveles del diseño experimental*

| Atributo | Nivel | |
|---|---|---|
| | **Opción 1** | **Opción 2** |
| Cargo por congestión ($) | 6,000 | 5,000 |
| | 9,000 | 7,000 |
| | 7,500 | 6,000 |
| Ahorro de tiempo (min) | 10 | 5 |
| | 20 | 10 |
| | 13 | 5 |
| Destino de los recursos | Infraestructura vial | |
| | Ciclo-rutas | |
| | Subsidios al transporte público | |
| Estrategia de cobro | Por entrar y salir de la zona | |
| | Por transitar dentro de la zona | |
| | Según la distancia recorrida | |
| Periodo de cobro | Todo el día | |
| | Horas pico | |

Fuente: Autores del proyecto.

## Datos

Se aplicó un total de 97 encuestas entre usuarios de vehículo particular escogidos sistemáticamente en parqueaderos públicos y privados, localizados en la zona de estudio, en sitios como centros comerciales, lavaderos de autos, universidades y empresas. Las distribuciones de cada una de las variables individuales de la muestra (Tabla 2) se consideran representativas de los usuarios de auto particular que ingresan a la zona de estudio. La distribución muestral del sexo, que luce desproporcionada, corresponde satisfactoriamente con la distribución por sexo de los conductores de auto en Bogotá, que como se sabe es del 68% de hombres y 32% de mujeres, como se ha evidenciado en otros estudios (Márquez, Gallo & Chacón, 2011).

Tabla 2. *Distribución de la muestra.*

| Variable | Categoría | Muestra | % |
|---|---|---|---|
| Sexo | Masculino<br>Femenino | 64<br>33 | 66<br>34 |
| Edad | 20-30<br>30-40<br>40-50<br>50-60 | 22<br>28<br>36<br>11 | 23<br>29<br>37<br>11 |
| Nivel educativo | Bachillerato<br>Técnico<br>Universitario<br>Posgrado | 18<br>13<br>40<br>26 | 19<br>13<br>41<br>27 |
| Número de autos en el hogar | 1<br>2<br>3 | 57<br>28<br>12 | 59<br>29<br>12 |
| Ingreso (salarios mínimos) | 2 o menos<br>3<br>4<br>5 o más<br>No responde | 17<br>34<br>23<br>12<br>11 | 18<br>35<br>24<br>12<br>11 |
| Número de viajes semanales al centro de la ciudad | 2 o menos<br>3 o 4<br>5 o 6<br>7 u 8<br>9 o más | 3<br>16<br>50<br>17<br>11 | 3<br>16<br>52<br>18<br>11 |

Fuente: Autores del proyecto.

Es importante resaltar la dificultad de medir correctamente la variable ingreso, que registró un porcentaje superior al 10% de personas que se negaron a responder, a pesar de haber diseñado la pregunta por intervalos, para evitar un mayor rechazo de los encuestados. No obstante, con base en las respuestas del 89% de los individuos

se encontró un ingreso promedio de 3.34 salarios mínimos mensuales, valor que corresponde con el perfil de los usuarios de auto en Bogotá (Márquez, Gallo & Chacón, 2011).

### Estimación del modelo

La estimación del modelo se hizo mediante la técnica de máxima verosimilitud. Asumiendo que las elecciones de los individuos son independientes entre sí, se tiene que:

$$L(\theta) = \prod_n \prod_i (p_{ni})^{Y_{ni}} \qquad [11]$$

Donde, $Y_{ni}$ toma el valor de 1 si el individuo *n* elije la alternativa *i*, y 0 en otro caso. Además, es el vector de parámetros del modelo. Aplicando logaritmo, la función de log-verosimilitud es:

$$l(\theta) = \sum_n \sum_i Y_{ni} \cdot \ln(p_{ni}) \qquad [12]$$

Y reemplazando [8] en [12] se tiene finalmente:

$$l(\theta) = \sum_n \sum_i Y_{ni} \cdot \ln(e^{V_{ni}} / \sum_j e^{V_{nj}}) \qquad [13]$$

El proceso de estimación se hizo con el software de uso libre BIOGEME (Bierlaire, 2003). La selección del mejor modelo se basó en el examen y comparación de algunos indicadores tales como la consistencia de signos, la significancia de los estimadores, medidas de bondad de ajuste mediante los índices de razón de verosimilitud $\rho$ y $\rho^2$ y la aplicación del test de razón de verosimilitud para comparar modelos más complejos frente a otros más sencillos que pueden obtenerse mediante restricciones lineales (Ben-Akiva & Lerman, 1985).

## RESULTADOS ECONOMÉTRICOS

Aunque se probaron diferentes especificaciones, incluyendo modelos con interacciones para capturar la heterogeneidad de los individuos, la Tabla 3 muestra únicamente tres modelos de tipo MNL con fines de discusión ya que ninguna de las interacciones propuestas mostró un comportamiento adecuado. La utilidad sistemática de los individuos se especificó mediante funciones lineales como se mostró en [9], fijando en 0 la constante específica de la opción 2, debido al problema de identificación inherente a este tipo de modelos (Train, 2003).

Tabla 3. *Modelos estimados*

| Coeficiente | Variable | MNL-1 | MNL-2 | MNL-3 |
|---|---|---|---|---|
| Constante opción 1 | | 0.294 ( 2.83) | 0.295 ( 2.84) | 0.280 ( 2.76) |
| Cargo por congestión | $X_{cc}$ | -0.00115 (-6.06) | -0.0012 (-6.31) | -0.00118 (-6.30) |
| Tiempo ahorrado | $X_{ta}$ | 0.230 ( 6.08) | 0.230 ( 6.10) | 0.223 ( 6.09) |
| Cobro en periodo pico | $X_{pp}$ | | 0.106 ( 1.36) | |
| Recursos a infraestructura vial | $X_{iv}$ | 0.453 ( 4.07) | 0.453 ( 4.06) | 0.441 ( 4.00) |
| Recursos a ciclo-rutas | $X_{cr}$ | 0.025 ( 0.23) | | |
| Cobro por entrar y salir | $X_{es}$ | -0.252 (-2.16) | -0.25 (-2.15) | -0.232 (-2.01) |

Tabla 3 (Cont.)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Cobro por transitar dentro de la zona | $X_{tz}$ | 0.274 ( 2.31) | 0.273 ( 2.30) | 0.256 ( 2.18) |
| *l(0)* | | -537.882 | -537.882 | -537.882 |
| *l(θ)* | | -502.644 | -501.717 | -501.413 |
| $\rho^2$ ajustado | | 0.053 | 0.054 | 0.066 |

Fuente: Autores del proyecto.

El cargo por congestión y el tiempo ahorrado fueron especificados en las dos funciones de utilidad, mientras que las variables mudas, es decir cobro en periodo pico, recursos destinados a infraestructura vial, recursos destinados a ciclo-rutas, cobro por entrar y salir, y cobro por transitar dentro de la zona, fueron especificadas únicamente en la función de utilidad de la opción 1. La Tabla 3 muestra además los coeficientes estimados y el estadístico t entre paréntesis. Al final se presentan la log-verosimilitud inicial, la log-verosimilitud en convergencia y el índice $\rho^2$ ajustado.

El signo negativo del cargo por congestión es correcto puesto que entre más alto sea el cobro, los individuos experimentarán una disminución de su utilidad. El tiempo ahorrado también se obtuvo con signo correcto ya que la utilidad individual aumentará en la medida en que el ahorro del tiempo de viaje al interior de la zona sea mayor. El signo positivo del cobro durante el periodo pico indica que los individuos encuentran más favorable esta estrategia, en comparación con el cobro durante todo el día. En el caso de la destinación de recursos, es claro que las personas prefieren que se reinvierta en infraestructura vial, en lugar de hacerlo en ciclo-rutas o en mejoras al sistema de servicio público. Este comportamiento se podría considerar egoísta en el sentido que los usuarios de auto prefieren que se reinvierta en la infraestructura que ellos mismos usan, en lugar de hacerlo en infraestructuras o servicios que mejorarían la experiencia de viaje de otros tipos de usuarios. Al mismo tiempo, tomando como base la estrategia de cobrar según la distancia recorrida, es claro que a los usuarios les parece mejor el cobro por transitar dentro de la zona y encuentran menos utilidad en la estrategia de cobro por entrar y salir de la zona.

A partir del examen de la significancia de los coeficientes estimados, los modelos MNL-1 y MNL-2 se descartaron porque las variables mudas que representan el destino de recursos hacia ciclo-rutas y el cobro del cargo por congestión en periodo pico no resultaron estadísticamente significativas al 5%. En consecuencia, se adoptó el modelo MNL-3, cuyas funciones de utilidad quedaron así:

$$V_1 = 0.280 - 0.00118X_{cc} + 0.223X_{ta} + 0.441X_{iv} - 0.232X_{es} + 0.256X_{tz} \qquad [14]$$

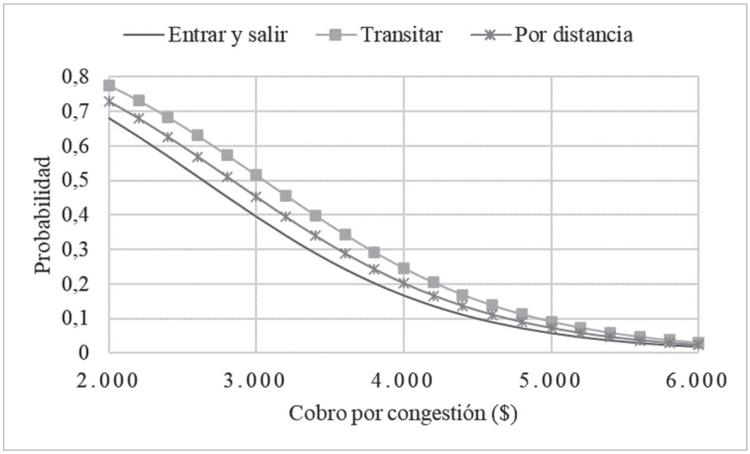
$$V_2 = -0.00118X_{cc} + 0.223X_{ta} \qquad [15]$$

Al evaluar la tasa marginal de sustitución entre el cargo por congestión y el tiempo ahorrado, se encontró que, en el contexto estudiado, el valor subjetivo del tiempo de viaje es de 189 $/min. Este valor se considera razonable para el ingreso

promedio de los encuestados que fue de 3.34 SMMLV, aunque relativamente alto si se compara con otros estudios realizados en Bogotá, que han reportado valores de 95.6 $/min en un contexto de elección para el análisis de auto compartido (Márquez, Aldana & Prieto) y 65.18 $/min en un contexto de elección de bicicleta como alimentador del transporte público (Márquez, 2016).

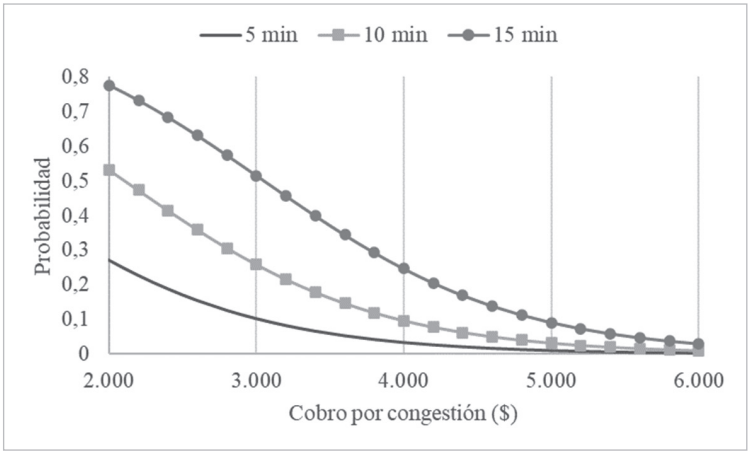
La Figura 3, contiene las curvas de demanda para cada estrategia de cobro, suponiendo un tiempo ahorrado de 15 min, ilustra la sensibilidad de los usuarios con respecto al cobro por congestión, mostrando además que la estrategia de cobro por transitar sería la de mayor aceptación si se compara con las otras dos estrategias evaluadas. La Figura 4 muestra las curvas de demanda para la estrategia de cobro por transitar, que es la de mayor aceptación, variando ahora los supuestos con respecto al tiempo ahorrado, que fluctúa de 5 a 15 min. Como se puede ver, el tiempo ahorrado es determinante en la elección de los individuos.

Figura 3. Curvas de demanda para un tiempo ahorrado de 15 min




Fuente: Autores del proyecto.

Figura 4. Curvas de demanda para la estrategia de cobro por transitar




Fuente: Autores del proyecto.

Al aplicar la ecuación [10], el cálculo de la elasticidad precio dio como resultado -0.37, mientras que la elasticidad tiempo ahorrado dio un valor de 0.525, ambas calculadas para un cobro por congestión de 2000 pesos y un tiempo ahorrado de 15 min. Es claro que las elasticidades a niveles tarifarios más altos o en situaciones de menor tiempo ahorrado, serán, en ambos casos, de mayor valor.

## CONCLUSIONES

El trabajo realizado aportó nuevo conocimiento empírico con respecto a la aceptación que tendría un esquema de cobro por congestión en Bogotá. La modelación econométrica mostró que la cuantía del cargo por congestión, el tiempo ahorrado, la destinación de recursos y la estrategia de cobro son factores determinantes al momento de diseñar un mecanismo de cobro por congestión. De la misma manera, en el contexto estudiado, se encontró que la disposición a pagar por reducir el tiempo de viaje es de 189 $/min, valor que puede ser empleado en la evaluación del bienestar económico de la propuesta de tarificación (Calfee & Winston, 1998). También se elaboraron curvas de demanda que ilustran el comportamiento de los usuarios frente a diferentes cuantías del cobro por congestión y diferentes niveles del tiempo ahorrado.

El trabajo tiene importantes implicaciones prácticas, que bien podrían servir de referencia a las autoridades de transporte de Bogotá. En primer lugar, los resultados econométricos respaldan la idea que los individuos aceptarían mejor un cargo por congestión por transitar dentro de la zona, es decir un esquema similar al de licencia suplementaria (Kozac, Jones & Whibley, 2005), que consiste en definir el área donde se cobra por entrar, salir y viajar dentro de ella, pero no se cobra por circular en las calles limítrofes. Aunque el periodo de cobro no resultó significativo al 5% en ninguna de las especificaciones probadas, se recomienda inicialmente hacer efectivo el cobro en las horas de mayor demanda, lo que sería más aceptable para los usuarios que hacer el cobro durante todo el día, tal como lo sugiere el signo positivo del modelo MNL-2.

Aunque la literatura propone que los recursos del cargo por congestión deberían ser usados para mejorar el sistema de transporte público (Gaunt, Rye & Allen, 2007), es claro que las expectativas de los usuarios y las condiciones de cada ciudad deberían ser consideradas al momento de decidir sobre el destino de los recursos. Con base en los resultados, se recomienda invertir inicialmente en el mejoramiento de la infraestructura vial de la zona y una vez alcanzado un nivel aceptable, destinar recursos a las ciclo-rutas, que son particularmente importantes en Bogotá[6], y finalmente al sistema de transporte público colectivo.

Existen numerosas posibilidades de extensión del trabajo realizado. En primer lugar, si bien los usuarios de auto son muy

6 Si bien, el prestigio de Bogotá como una ciudad amigable para los usuarios de la bicicleta viene desde finales de la década de los noventa, la promoción y construcción de ciclo-rutas ha sufrido un importante rezago desde entonces. A pesar de esta situación, el uso de la bicicleta en la ciudad ha aumentado constantemente, desde alrededor del 0,5% de los viajes diarios en 1996 hasta el 6% en 2014.

importantes en el análisis de aceptación del cobro por congestión, puesto que son ellos los que reciben directamente los impactos de la medida, se recomienda incluir también a los usuarios que no tienen acceso al auto particular, con el fin de conocer su grado de aceptación frente a la destinación de recursos, evaluando otra clase de beneficios que pueden ser percibidos por ellos, como por ejemplo, disminución de las tasas de accidentes, del ruido y la contaminación ambiental. De otra parte, los coeficientes aquí estimados pueden servir de insumo para el diseño de experimentos eficientes que permitan reducir el determinante de la matriz de covarianzas y así lograr mejores especificaciones, como se puede ver en Zwerina, Huber & Kuhfeld (2005).

# REFERENCIAS


Ardila, A. (1995). Control de la congestión vehicular en Bogotá con herramientas microeconómicas, *Desarrollo y Sociedad*, 35, 7.26.

Barth, M. & Boriboonsomsin, K. (2008). Real-World CO2 Impacts of Traffic Congestion, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, 2058, Transportation Research Board, National Academy of Science.

Bascuñán, R. (2009). *Preferencias declaradas en el análisis de la aceptabilidad de la tarificación vial para la ciudad de Santiago*. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Católica de Chile. 157 p.

Beevers, S. D. & Carslaw, D. C. (2005). The impact of congestion charging on vehicle emissions in London, *Atmospheric Environment*, 39, 1-5.

Ben-Akiva, M. & Lerman, S.R. (1985). *Discrete Choice Analysis. Theory and Application to Travel Demand*, Cambridge: The MIT Press. 412 p.

Bierlaire, M. (2003). *BIOGEME: A free package for the estimation of discrete choice models*, Proceedings of the 3rd Swiss Transportation Research Conference, Ascona, Switzerland.

Calfee, J. & Winston, C. (1998). The value of automobile travel time: Implications for congestion policy, *Journal of Public Economics*, 69, 83-102.

Caussade, S., Ortúzar, J. D., Rizzi, L. I. & Hensher, D. A. (2005). Assessing the influence of design dimensions on stated choice experiment estimates, *Transportation Research Part B: Methodological*, 39(7), 621-640.

Fernández, Y. & Olmedillas, B. (2002). Transporte, externalidades y coste social, *Cuadernos de Economía*, 25, 45-67.

Gaunt, M., Rye, T. & Allen, S. (2007). Public Acceptability of Road User Charging: The Case of Edinburgh and the 2005 Referendum, *Transport Reviews*, 27(1), 85-102.

Grote, M., Williams, I., Preston, J. & Kemp, S. (2016). Including congestion effects in urban road traffic CO2 emissions modelling: Do Local Government Authorities have the right options? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 43, 95-106.

Kozac, N., Jones, P. & Whibley, D. (2005). Tools for road user charging (RUC) scheme option generation, *Transport Policy*, 12, 391-405.

Lancaster, K. J. (1966). A new approach to consumer theory, *Journal of Political Economy*, 14, 132-157.

Litman, T. & Burwell, D. (2006). Issues in sustainable transportation, *International Journal of Global Environmental Issues*, 6(4), 331-347.

Makarewicz, R. & Galuszka, M. (2011). Road traffic noise prediction based on speed-flow diagram, *Applied Acoustics*, 72(4), 190-195.

Manski, C. (1977). The structure of random utility models, *Theory and Decision*, 8, 229-254.

Marchand, M. (1968). A note on optimal tolls in an imperfect environment, *Econometrica*, 36(3-4), 575-581.

Márquez, L. (2013). Disposición a pagar por reducir el tiempo de viaje en Tunja (Colombia): Comparación entre estudiantes y trabajadores con un modelo Logit mixto, *Lecturas de Economía*, 78, 45-72.

Márquez, L. (2016). La percepción de seguridad en la demanda de transporte de la integración bicicleta-metro en Bogotá, Colombia, *Lecturas de Economía*, 84, 143-177.

Márquez, L., Gallo, L. & Chacón, C. (2011). Influencia del costo de parqueo en el uso del auto en Bogotá, *Ing. Univ. Bogotá (Colombia)*, 15(1), 105-124.

Márquez, L., García, D. E. & Guarín L. C. (2014). Funciones volumen-demora BPR y cónica en vías multicarriles de Bogotá, *Colombia. rev.ing.*, 41, 30-39.

Márquez, L., Aldana, J. D. & Prieto, M. F. (2016). Acceptability of Implementing High Occupancy Vehicle Lanes on the North Highway in Bogota. *Ing. Univ. Bogotá (Colombia)*, 20(1), 7-22.

McFadden, D. (1974). The measurement of urban travel demand, *Journal of Public Economics*, 3, 303-328.

Mohring, H. (1972). Optimization and Scale Economies in Urban Bus Transportation, *American Economic Review*, 591-604.

Ortúzar, J. D. & Román, C. (2003). El problema de modelación de demanda desde una perspectiva desagregada: el caso del transporte, *Revista eure*, 29(88), 149-171.

Ortúzar, J. D. & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling transport*. 3a ed. Chichester: John Wiley & Sons, 499 p.

Pigou, A. C. (1912). *The Economics of Welfare*, London: Macmillan, xxxi + 493 p.

Thompson, I. & Bull, A. (2002). La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales, *Revista de La Cepal*, 76, 109-121.

Safirova, E. (2002). Telecommuting, traffic congestion, and agglomeration: a general equilibrium model, *Journal of Urban Economics*, 52(1), 26-52.

Small, K. & Yan, J. (2001). The value of “value pricing” of roads: second-best pricing and product differentiation, *Journal of Urban Economics*, 49(2), 310-336.

Spiess, H. (1990). Conical Volume-Delay Functions, *Transportation Science*, 24(2), 153-158.

Thurstone, L. (1927). A law of comparative judgement, *Psichological Review*, 34, 273-286.

Train, K. (2003). *Discrete Choice Methods with Simulation*. Cambridge: University Press, 329 p.

Verhoef, E., Nijkamp, P. & Rietveld, P. (1996). Second-best congestion pricing: the case of an untolled alternative, *Journal of Urban Economics*, 40(3), 279-302.

Vickrey, A. (1969). Congestion theory and transport investment, *American Economic Review*, 59(2), 251-260.

Walters, A. (1961). The theory of measurement of private and social cost of highway congestion, *Econometrica*, 29(4), 676-699.

Wardrop, J. G. (1952). Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, *Proceedings,*

*Institution of Civil Engineers*, II (1), 325-378.

Zhang, K., Batterman, S. & Dion, F. (2011). Vehicle emissions in congestion: Comparison of work zone, rush hour and free-flow conditions, *Atmospheric Environment*, 45, 1929-1939.

Zwerina, K., Huber, J. & Kuhfeld, W. E. (2005). MR-2010E - A General Method for Constructing Efficient Choice Designs. SAS Institute. http://support.sas.com/techsup/technote/mr2010e.pdf