

# Aplicación de Modelos Econométricos para Estimar la Aceptabilidad de una Tasa por Congestión Vehicular

## Application of Economic Models to Estimate the Acceptability of a Vehicle Congestion Charge

DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.13.2.2017.08>

Artículo de investigación científica. Fecha de recepción: noviembre 3 de 2016. Fecha de aceptación: junio 20 de 2017

**José Carlos Jiménez Serpa** 

Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga (Colombia).  
jimser7@hotmail.com

**Miller Humberto Salas Rondón**

Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga (Colombia).  
millersalas@gmail.com

Para citar este artículo:

J. Jiménez Serpa y M. Salas Rondón. "Aplicación de Modelos Econométricos para Estimar la Aceptabilidad de una Tasa por Congestión Vehicular," *INGE CUC*, vol. 13, no. 2, pp. 60-78, 2017 DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.13.2.2017.08>

### Resumen

**Introducción**– Por medio del estudio de la problemática que genera la congestión del tráfico vehicular en los períodos de máxima demanda, se tasa la externalidad negativa de la congestión mediante modelos econométricos de tipo Logit multinomial, mixto y disposición a pagar mediante una tasa pigouviana.

**Objetivo**– En este artículo se propone implementar una tasa por congestión para gestionar la demanda vehicular mediante la aplicación de encuestas de preferencia declaradas y modelos econométricos.

**Metodología**– El estudio se ejecuta en seis pasos o etapas: antecedentes de la problemática, contexto del estudio, fundamentos metodológicos, especificación y estimación del modelo, estimación de la función costo medio-usuario y costo marginal-social, y finalmente, resultados obtenidos con su discusión e informe.

**Resultados**– Analizando los modelos obtenidos de las 2053 observaciones realizadas mediante las encuestas de preferencia declaradas, se observó que para desestimar el uso del auto particular se debería cobrar una tasa de \$7.000 COP por vehículo que entre en la zona o área de congestión, lo cual disminuiría el uso del auto particular en un 68,7%. Con referencia a este comportamiento, se puede decir que las políticas del gobierno que fijan el cobro de la tasa de congestión es una política que no se ajusta a la percepción de los usuarios.

**Conclusiones**– Con esta investigación se identificó la tarifa que refleja lo más fielmente posible el costo social marginal y los costos generalizados de cada viaje en términos de los impactos en los demás. Ahora, si se considera el costo marginal debido a la congestión, se tiene que la demanda actual es excesiva; los usuarios disfrutan del beneficio a un costo de \$3.100 COP, pero imponen a los demás un costo de \$22.152 COP. Finalmente, se debe fortalecer el fundamento jurídico con la reglamentación y creación de un Sistema Nacional de Identificación Electrónica Vehicular, que permitirá, en principio, los cobros por congestión.

**Palabras clave**– Tasa por congestión, valor del tiempo, costos generalizados, modelos de elección discreta.

### Abstract

**Introduction**– Through the study of the problems generated by vehicular traffic congestion during periods of maximum demand, the negative externality of congestion would be assessed using Multinomial Logit, Mixed and econometric models, and willingness to pay through a Pigouvian rate.

**Objective**– In this article, we propose to implement a congestion charge to manage vehicular demand, through the application of declared preference gages and econometric models.

**Methodology**– The study consists of the execution of 6 steps or stages: Background of the problem, Context of study, Methodological Foundations, Specification and estimation of the model, Estimation of the function average cost user and social marginal cost, Results obtained Discussion and report.

**Results**– Analyzing the models obtained from the 2053 observations made through the declared preference surveys, it was observed that in order to discourage the use of the private car, a rate of COP 7000 per vehicle entering the congestion area or area should be charged, which would decrease the Use of Auto Particular in 68.7%, referring to this behavior we can say that the government policies that set the collection of the congestion charge is a policy that does not fit the perception of the users.

**Conclusions**– This research identified the rate that reflects as closely as possible the marginal social cost and the generalized costs of each trip in terms of the impacts on the others. Now if we consider the marginal cost due to congestion, we have that the current demand is excessive, the users enjoy the benefit at a cost of \$ 3,100COP, but impose to others a quota of \$ 22,152COP. Finally, it is necessary to strengthen the legal basis with the regulation and creation of a National Vehicle Electronic Identification System, which will allow, in principle, charges for congestion.

**Keywords**– Congestion Charging, Value of time, Generalized costs, Discrete choice models.



I. INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta la importancia que representa la movilidad vial en el desarrollo de las ciudades y en el bienestar social de los individuos a nivel internacional, nacional y local, se ha identificado que en algunas ciudades de Colombia, en especial el Área Metropolitana de Bucaramanga -AMB-, la población ha sido afectada con el incremento continuo del parque automotor y las limitaciones del uso del suelo que de una u otra forma están generando áreas de alta congestión, incidiendo en el aumento paulatino de afectaciones en la salud, medio ambiente y seguridad vial. En la fig. 1 se muestra el crecimiento histórico del parque automotor en el AMB al 2016.

Para el caso del AMB, el comportamiento del tráfico desde el año 2012 muestra que el sector comprendido entre la ciudad de Floridablanca y Bucaramanga, más exactamente en el viaducto García Cadenas, es una de las zonas más neurálgicas del

Área Metropolitana de Bucaramanga en las horas punta (fig. 2). Según estudios de movilidad urbana realizados por la Alcaldía de Bucaramanga y la Universidad Industrial de Santander, UIS [1], se observó que las proyecciones de la matriz origen-destino para el año 2016 muestran que se estaría pasando de un total de 43.555 viajes en el año 2011 a 46.905 viajes en el año 2016 con vehículos distribuidos en dos carriles con velocidad promedio de 15Km/h, lo que representaría un crecimiento del 7,14%, con una tasa media anual del 1,54% [2].

Además, se observó que se siguen manteniendo las mismas zonas atractoras y generadoras de viajes, ya que muchos de los proyectos de renovación y expansión urbana en el Área Metropolitana de Bucaramanga tienen un horizonte de consolidación que supera el umbral del año 2016, aumentando principalmente los viajes hacia Bucaramanga, manteniendo ésta la dinámica y su comportamiento de ciudad prestadora de servicios y los otros municipios funcionando como ciudades dormitorio.

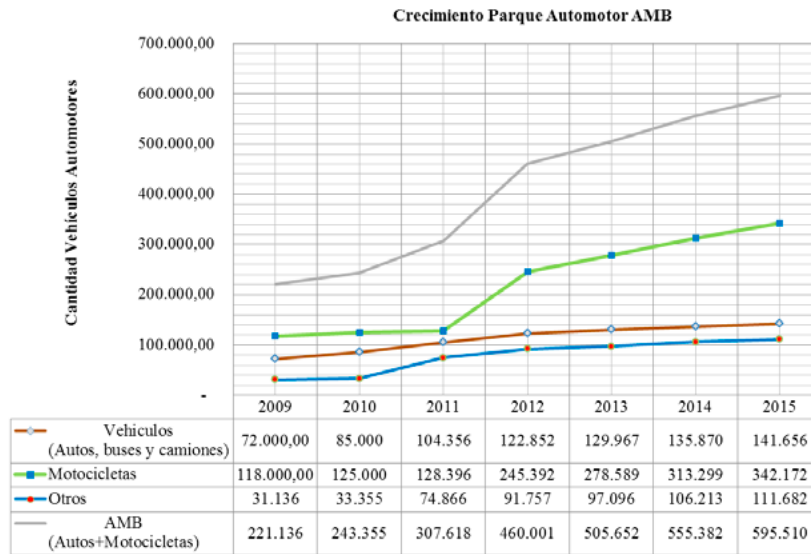


Fig. 1. Crecimiento histórico del parque automotor en el AMB.

Fuente: Autores.

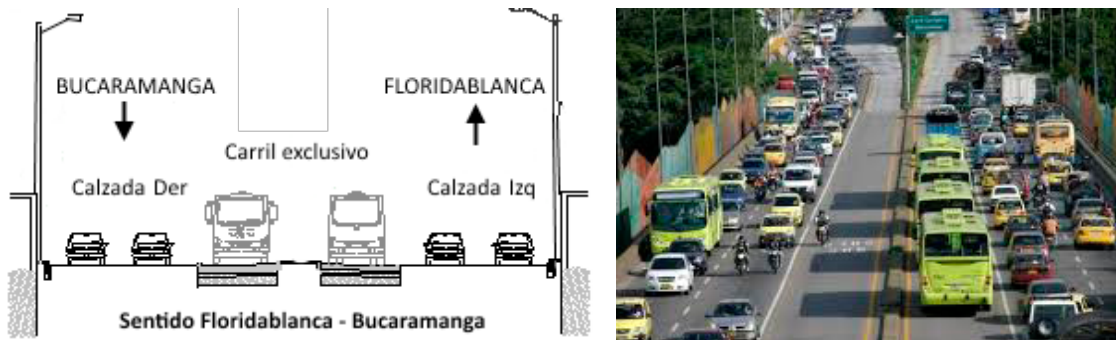


Fig. 2. Perfil vial correspondiente a la zona del viaducto García Cadena 2015.

Fuente: Autores.

A pesar de que la ciudad de Bucaramanga proyectó la construcción de un tercer carril en el sector para solucionar la movilidad en el AMB (fig. 3), se requiere aplicar, como alternativa suplementaria a la infraestructura vial construida y al pico y placa, una gestión de la demanda que mitigue y/o controle la saturación de vehículos en las zonas urbanas congestionadas y, a futuro, genere una regulación de la movilidad de forma sistemática y controlada [3].

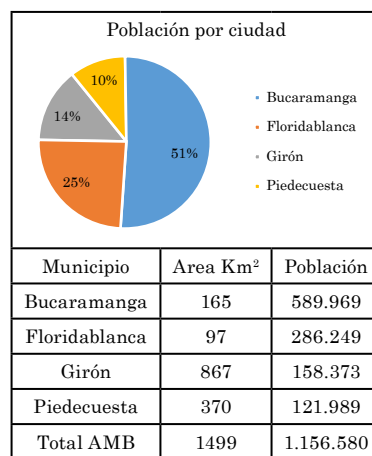


**Fig. 3.** Tercer carril construido en la zona del viaducto García Cadena 2016.  
**Fuente:** Autores.

Con la aplicación de modelos econométricos de elección discreta, se estudiarán los factores que influyen en un individuo haciendo viable la tarifa por congestión [4] en el sector entre Floridablanca y Bucaramanga, que constituye una de las vías saturadas de vehículos, que a pesar de haber contemplado alternativas a nivel municipal, como la implementación del pico y placa [5] [6] para restringir el uso del vehículos en la infraestructura vial, ha generado en la población medidas contraproducentes como, en este caso, la necesidad de comprar un auto adicional. Similarmente, ocurre con la integración de los modos de transporte público como alternativa complementaria al vehículo privado (SITM, taxis, bicicletas, buses de servicio público, entre otros) [7] [8], que siguen experimentando rezagos en las capacidades de la infraestructura vial para operar eficientemente. En este contexto, las técnicas de gestión de la demanda a implementar y fundamentadas en los estudios de casos desarrollados en otros países en los últimos años [9], han atraído la atención de muchas ciudades en Colombia, tales como Bogotá D.C, Medellín y Bucaramanga [8], pero a la fecha no han podido ser implementadas.

Analizando los casos internacionales, tales como los estudiados en Singapur, pioneros en la tasa por congestión [4], se tendrá una opción de influir en la utilización del vehículo privado y en el mejoramiento de la movilidad de las ciudades colombianas utilizando las vías existentes. Se trata, en realidad, de cobrar a los vehículo que congestionen “*Congestion Charging*” [10], sobre todo en las vías principales de la ciudad, donde se agudizan los problemas de congestión.

El experimento presenta las decisiones de los modos que el individuo selecciona al enfrentarse a un cobro por congestión desde el enfoque de una encuesta de *preferencias declaradas* (PD) aplicando estimaciones de modelos econométricos de tipo Logit multinomial y mixto que internalizaran los costos externos debido al uso del automóvil particular. Asimismo, se hace una fundamentación en la legislación colombiana, según la Ley 1450 de 2011 [11], la cual cita que los municipios o distritos con poblaciones mayores a 300.000 habitantes, podrán establecer tasas por uso de áreas de alta congestión para evitar congestión urbana, y el decreto 2883 de 2013 [12], el cual determina algunos criterios de áreas de alta congestión. Así, para el caso de Bucaramanga, se presenta la fig. 4.



**Fig. 4.** Población proyectada para el Área Metropolitana de Bucaramanga  
**Fuente:** Autores.

El estudio plantea un costo óptimo de tarificación para minimizar la congestión en el sector de la ciudad de Bucaramanga estudiado y disminuir los impactos negativos, que conllevarán a mejorar los servicios en términos de velocidad, tiempo y confort, creando con esto un modelo de ciudad más sostenible en lo ambiental y en lo social, priorizando el uso del transporte público sobre el privado e implementando soluciones complementarias para la movilidad peatonal y la utilización de medios de transportes no motorizados.

Es preciso indicar que la aplicación de la tarifa de peaje urbano como criterio de eficiencia en el transporte y movilidad se presenta como un argumento de difícil aceptación por parte de los ciudadanos afectados por el pago de la misma [13], para quienes ésta es percibida como un impuesto o tasa adicional que deben pagar por el uso de la infraestructura vial urbana, circunstancia que, además de provocar rechazo social, supone un importante factor de resistencia para las administraciones públicas por las implicaciones electorales negativas que podrían derivarse de su aplicación [14].

Un aspecto decisivo que ha contribuido notablemente a la aceptación social progresiva de estos sistemas se encuentra vinculado con la inversión de los fondos procedentes del peaje urbano en el fomento y desarrollo del transporte, y más concretamente con la percepción de mejoras reales y efectivas en el transporte público [15], así como también con la aceptación popular mediante referéndum “como el caso del peaje de Estocolmo tras el periodo de prueba”, factor muy significativo para evitar la elevada resistencia y oposición social sobre la medida cuando ésta es implantada de forma imperativa e inminente [16]. Los efectos sociales y su posible incidencia sobre la falta de equidad o justicia social constituyen igualmente un factor decisivo sobre la aceptación social [13], fundamentalmente por el potencial riesgo que estos sistemas presentan para generar efectos regresivos sobre las condiciones de movilidad, donde el pago de la tarifa de peaje puede provocar un efecto de exclusión social en el acceso al lugar de trabajo, educación u ocio sobre los estratos más bajos [17], solo proporcionando beneficios a los individuos que tienen capacidad económica para soportar el pago de la misma [18].

II. CONTEXTO DE ESTUDIO

El sector estudiado se localiza entre el Municipio de Bucaramanga y Floridablanca, más exactamente, en el tramo que conduce del intercambiador de la Puerta del Sol (Bucaramanga) hasta el puente Provenza (Floridablanca), localizado al sur de la ciudad de Bucaramanga y en la parte centro oriental del Área Metropolitana de Bucaramanga (fig. 5).



Fig. 5. Localización del tramo estudiado en el Área Metropolitana de Bucaramanga. Fuente: Autores.

La caracterización de los usuarios para la aplicación de la encuesta de preferencia declarada (PD), realizada a finales del año 2015, se centró en las variables socio-económicas de los usuarios que se

desplazan por el tramo vial observado. Se analizó el sexo, la edad, el estrato y la tenencia de vehículo particular entre otros. Asimismo, se determinaron tasas de viajes diarios por persona y por hogar [18]. Asimismo, se estimó la cantidad de hogares en el Área Metropolitana de Bucaramanga en 24.648, de los cuáles 73,81% corresponden a estratos medios, una cuarta parte a estratos bajos, y menos de 1% a estratos altos (fig. 6).

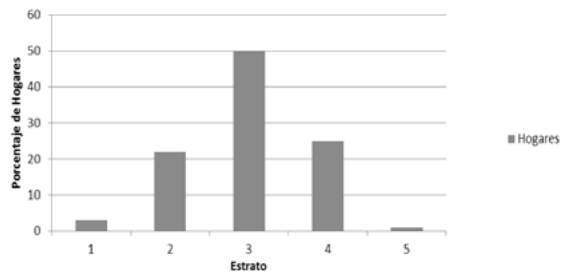


Fig. 6. Distribución de hogares según el estrato. Fuente: Autores.

Las limitaciones presentes en la investigación están relacionadas con la poca información a nivel nacional referente a los cobros por congestión, debido a que esta medida solo se está normalizando a través de decretos y leyes desde el 2011.

Se analizará el sector entre Bucaramanga y Floridablanca y viceversa, a la altura del viaducto García Cadena. El periodo de análisis para la estimación de los modelos es el de mayor flujo vehicular, como se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1. ESCENARIO ACTUAL SIN COBRO DE LA TASA POR CONGESTIÓN

| Descripción                          | Viajes B/ga - F/blanca                    | Viajes F/blanca - B/ga |
|--------------------------------------|---|------------------------|
| Cantidad de Viajes AMB               | 44905                                     | 44905                  |
| Porcentaje de Viajes                 | 7,63                                      | 17,55                  |
| Viaje Totales veh-mix                | 5426                                      | 7093                   |
| Horario de Maxima Demanda Vehicular  | 6:30 a 7:30; 12:00 a 13:00; 17:30 a 19:30 |                        |
| Capacidad viaducto Garcia C. Veh-mix | 4600                                      | 4600                   |
| Estado                               | Congestión                                | Congestión             |

Fuente: Autores.

La primera y más importante aplicación de los modelos que se pretenden obtener es durante la ocurrencia de la congestión donde se obstruye el paso, la circulación o el movimiento de algunos vehículos en razón que la demanda vehicular supera la capacidad de la vía [19]. Como complemento directo a la modelación, se contemplaron como alternativas de transporte privado los autos particulares, y como alternativas de transporte público, el taxi, los buses convencionales y el sistema de transporte masivo (Metrolínea).

APLICACIÓN DE MODELOS ECONÓMICOS PARA ESTIMAR LA  
ACEPTABILIDAD DE UNA TASA POR CONGESTIÓN VEHICULAR

TABLA 2. VELOCIDADES ZONA ANALIZADA PUENTE PROVENZA – PUERTA DEL SOL.

| Sentido Floridablanca - Bucaramanga |                   |                  |                    |                  |                    |
|-------------------------------------|-------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Inicio                              | Final             | Hora Punta(Km/h) |                    | Hora Valle(Km/h) |                    |
|                                     |                   | Autos            | Buses Convencional | Autos            | Buses Convencional |
| Provenza                            | CAI Motoreste     | 15               | 41                 | 41               | 40                 |
| CAI Motoreste                       | Antonia Santos    | 13               | 11                 | 26               | 21                 |
| Antonia Santos                      | Acceso carrera 33 | 15               | 11                 | 26               | 25                 |
| Acceso carrera 33                   | Puerta del Sol    | 18               | 15                 | 29               | 26                 |
| Sentido Bucaramanga - Floridablanca |                   |                  |                    |                  |                    |
| Inicio                              | Final             | Hora Punta(Km/h) |                    | Hora Valle(Km/h) |                    |
|                                     |                   | Autos            | Buses Convencional | Autos            | Buses Convencional |
| CAI Motoreste                       | Provenza          | 13               | 11                 | 42               | 30                 |
| Antonia Santos                      | CAI Motoreste     | 16               | 11                 | 39               | 24                 |
| Acceso carrera 33                   | Antonia Santos    | 24               | 14                 | 44               | 27                 |
| Puerta del Sol                      | Acceso carrera 33 | 26               | 39                 | 55               | 37                 |

Fuente: Autores.

Con relación a las velocidades promedio para el día más cargado en el sector, correspondiente al día viernes de la semana aforada, y ajustado de acuerdo a los cambios por la salida de los buses convencionales de transporte público y a la restricción del uso del carril solo bus a los vehículos privados, las velocidades resultantes promedio por periodo del día, diferenciando las horas puntas y las horas valle, se pueden observar en la Tabla 2.

#### A. Experiencias internacionales del cobro por congestión

Dada la gran preocupación existente por problemas como el cambio climático, la contaminación local y el caótico tráfico en las ciudades producto del transporte, se ha despertado el interés internacional por mecanismos para la reducción del uso del auto privado [20]. El auto privado no es un modo de transporte sostenible debido a la gran cantidad de efectos negativos que tiene para las ciudades, destacándose principalmente la congestión vehicular y la contaminación [21]. Una de las soluciones planteadas a nivel internacional para mitigar estas externalidades es la implementación de la tasa por congestión, que consiste en el cobro de una tarifa por parte del Estado para poder ingresar a ciertas zonas en ciertos horarios [22].

El debate del cobro por congestión ha evolucionado en los últimos años a medida que más esquemas se han aplicado y objetivos de la política han cambiado [23]. La implementación de la tasa por congestión ha mostrado no sólo la reducción de la congestión sino la consecución de otros objetivos, como la disminución de emisiones, la provisión de transporte público y un enfoque más equilibrado de los espacios urbanos [24].

Los incrementos de los costos en inversiones de infraestructuras viales para aliviar la congestión, así como las preocupaciones sobre el cambio climático y el impacto de las mejoras de ahorro de combustible en los ingresos sobre el consumo, dictan la necesidad de alejarse de los enfoques existentes de la construcción de más infraestructura vial [25]. La implementación de cobro por congestión a nivel internacional ha generado debates en muchas ciudades y países donde se ha discutido la tarificación. Sin embargo, no está del todo claro que la opinión pública mayoritaria esté en contra de la tarificación por congestión [14]; sobre todo si se acompaña de mejoras en alternativas de transporte. Es importante la participación positiva y activa de las entidades gubernamentales en el desarrollo de las etapas de diseño e implementación de esquemas cruciales, reforzados estos con la legislación que avale y reglamente la tarifa por congestión [9].

#### B. Contribuciones de la investigación

Plantear las primeras herramientas encaminadas a actuar sobre la demanda del transporte en Bucaramanga aprovechando las vías existentes, sin necesidad de construir más infraestructura vial, dar los parámetros para tasar un cobro por congestión según la aceptabilidad del individuo y las entidades de gobierno municipal. Éste puede no ser únicamente llegar a un punto óptimo de congestión, sino promover un cambio modal, es decir, generar recursos que permitan inversiones en otros modos más sostenibles, promoviendo un sistema más fiable y seguro mediante la estimación de la función costo de los usuarios.

Reconocer la importancia de la movilidad para facilitar la búsqueda del bienestar de las personas mediante la Ley 1450 de 2011, medidas integrales de administración de la demanda de viajes para mitigar el impacto de la congestión.

III. FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS

Para evaluar la demanda de transporte, además de los estudios tradicionales basados en encuestas de origen y destino utilizados, se recurre a *modelos de elección discreta cimentados en la teoría de la utilidad aleatoria*, que permiten abordar empíricamente el problema de modelación en el contexto de elecciones discretas [26]. Para su calibración, es necesario obtener datos mediante la aplicación de encuestas específicas, que pueden ser de preferencias reveladas (PR) o de preferencias declaradas (PD) [27], considerando la complejidad del proceso de elección [28]. Es así que se emplea el modelo teórico postulado para realizar las estimaciones y los pronósticos de aceptabilidad de los individuos con la implantación de una tasa por congestión.

En la función de utilidad se incluyen los atributos observados y también las constantes específicas (ACS), las cuales representan la influencia de atributos y características de los individuos no medibles u observables o no explícitas en la función de utilidad [19]. Según Train, la constante ACS para una alternativa recoge el efecto promedio sobre la función de utilidad de todos los factores no incluidos en el modelo [26]. La mayoría de las variables que inciden en la magnitud de la constante ACS están relacionadas con variables latentes como la seguridad, el confort, entre otras [29].

Es importante señalar que pueden obtenerse diferentes modelos, para este caso se analizarán dos modelos, dependiendo de los supuestos sobre la distribución de los errores ( $\epsilon$ ):

- El primero estará dado por la ecuación (1):

$$P_{jq} = \frac{\exp(\lambda \cdot V_{jq})}{\sum_{A_i \in A_{(q)}} \exp(\lambda \cdot V_{iq})} \quad (1)$$

Que corresponde al modelo *Logit simple o multinomial (MNL)*.

- El segundo estará dado por (2):

$$P_{jq}(\mathbf{g}) = \int \frac{\exp(\theta_{jq} X_{jq})}{\sum_{A_i \in A_{(q)}} \exp(\theta_{iq} X_{iq})} f(\theta | \mathbf{g}) d\theta \quad (2)$$

Que corresponde al modelo *Logit Mixto (ML)*.

El uso del modelo Logit mixto (ML), también conocido como Logit de componentes de error [30], permite definir funciones de utilidad altamente flexibles que pueden aproximarse tan cercanamente como se desee a cualquier modelo de utilidad aleatoria, e incluso, considerar una matriz de covarianza arbitraria. A diferencia del también conocido modelo Probit [31], el ML no está restringido a distribuciones normales; su derivación es directa y puede ser estimado en forma simple utilizando la técnica de máxima verosimilitud simulada [26]. El ML también permite considerar variaciones en los gustos a través de la especificación de parámetros aleatorios; esto es, el vector de

parámetros  $\theta q$  para cada individuo se puede expresar como la suma de la media poblacional  $\theta m$  y desviaciones individuales  $\eta q$ .

La ecuación (2) es difícil de resolver porque involucra integración múltiple, siendo necesario utilizar simulación, calculando las probabilidades logit simples  $\Lambda q$  para una serie de repeticiones  $N$  que en cada iteración  $n$  se utiliza un valor fijo de los parámetros  $\theta^{n/g}$ , extraído de la distribución  $F$ ; el estimador, consistente e insesgado y dos veces diferenciable, es el promedio de las anteriores. Por lo tanto, la probabilidad simulada se calcula según (3):

$$\hat{P}_{jq}(\mathbf{g}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Lambda_q(\theta^{n/g}) \quad (3)$$

Es común especificar la utilidad sistemática como lineal en los parámetros, ver (4):

$$V_{jq} = \theta X_{jq} \quad (4)$$

Donde  $\theta$  es un vector de parámetros de dimensión  $1 \times K$  y  $X_{jq}$  un vector de atributos de dimensión  $K \times 1$ . Las constantes específicas hacen parte del vector de atributos, tomando cada una de ellas el valor de 1 en la alternativa donde se especifica y cero en otro caso. La estimación del vector de parámetros requiere observaciones respecto de los atributos y de las elecciones de una muestra de  $Q$  individuos.

Los modelos desagregados o de elección discreta son una herramienta apropiada para enfrentar el problema de modelar, que además cuenta con una sólida base microeconómica [32]. Una de sus grandes ventajas sobre los modelos agregados tradicionales es la posibilidad de realizar análisis a nivel individual de elementos importantes para la evaluación de proyectos de transporte, como el valor subjetivo del tiempo (VST) o la disposición a pagar (DAP) por mejoras en diversas externalidades que afectan al sistema.

En particular, el valor subjetivo del tiempo (VST) corresponde a la tasa marginal de sustitución entre el tiempo percibido  $Ti$  (tiempo de viaje, de caminata o de espera, costo del suelo, entre otros) y el costo  $Ci$  a una utilidad constante.

El proceso de calibración del modelo consistirá en la estimación de los coeficientes  $\theta$  de (4), tomando como estimadores aquellos valores que maximicen la verosimilitud de la muestra utilizada [26]. Este proceso puede hacerse utilizando paquetes de cómputo comerciales o de uso libre como Biogeme (2008). La selección del mejor modelo se basa 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  $\rho^2$  [19] y el cálculo de test de razón de verosimilitud de los modelos más complejos frente a los más sencillos, que pueden obtenerse mediante restricciones de éste [33].



Una vez que el mejor modelo es elegido entre los dos analizados, puede emplearse para medir las disponibilidades a pagar por las variaciones en diferentes atributos, con especial atención a los ahorros de tiempo de viaje [34].

Ahora bien, para estimar la función del costo generalizado referente a la congestión, la función se expresa como la suma de varios costos (costos de operación vehicular, valor monetario del tiempo y peaje) que intervienen en la decisión que un individuo hace sobre la elección de un medio de transporte para ir de un sitio a otro. Su magnitud depende básicamente del tipo de vehículo y del valor monetario del tiempo empleado en dicho viaje, ver (ecuación 5):

$$g = p + v \cdot \tau + \theta \quad (5)$$

Siendo:

$g$  la disposición para pagar de los usuarios

$p, v, \tau, \theta$  el costo pagado por el usuario por cada viaje en forma de billete, peaje, flete, etc.

Para el cálculo de la estimación del costo generalizado se debe cuantificar el valor del tiempo, el cual se indicó anteriormente en la teoría microeconómica con modelos de elección discreta. Ahora, teniendo en cuenta las encuestas de preferencias declaradas para cuantificar el valor sujeto del tiempo (VST), se calcula el tiempo de viaje. Dentro del proceso de asignación de tráfico se utilizan las funciones flujo-demoras o de congestión, tal como la función del Bureau Public Roads (BPR, 1964), que en este caso se aplicaría según la ecuación (6).

$$t_a^0(q_a^0) = t_a^0 \cdot \left[ 1 + k \left( \frac{q_a^0}{c_a} \right)^\lambda \right] \quad (6)$$

Donde:

$t_a^0$  y  $q_a^0$ : corresponde al tiempo de viaje y flujo en el arco  $a$ ,

$t_a$ : es el tiempo de viaje a flujo libre

$c_a$ : es la capacidad práctica del arco  $a$ , la cual se determina empleando el manual de capacidad Highway Capacity Manual (2010)

$k$  y  $\lambda$ : son parámetros del modelo que deben calibrarse, por lo general se adoptan los valores de  $k = 0,15$  y  $\lambda = 4$  (Sheffi, 1985)

El costo social [35] hace referencia a la inconveniencia para la totalidad de los usuarios, en conjunto, de determinada situación o escenario. Para la sociedad, cada usuario que quiere utilizar la vía trae un costo que es equivalente a su costo interno (el del usuario) y el que él le genera a los demás. La figura 7 presenta las curvas de demanda, costo medio del usuario (CMe) y costo social marginal (CMe). En ésta se puede observar que CMe es mayor que CMe, debido a que CMe está compuesto por el costo individual (costo interno) más un componente que representa el costo adicional que cada individuo que utiliza el sistema les trae a los demás (costo externo) [36].

Es por esto que, en los periodos congestionados, resulta conveniente que los individuos internalicen los costos que le generan a los demás, y que la respuesta a esta internalización de costos sea una reasignación de recursos que permita optimizar la utilización del sistema. En la fig. 8., el punto C representa la situación en la cual los usuarios del sistema internalizan los costos por congestión, y lo hacen percibiendo  $p2$  que es mayor que lo que percibían en el equilibrio por costos medios del usuario  $p1$ . La diferencia entre  $p2$  y  $p3$  sería el cargo por congestión necesario para optimizar la asignación de recursos y, así, maximizar los beneficios que la sociedad tiene por la utilización de la infraestructura.

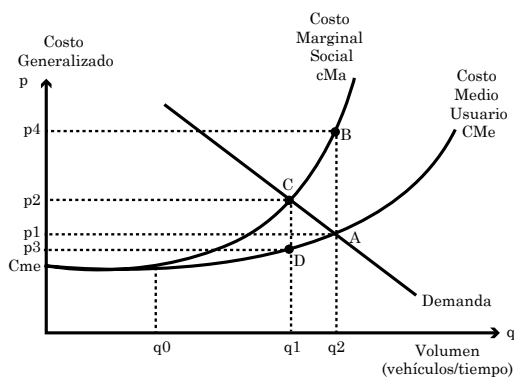


Fig. 7. Curva de demanda, costo medio del usuario y costo social marginal.

Fuente: Autores.

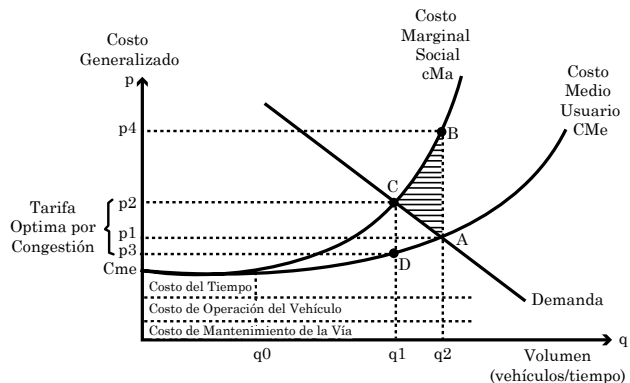


Fig. 8. Esquema típico de tarificación por congestión.

Fuente: Autores.

Desde el punto de vista social [10], el flujo  $q_2$  es excesivo porque recibe un beneficio de  $q_2A$ , pero impone los costos de  $q_2B$ . El flujo adicional más allá del óptimo  $q_1$  genera los costos  $q_2BCq_1$ , pero solamente disfruta del beneficio  $q_2ACq_1$ . Luego, la tarifa óptima que debe aplicarse para conseguir el flujo óptimo  $q_1$  y así internalizar los costos de congestión está dado por el segmento  $CD$ , obteniéndose una ganancia igual al área  $ABC$ , la cual representa el costo social de congestión o la pérdida de bienestar que ahorrará la sociedad. Para regular la congestión, esta teoría se basa en la tarificación del costo marginal y, aunque es cuestionada por Rothengatter [37], también es defendida por Nash [38] y tomada como punto de partida para internalizar varias externalidades.

En términos matemáticos  $C_{Ma}$  se define según la ecuación (7):

$$C_{Ma} = C_{Me} + q \cdot \frac{\partial C_{Me}}{\partial q} \quad (7)$$

Donde:

$C_{Ma}$ : costo marginal social

$C_{Me}$ : costo medio del usuario

$q$ : es la cantidad demandada

#### IV. ESPECIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN DEL MODELO

En el último medio siglo, la tarificación vial ha sido vista como una oportunidad para aprovechar los principios de la oferta y la demanda, situación que ayuda a gestionar el tráfico mediante la implementación de un cobro por congestión. Es así que la tarificación por congestión proporciona una herramienta adicional al Área Metropolitana de Bucaramanga para ayudar a gestionar la capacidad vial, reduciendo con esto la congestión y manteniendo las condiciones de tráfico de flujo libre en la vía urbana.

En el Área Metropolitana de Bucaramanga, el parque automotor ha adquirido elevadas tasas desde 2012, situación que la investigación ha focalizado mediante la propuesta de implementar un peaje urbano donde se cobre a los vehículos que entran en la zona de congestión. Utilizando el uso de técnicas de encuestas de preferencias declaradas, se ofrece la posibilidad de estudiar situaciones hipotéticas sin que éstas hayan sido implementadas.

El cobro por congestión a través de un peaje urbano ha generado importantes mejoras en la movilidad en algunas ciudades europeas y asiáticas [9], y su aplicación en Latinoamérica ya ha dado sus primeros avances como política de movilidad [12].

Con la aplicación de una encuesta de preferencia declarada (PD) se pretenderá experimentar un conjunto de situaciones hipotéticas enmarcadas en la realidad y casos internacionales referentes a la implementación del cobro por congestión en zonas urbanas, la situación que se estudiará será mostrar al individuo un escenario donde se ubica un peaje

en una vía urbana congestionada con velocidades no mayores a los 20 km/h con el objeto de cobrar una tasa a los autos particulares. Los cobros dinámicos en el peaje serán controlados por un identificador de radio frecuencia (TAG) que contiene un chip que guarda toda la información del usuario y el cual es ubicado en un sitio estratégico en el auto para ser leído por un radar ubicado en el pórtico *free flow* (flujo libre). Con este sistema se evitará que los vehículos se detengan para realizar sus pagos (fig. 9).



Porticos



Cámaras de Detección



Unidad instalada e Vehículo & Tarjeta



Central de Control y Operación

**Fig. 9.** Sistemas de tecnología aplicada en Singapur para el cobro por congestión.

**Fuente:** Autores.

Para la encuesta PD, el entrevistado hipotéticamente deberá elegir si tomaría la vía con peaje urbano, en la cual se variarían las características del viaje respecto al modo. Las variables explicativas se realizaron con base en la lectura de casos y referencias de bibliografía donde la medida ya fue implementada. Siguiendo el diseño del experimento planteado por Kocur, metodológicamente fueron identificadas tres (3) variables o atributos (tabla 3) según las alternativas consideradas: bus/metro, taxi o auto particular. Para éstas se tienen tiempo en minuto (min) y costos en pesos colombianos (COP) así: tiempo de viaje [Tv], costo de usar el modo [Cm], tiempo de espera [Te] y la tasa por congestión [Tc].



APLICACIÓN DE MODELOS ECONÓMICOS PARA ESTIMAR LA  
ACEPTABILIDAD DE UNA TASA POR CONGESTIÓN VEHICULAR

TABLA 3. NIVELES DE LAS VARIABLES EXPERIMENTALES.

| ALTERNATIVA BUS-METRO  |       |             |
|------------------------|-------|-------------|
| Variable               | Nivel | Descripción |
| Tiempo de Viaje (Min)  | 0     | 25          |
|                        | 1     | 30          |
|                        | 2     | 35          |
| Costo Modo COP         | 0     | 1850        |
|                        | 1     | 1900        |
|                        | 2     | 2000        |
| Tiempo de Espera (min) | 0     | 5           |
|                        | 1     | 10          |
|                        | 2     | 15          |

| ALTERNATIVA TAXI       |       |             |
|------------------------|-------|-------------|
| Variable               | Nivel | Descripción |
| Tiempo de Viaje (Min)  | 0     | 15          |
|                        | 1     | 20          |
|                        | 2     | 25          |
| Costo Modo COP         | 0     | 4800        |
|                        | 1     | 6800        |
|                        | 2     | 8000        |
| Tiempo de Espera (min) | 0     | 4           |
|                        | 1     | 6           |
|                        | 2     | 8           |

| ALTERNATIVA AUTO PARTICULAR |       |             |
|-----------------------------|-------|-------------|
| Variable                    | Nivel | Descripción |
| Tiempo de Viaje (Min)       | 0     | 15          |
|                             | 1     | 20          |
|                             | 2     | 25          |
| Costo Modo COP              | 0     | 300         |
|                             | 1     | 3500        |
|                             | 2     | 4000        |
| Tasa por Congestión(COP)    | 0     | 3500        |
|                             | 1     | 4500        |

Fuente: Autores.

Los niveles de variación de estos atributos fueron dos o tres dependiendo de la variable. Sistemáticamente se le asignaron tres niveles [0, 1 y 2] a las variables  $Tv$ ,  $Te$  y  $Cm$  para los transportes públicos taxi, bus y el vehículo particular. Para la

tasa por congestión [ $Tc$ ] se presentan dos niveles [0 y 1]. Con base en el número de variables y sus niveles, se seleccionó el Plan maestro 3 de las tablas de Kocur para el código del plan experimental 35a (Tabla 4), utilizando las columnas 1, 2, 3 y 8. De acuerdo con este diseño, el experimento tendrá una encuesta de un total de nueve 9 casos.

TABLA 4. TABLA DE KOCUR UTILIZANDO EL PLAN MAESTRO SEGÚN LAS VARIABLES Y LOS NIVELES.

| Tabla de Kocur   |            |
|--|------------|
| Código Plan Experimental No.   | 35a        |
| Total de variables ( $Tv$ , $Cm$ , $Te$ , $Tc$ )   | 4          |
| No. de variables con 2 niveles   | 1          |
| No. de variables con 3 niveles   | 3          |
| No. de preguntas PD  | 9          |
| Master Plan  | 3          |
| Número de columnas a usar  | 1, 2, 3, 8 |
| MASTER<br>PLAN 3: 9 trials<br><br>1 2 3 4 5 6 7 8<br>0 0 0 0 0 0 0 0<br>0 1 1 2 0 1 1 0<br>0 2 2 1 0 0 0 1<br>1 0 1 1 1 0 1 1<br>1 1 2 0 1 1 1 0<br>1 2 0 2 1 0 0 0<br>2 0 2 2 0 0 0 0<br>2 1 0 1 0 1 0 1<br>2 2 1 0 0 0 1 0 |            |

Fuente: Autores.

Variables explicativas principales a utilizar según la tabla 4.

*Tiempo de viaje [ $Tv$ ]*: es el que tarda una persona o vehículo en realizar el viaje desde su origen a su destino medido en minutos.

*Tiempo de espera [ $Te$ ]*: está dado por la frecuencia de algunas rutas evaluadas en el tramo de estudio medido en minutos.

*Costo de usar el modo [ $Cm$ ]*: en transporte público masivo (Metrolínea) corresponde a la tarifa integrada; en transporte público individual (taxi) es lo que cueste el recorrido en un radio de 6 km a la redonda en el AMB; en auto es el costo de usarlo, ya que éste consume combustible, desgasta las llantas, etc. en pesos colombianos (COP).

*Tasa por congestión [ $Tc$ ]*: es la tarifa por vehículo particular que un usuario tiene como opción de pagar si éste desea utilizar una vía congestionada. También se toma en pesos colombianos (COP).

Rangos de variación de las variables explicativas:

El  $Tv$  de la alternativa *bus/metro* varía entre 25 y 35 minutos. Este tiempo se determinó con base en las cifras arrojadas por el estudio realizado por la Universidad Industrial de Santander UIS para el diseño de ruta del BTR Metrolínea [39], donde se

calculó que el tiempo de viaje promedio en el Área Metropolitana de Bucaramanga es de 30 minutos. Para el caso del *taxi* y el *auto particular*, se consideraron los mismos tiempos con una variación de entre 15 y 25 minutos, puesto que se supone que el taxi, como medio de transporte público individual, requiere del mismo tiempo que un vehículo particular para ir de un origen a un destino.

El  $C_m$  para la opción *bus/metro* varía así: bus convencional \$1.850, el sistema de transporte masivo \$1.900, y para los buses ejecutivos se tiene un costo de \$2.000. Para la opción *taxi* se tuvo en cuenta la tarifa mínima, el banderazo y el costo por metros recorridos; así, para el diseño de la encuesta se calcularon los costos para distancias recorridas de 3 km hasta 6 km (\$4.800 hasta \$8.000, respectivamente), siendo distancias promedio razonables para un viaje dentro del Área Metropolitana de Bucaramanga. En el caso del *auto particular*, se consideraron los costos asociados al uso de vehículos, los cuales van desde \$3.000 a \$4.000.

El  $T_e$  para el *bus/metro* se definió con base en las frecuencias de algunas rutas de buses (4 a 8 minutos). Para la opción *taxi* se hizo un cálculo a partir de algunas experiencias en campo “esperando taxi” y a mediciones del tiempo de respuesta de un taxi pedido por teléfono (4 a 8 minutos). Para el caso de las alternativas con *auto particular* no se tuvo en cuenta esta variable puesto que la disponibilidad del modo es inmediata.

Por último, se consideró la variable  $T_c$ , la cual está únicamente asociada a la alternativa *auto particular* que involucra el pago de una tasa por congestión. Sus dos niveles se definieron en \$3.500 y \$4.500 como costos según casos internacionales y bibliografía nacional [6] [9] [40]. La tabla 5 presenta el diseño del experimento de elección para la encuesta de preferencia declarada en codificación binaria.

A. Etapas del diseño de la encuesta de preferencia declarada (PD)

1) Definición del ámbito de elección

Dado el interés por estimar la distribución de modos con la implementación de la tasa por congestión, se generaron escenarios hipotéticos de elección. En el formulario de la encuesta (ver anexo), el individuo debe escoger la alternativa de su conveniencia en atención a los atributos allí indicados, siendo una encuesta de tipo “elección”.

2) Aplicación de encuesta piloto

Este diseño preliminar fue probado mediante la realización de una prueba piloto realizada a los individuos que utilizan la vía Bucaramanga (Puerta del Sol) – Floridablanca (Cañaveral) y viceversa. La prueba piloto se diseñó como un juego de elección entre auto particular, transporte masivo y taxi; la alternativa *auto* se sustituyó por taxi o bus para aquellos individuos sin acceso al vehículo particular, garantizando así que el conjunto de elección fuese mutuamente excluyente, exhaustivo y finito [26]. El experimento trató todos los atributos modales con dos o tres niveles para las variables, obteniendo un total de 54 tratamientos. También se presentaron 9 preguntas con base en los criterios de diseño de Kocur y cumpliendo las exigencias de ortogonalidad, balance de niveles, traslape mínimo y balance de utilidades [41]. Para confirmar la eficiencia del diseño experimental propuesto se estimó preliminarmente un modelo MNL que permitió comprobar la consistencia de signos de los parámetros e incluso la importancia de algunos estimadores, a pesar de los pocos datos acopiados.

Tabla 5. DISEÑO PARA LA ENCUESTA DE PREFERENCIA DECLARADA.

| Diseño Ortogonal de efectos Principales |                       |                  |                        |                       |                  |                        |                       |                  |                           |
|---|-----------------------|------------------|------------------------|-----------------------|------------------|------------------------|-----------------------|------------------|---------------------------|
| CODIFICACION EN FORMA BINARIA           |                       |                  |                        |                       |                  |                        |                       |                  |                           |
| Tratamiento                             | BUS-METRO             |                  |                        | TAXI                  |                  |                        | AUTO PARTICULAR       |                  |                           |
|   | Tiempo de Viaje (Min) | Costo Modo (COP) | Tiempo de Espera (Min) | Tiempo de Viaje (Min) | Costo Modo (COP) | Tiempo de Espera (Min) | Tiempo de Viaje (Min) | Costo Modo (COP) | Tasa por Congestión (COP) |
| 1                                       | 0                     | 0                | 0                      | 0                     | 0                | 0                      | 0                     | 0                | 0                         |
| 2                                       | 0                     | 1                | 1                      | 0                     | 1                | 1                      | 0                     | 1                | 0                         |
| 3                                       | 0                     | 2                | 2                      | 0                     | 2                | 2                      | 0                     | 2                | 1                         |
| 4                                       | 1                     | 0                | 1                      | 1                     | 0                | 1                      | 1                     | 0                | 1                         |
| 5                                       | 1                     | 1                | 2                      | 1                     | 1                | 2                      | 1                     | 1                | 0                         |
| 6                                       | 1                     | 2                | 0                      | 1                     | 2                | 0                      | 1                     | 2                | 0                         |
| 7                                       | 2                     | 0                | 2                      | 2                     | 0                | 2                      | 2                     | 0                | 0                         |
| 8                                       | 2                     | 1                | 0                      | 2                     | 1                | 0                      | 2                     | 1                | 1                         |
| 9                                       | 2                     | 2                | 1                      | 2                     | 2                | 1                      | 2                     | 2                | 0                         |

Fuente: Autores.

3) Aplicación de la encuesta

El tamaño muestral para aplicar las encuestas definitivas se calculó para cada parámetro tomando un 95% de nivel de confianza, así como los valores preliminares estimados con el modelo MNL y su error estándar asintótico [19] [42], evaluando la ecuación (8).

$$N = \frac{t_k^2 \cdot se_1^2 \cdot (\theta_k)}{\theta_k^2} \quad (8)$$

Donde:

$N$  = tamaño de la muestra

$t_k$  = t-estadístico, obtenido de la regresión en la prueba piloto

$se_1$  = error estándar, obtenido de la regresión en la prueba piloto

$\theta_k$  = valor del coeficiente de la variable más restringida, obtenido de la regresión en la prueba piloto

En este caso, la variable más restringida correspondió al tiempo de espera, encontrando que el tamaño muestral debe ser de 2053 observaciones, es decir, unos 228 individuos como mínimo, ya que cada encuestado contribuye en la muestra total con una cantidad de 9 observaciones, igual al número de opciones hipotéticas contestadas; teóricamente, éste sería el tamaño muestral mínimo a considerar [42], tal como se muestra en la tabla 6.

TABLA 6. CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA (N) TENIENDO EN CUENTA LOS PARÁMETROS DE REGRESIÓN.

| Tamaño Muestral (N)   |         |                         |     |
|---|---------|-------------------------|-----|
| $N = \frac{t_k^2 se_1^2 (\beta_k)}{\beta_k^2}$  |         |                         |     |
| Se evalúa el parámetro más restringido, el cual corresponde a Tiempo de espera: $\theta Te$ |         |                         |     |
| Coefficiente  | Valor   | Detalle                 |     |
| $t_k^2$   | 45,1584 | T-test                  |     |
| $se_1^2$  | 9,3636  | Std-err                 |     |
|   |         |                         |     |
| $(\beta_k)$   | 0,206   | Value                   |     |
| $\beta_k^2$   | 0,04244 | Value                   |     |
|   |         |                         |     |
| $N =$   | 2053    | Tratamiento o preguntas | 9   |
|   |         | Cantidad de encuestas   | 228 |

Fuente: Autores.

Siendo así, se realizaron 2053 observaciones en 3 sitios distintos referidos a universidades y centros comerciales presentes en el tramo observado, utilizando una técnica de muestreo sistemático presentando al individuo el diseño final de la encuesta tal como se muestra en fig. 10.






| Alternativa 1   |  |         |                 |
|---|--|---------|-----------------|
|   | BUS-METRO  | TAXI    | AUTO PARTICULAR |
|  Tiempo de Viaje (Min)     | 25 Min   | 15 Min  | 15 Min          |
|  Costo Modo (COP)          | \$1.850  | \$4.800 | \$3.000         |
|  Tiempo de Espera (Min)    | 5 Min  | 4 Min   | -               |
|  Tasa por Congestión (COP) | -  | -       | \$3.500         |

Fig. 10. Tarjeta tipo de los escenarios alternativos presentados al individuo.

Fuente: Autores.

El planteamiento del modelo está ligado al proceso de elección de acuerdo con el nivel de decisiones; de esta manera, en los modelos tipo Logit multinomial (MNL) y mixto (MXL) se toman las decisiones a un mismo nivel (Fig. 11).

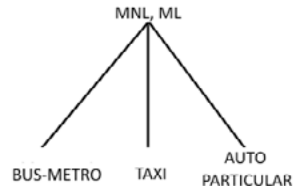


Fig. 11. Representación gráfica del nivel de elección.

Fuente: Autores.

Una vez especificado el modelo se prosiguió con la modelación a través del software Biogeme versión 2.2. El primer paso fue modelar con las dos bases de datos (con y sin lexicográficos) para analizar los resultados y validar la hipótesis sobre la conveniencia de usar bases de datos depuradas. Lo cual arrojó que es ideal aplicar una base de datos depurada.

Siendo así, la estimación de los parámetros se realizó configurando distintas especificaciones sumando o restando variables al modelo, tanto para el MNL como para el modelo MXL.

B. Estimación del modelo

Se plantearon varios modelos de elección discreta para elegir el mejor ajuste y significancia de sus coeficientes, de esto se prefirió la elección de un modelo Logit mixto en lugar de un modelo MNL, ya que la evidencia existente de los modelos MNL indica que con éste se pueden obtener estimaciones sesgadas de los parámetros de las funciones de utilidad, induciendo, además, cálculos erróneos de varias tasas marginales de sustitución [43]. Las alternativas de transporte utilizadas se identificaron así: 1: bus, 2: taxi y 3: auto particular. La especificación de las funciones de utilidad fue estrictamente lineal para cada una de las alternativas de transporte, y fueron usadas en algunos modelos variables latentes, tal como se muestra en las ecuaciones (9) a (11).

Estimación del primer modelo MNL<sub>1</sub>

$$\begin{aligned}
 V_{BUS} &= ASC_{BUS} + \theta_{Tv} \cdot Tviaje_{BUS} + \theta_{Te} \cdot Tespera_{BUS} + \theta_{Cm} \cdot Cmodo_{BUS} + \epsilon_{BUS} \\
 V_{TAXI} &= ASC_{TAXI} + \theta_{Tv} \cdot Tviaje_{TAXI} + \theta_{Te} \cdot Tespera_{TAXI} + \theta_{Cm} \cdot Cmodo_{TAXI} + \epsilon_{TAXI} \\
 V_{AUTO} &= ASC_{AUTO} + \theta_{Tv} \cdot Tviaje_{AUTO} + \theta_{Cm} \cdot Cmodo_{AUTO} + \theta_{Te} \cdot Tcong_{AUTO} + \epsilon_{AUTO}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Estimación del tercer modelo MNL<sub>2</sub>

$$\begin{aligned}
 V_{BUS} &= ASC_{BUS} + \theta_{Tv} \cdot Tviaje_{BUS} + \theta_{Te} \cdot Tespera_{BUS} + \theta_{Cm} \cdot Cmodo_{BUS} + \epsilon_{BUS} \\
 V_{TAXI} &= ASC_{TAXI} + \theta_{Tv} \cdot Tviaje_{TAXI} + \theta_{Te} \cdot Tespera_{TAXI} + \theta_{Cm} \cdot Cmodo_{TAXI} + \epsilon_{TAXI} \\
 V_{AUTO} &= ASC_{AUTO} + \theta_{Tv} \cdot Tviaje_{AUTO} + \theta_{Cm} \cdot Cmodo_{AUTO} + \theta_{Te} \cdot Tcong_{AUTO} + \theta_{Sexo} \cdot Sexo_{AUTO} + \theta_{Estrato} \cdot Estrato_{AUTO} + \epsilon_{AUTO}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Estimación del quinto modelo MXL<sub>1</sub>

$$\begin{aligned}
 V_{BUS} &= ASC_{BUS} + (\theta_{Tv} \cdot \sigma_{BUS}) \cdot Tviaje_{BUS} + \theta_{Te} \cdot Tespera_{BUS} + \theta_{Cm} \cdot Cmodo_{BUS} + \epsilon_{BUS} \\
 V_{TAXI} &= ASC_{TAXI} + (\theta_{Tv} \cdot \sigma_{TAXI}) \cdot Tviaje_{TAXI} + \theta_{Te} \cdot Tespera_{TAXI} + \theta_{Cm} \cdot Cmodo_{TAXI} + \epsilon_{TAXI} \\
 V_{AUTO} &= ASC_{AUTO} + (\theta_{Tv} \cdot \sigma_{AUTO}) \cdot Tviaje_{AUTO} + \theta_{Cm} \cdot Cmodo_{AUTO} + \theta_{Te} \cdot Tcong_{AUTO} + \epsilon_{AUTO}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

C. Estimación del costo generalizado

Con la aplicación de la tabla 1 y la ecuación 6 al arco comprendido entre Floridablanca y Bucaramanga, se obtienen la ecuación (12) y fig. 12 de la función flujo - demora:

$$t = 0,000000002 \cdot q^2 - 0,0000003 \cdot q + 0,2501 \tag{12}$$

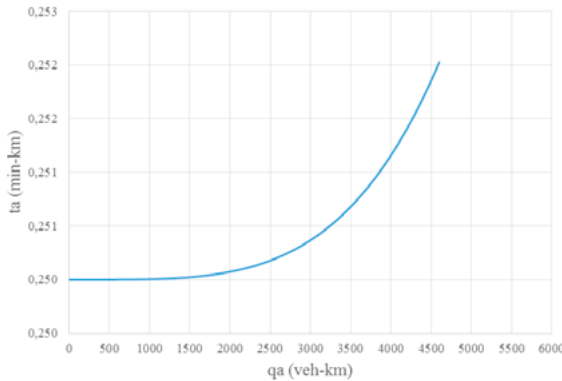


Fig. 12. Función flujo-demora para el arco Floridablanca - Bucaramanga.

Fuente: Autores.

• ESTIMACIÓN DE LA FUNCIÓN COSTO MEDIO USUARIO CMe(q)

Para los usuarios del vehículo particular, la función del costo medio CMe(q) se estima en función del uso de las vías q (veh-km), se expresa en pesos por cada vehículo\*kilometro y tiene los siguientes dos componentes:

- Una constante que considera los costos de operación y los costos de estacionamiento del vehículo privado.
- Una parte variable que es el producto del tiempo de viaje por el valor del tiempo.

Para el análisis del arco correspondiente a la zona en estudio se tiene que la parte constante de la función del costo medio está dada por la siguiente tabla:

TABLA 7. VALOR POR KILÓMETRO PARA LA CONSTANTE DEL COSTO MEDIO CMe(q).

| Fuente de consulta                                  | Detalle                        | Valor asignado |
|---|--------------------------------|----------------|
| Cantillo Maza, V. (2011) <sup>1</sup>               | Costo de operación Veh \$/km   | 315,79         |
| Encuesta de movilidad Bogotá D.C, 2011 <sup>2</sup> | Costo de estacionamiento \$/km | 133            |
| Valor total constante \$/km CMe(q)                  |                                | 448,79         |

<sup>1</sup> Modelo para el cálculo de la tarifa en equipos de transporte.

<sup>2</sup> Alcaldía de Bogotá D.C

Fuente: [44] [45].

Por otro lado, la parte variable del modelo considera un valor del tiempo por vehículo de 282,75 \$/min a partir del modelo obtenido en la encuesta de preferencia declarada (PD) realizada para estimar la influencia de cobro de la tasa por congestión a los vehículos que congestionan la vía. De igual manera, se tienen que el valor del tiempo de utilizar un taxi compartido es de 222 \$/min [46]. Con estos valores promediados se obtiene el valor medio del tiempo, el cual es equivalente a 252,37 \$/min. Considerando todo lo anterior, se obtuvo la función del costo medio del usuario CMe de la zona (ver ecuación 13).

$$\begin{aligned}
 CMe &= \left( 448,79 \frac{\$}{km} \right) + \left( 0,0000002 \cdot q^2 - 0,0000003 \cdot q + 0,2501 \right) \frac{\text{min}}{\text{km}} \cdot 252,37 \frac{\$}{\text{min}} \\
 CMe &= 0,0000505 \cdot \frac{\$}{km} \cdot q^2 - 0,00007571 \cdot \frac{\$}{km} \cdot q + 511,90 \frac{\$}{km} \tag{13}
 \end{aligned}$$

• ESTIMACIÓN DE LA FUNCIÓN COSTO MARGINAL SOCIAL CMa(q)

La curva de costo marginal social CMa(q), refleja tanto los costos que enfrenta un usuario de la vía como el costo que éste impone a los demás usuarios por transitar en la vía. La función del costo marginal social CMa se deduce de la curva de costo medio de usuario CMe(q) y es igual a la suma de la función CMe y su derivada multiplicada por el uso de la vía q, aplicando la ecuación (7) se tiene:

$$CMa = 0,00050474 \cdot \frac{\$}{km} \cdot q^2 - 0,00025237 \cdot \frac{\$}{km} \cdot q + 511,90 \frac{\$}{km}$$

• ESTIMACIÓN DE LA FUNCIÓN DE DEMANDA

La estimación de la función de la demanda para el análisis de caso en el modelo de elección modal según la encuesta de presencia declarada (PD) desarrollada arrojó la función lineal expresada por la ecuación (14):

APLICACIÓN DE MODELOS ECONÓMICOS PARA ESTIMAR LA ACEPTABILIDAD DE UNA TASA POR CONGESTIÓN VEHICULAR

$$P = -2,6516 \cdot q + 34290 \quad (14)$$

Una vez definido cada componente de costo generalizado se obtiene la figura 13:

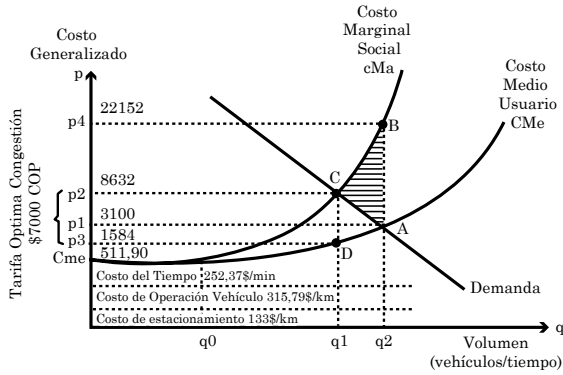


Fig. 13. Tarifación basada en costos marginales de congestión bajo el criterio de *first-best*. Fuente: Autores.

IV. RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN

Analizando los modelos obtenidos de las encuestas de preferencia declaradas (PD) y trabajando con un total de 2053 observaciones, en la tabla 8 se resumieron los resultados de estimación de los modelos obtenidos mediante la técnica de maximización de la verosimilitud junto a cada parámetro estimado donde se muestra el estadístico *t* en la parte baja de cada coeficiente de las variables y, al final, se presenta los test de bondad de ajuste que permitieron elegir el mejor modelo.

De los modelos analizados, el que presentó mejor ajuste fue el modelo de coeficientes aleatorios  $MXL_1$ , el cual arrojó los siguientes resultados:

1. Los parámetros de todas las variables explicativas que representan incidentes tienen el signo correcto (negativo), y una adecuada significancia estadística (todos significativos al 95% de confianza) (Tabla 9).

Tabla 8. COEFICIENTES ESTIMADOS PARA LOS MODELOS ANALIZADOS.

| Coeficientes Estimados para los Modelos Analizados   |                    |                      |                  |                                   |
|--|--------------------|----------------------|------------------|-----------------------------------|
| Descripción  | Notación Parámetro | Modelo Logit binario |                  | Modelo de coeficientes aleatorios |
|  |                    | MNL <sub>1</sub>     | MNL <sub>2</sub> | MXL <sub>1</sub>                  |
| Constante específica tasa por congestión - Bus/metro | ASC <sub>1</sub>   | -1,08                | -0,98            | -1,12                             |
|  |                    | -2,97                | -2,95            | -2,14                             |
| Constante específica tasa por congestión - Taxi      | ASC <sub>2</sub>   | -1,71                | -1,14            |                                   |
|  |                    | -2,15                | -1,87            | -1,96                             |
| Constante específica tasa por congestión - Auto      | ASC <sub>3</sub>   | -                    | -                | -                                 |
|  |                    | -                    | -                | -                                 |
| *Media de la variable aleatoria Costo Modo           | $\theta_{cm}$      | -0,000192            | -0,000333        | -0,000216                         |
|  |                    | -1,95                | -2,13            | -2,96                             |
| *Media de la variable aleatoria Tasa por Congestión  | $\theta_{Tc}$      | -0,000318            | -0,000355        | -0,000284                         |
|  |                    | -4,35                | -4,43            | -4,78                             |
| *Media de la variable aleatoria Tiempo espera        | $\theta_{Te}$      | -0,373               | -0,369           | -0,663                            |
|  |                    | -8,27                | -8,42            | -8,72                             |
| *Media de la variable aleatoria Tiempo de Viaje      | $\theta_{Tv}$      | -0,0702              | -0,0764          | -0,0803                           |
|  |                    | -3,65                | -3,75            | -4,55                             |
| *Medida de la variable latente Sexo                  | $\theta_{sexo}$    | -                    | 0,746            | -                                 |
|  |                    | -                    | 4,09             | -                                 |
| *Medida de la variable latente Estrato               | $\theta_{estr}$    | -                    | 0,629            | -                                 |
|  |                    | -                    | 1,79             | -                                 |
| *Media de la variable aleatoria Tiempo de Viaje      | $\sigma_{Tv}$      | -                    | -                | 0,0835                            |
|  |                    | -                    | -                | 8,32                              |
| Rho cuadrado   | $\rho^2$           | 0,358                | 0,367            | 0,371                             |
| Log-verosimilitud en convergencia                    | L(θ)               | -2215,114            | -2214,213        | -2214,944                         |
| Observaciones  | n                  | 2053                 | 2053             | 2053                              |

\* si  $\theta_k$  es significativamente distinto de cero. Así, si  $t > 1,96$  para un 95% de confianza se rechaza la hipótesis nula  $\theta_k = 0$  y se acepta que el atributo  $X_k$  tiene un efecto significativo.

Fuente: Autores.

TABLA 9. SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA Y SIGNOS ESPERADOS.

| Ranking | Modelo           | Signos Hipótesis | Significancia test $t \geq  1,96 $ | $\rho^2$ | L( $\theta$ ) |
|---------|------------------|------------------|------------------------------------|----------|---------------|
| 1       | MNL <sub>1</sub> | si               | si                                 | 0,358    | -2215,114     |
| 2       | MNL <sub>2</sub> | si               | si                                 | 0,367    | -2214,213     |
| 3       | MNL <sub>3</sub> | si               | si                                 | 0,371    | -2214,944     |

Fuente: Autores.

- Los parámetros asociados a las elecciones de los modos fueron ordenados de mayor a menor (en valor absoluto). Se observa que el parámetro que genera un mayor impacto sobre la elección del modo es la “media de la variable aleatoria tiempo de espera  $\theta_{Tc}$ ”, cuyo parámetro tiene un valor estimado de -0.663. Este resultado se interpreta como una reducción promedio en la elección del modo dada su disponibilidad.
- El análisis de los resultados consolidados en la Tabla 9, referente al modelo de coeficientes aleatorios MXL<sub>1</sub>, obtaríamos por escoger el de mejor ajuste en función de sus variables y parámetros con una confianza mayor al 95% del t estadístico ( $t > 1,96$ ). Siendo así, el modelo predictivo para plantear criterios para viabilizar el cobro por congestión de algunas vías saturadas de vehículos en Bucaramanga, en la cual se determinaría la elección de los modos para la tasa por congestión según los modelos dados sería la expresada en la Ecuación (11):

$$(11)$$

$$V_{BUS} = -1,12 - 0,0803 \cdot Tviaje_{BUS} - 0,663 \cdot Tespera_{BUS} - 0,000216 \cdot C modo_{BUS}$$

$$V_{TAXI} = -1,64 - 0,0803 \cdot Tviaje_{TAXI} - 0,663 \cdot Tespera_{TAXI} - 0,000216 \cdot C modo_{TAXI}$$

$$V_{AUTO} = -0,0803 \cdot Tviaje_{AUTO} - 0,000216 \cdot C modo_{AUTO} - 0,000284 \cdot Tcong_{AUTO}$$

- La tasa marginal de sustitución entre el tiempo de viaje y el costo, es decir, el valor subjetivo del tiempo de viaje “ $VST = \theta_{Tiempo} / \theta_{Costo}$ ” resultó ser consistente con los resultados obtenidos en estudios anteriores. En el caso del modelo MXL<sub>1</sub>, el valor del tiempo para los individuos que decidan pagar la tasa por congestión ( $T_c$ ), para lo cual se utiliza la relación  $\theta_{T_c} / \theta_{T_c}$ , se ubicó en 282,75 COP/min. En dicho caso, la valoración estuvo cercana a las que habían sido reportadas en estudios previos [47].
- Ahora bien, teniendo en cuenta la probabilidad de uso del vehículo particular con la implementación del cobro de la tasa por congestión en condiciones donde el tiempo de viaje es equivalente a 25 min se tendrá una reacción de los individuos que utilizan el uso del vehículo por el corredor Bucaramanga - Floridablanca (N-S) y Floridablanca - Bucaramanga (S-N), en la cual, para desestimular el uso del auto particular, se deberían cobrar \$7.000 COP, el cual correspondería a una probabilidad del *uso del auto particular*

del 31,3%. Con referencia a este comportamiento, se puede decir que las políticas del Gobierno, que fijan el cobro de la tasa de congestión, están estimadas por lo menos en 5 veces el costo del transporte público (\$9.500 COP) [48] y constituyen una política que no se ajusta a la percepción de los usuarios y la disponibilidad de pago en Bucaramanga (ver tabla 10).

TABLA 10. ESCENARIO DE COBRO DE LA TASA POR CONGESTIÓN.

| ESCENARIO CON COBRO DE TASA POR CONGESTIÓN |                        |                        |
|--|------------------------|------------------------|
| Descripción                                | Viajes B/ga - F/blanca | Viajes F/blanca - B/ga |
| Aplicación de Tasa por Congestión          | \$ 7.000,00            | \$ 7.000,00            |
| Probabilidad, Uso del Auto Particular (%)  | 31,30                  | 31,30                  |
| Viajes realizados con Tasa por congestión  | 1165                   | 1643                   |
| Capacidad viaducto García C. veh-mix       | 2895                   | 4275                   |
| Estado                                     | Sin Congestión         | Sin Congestión         |
| Recaudo mensual estimado                   | \$ 244.671.084,74      | \$ 344.992.523,19      |
| Recaudo mensual dos sentidos (COP)         | \$ 589.663.607,93      |                        |
| Recaudo anual dos sentidos (COP)           | \$ 7.075.963.295,14    |                        |

Fuente: Invias.

## VI. CONCLUSIÓN

Con esta investigación se identificó la tarifa que refleja lo más fielmente posible el costo social marginal y los costos generalizados de cada viaje en términos de los impactos en los demás. Para lo cual, la cantidad de vehículos mixtos que pasan actualmente por el viaducto García Cadena 7.093 veh-km ignoran las externalidades que imponen a los demás. Si consideramos el costo marginal debido a la congestión, para lo cual se tiene que la demanda actual es excesiva, los usuarios disfrutaban del beneficio a un costo de \$3.100 COP, pero imponen a los demás unos costos de \$22.152 COP.

Luego la tarifa óptima que debe aplicarse para conseguir el flujo óptimo y también internalizar los costos de congestión según la capacidad del viaducto García Cadena está dado a imponer al usuario una tasa por congestión de \$7.048 COP, aproximadamente \$7.000 COP. Esta tasa Pigouviana equipara el beneficio social marginal y el costo social marginal *CMA*, en el nivel eficiente de tráfico de 4600 veh-km, aproximadamente. Al lograr este equilibrio se produce la maximización del bienestar social (enfoque *first-best*).



Con la implementación del cobro por congestión en el viaducto García Cadena se estarían generando, en primera instancia, el bienestar social y la internalización de los costos, y un ingreso anual estimado en \$7.075'963.295,14 COP (2'465.492,43 USD), el cual deberá ser redistribuido en una mejora permanente y en medidas innovadoras que conduzcan al fortalecimiento del transporte público y el transporte no motorizado. Esto debe ser complementado en las zonas más aisladas mediante la integración tarifaria del sistema de transporte público, es decir, no es necesario que el servicio de transporte intermunicipal entre a la zona de congestión. De igual manera, se deben implementar aparcamientos tipo *Park & Ride*, el cual permitiría el intercambio a otros modos de transporte.

Para brindar la libertad de viajar, antes de introducir una tasa por congestión, se debe tener claridad en el establecimiento de rutas alternas y la modificación del reparto modal para que el usuario tenga las dos alternativas de elección.

Con la aceptación de los usuarios se logra una redistribución efectiva de beneficios, es decir, en la medida en que los usuarios entren a la zona de congestión de la vía urbana sujetas a peaje, su bienestar se verá aumentado, al complementarse con medidas de apoyo a medios de transporte más “eficientes” con el modo no-motorizado (rutas de caminata, ciclo vías, etc.).

Finalmente, se debe fortalecer el fundamento jurídico con la reglamentación y creación de un Sistema Nacional de Identificación Electrónica Vehicular, que permitirá, en principio, el pago electrónico de peajes urbanos y los cobros por congestión en las ciudades. Para ello, todos los vehículos deberán estar provistos de un dispositivo (TAG) que permita su plena identificación a través de lectura con cámaras o sensores.

## VII. FINANCIACIÓN

Artículo de investigación derivado del proyecto de investigación con código 069-0814-2300 titulado “Criterios para viabilizar el cobro por congestión de algunas vías saturadas de vehículos en Bucaramanga”. Proyecto financiado por la Universidad Pontificia Bolivariana. Fecha de inicio: 14 de julio 2014. Fecha de terminación: 3 de marzo 2016.

## REFERENCIAS

- [1] X. Montañez, “Congestión vehicular, con tendencia a empeorar”, Bucaramanga: Vanguardia.com, 2010. <http://www.vanguardia.com/historico/50701-congestion-vehicular-con-tendencia-a-empeorar>
- [2] Concejo Municipal, Plan de Desarrollo Económico, Social y de Obras Públicas “Bucaramanga capital sostenible”, Bucaramanga: Alcaldía Municipal, 2012.
- [3] C. Bueno, Informe Plan de Manejo de Tráfico, Metro línea, Bucaramanga: Anónima, 2008.
- [4] C. Rivasplata, “Congestion pricing for Latin America: Prospects and constraints”, *Research in Transportation Economics*, vol. 40, no. 1, pp. 56-65, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2012.06.037>
- [5] H. Posada, “Analisis of “Pico y Placa” as Vehicular Circulation Restriction in Medellín - Based on Traffic Volumes”, *Dyna*, vol. 78, no. 165, pp. 112-121, 2011.
- [6] C. Calderón, “Estrategias tarifarias y desestimulación del uso del vehículo particular por medio del pico y placa en Medellín”, *Ingeniería Universidad de Medellín*, vol. 8, no. 14, pp. 95-110, 2009.
- [7] Cal y Mayor, “Formulación del Plan Maestro de Movilidad para Bogotá, D.C., Tránsito y Transporte”, Bogotá: Secretaria de Tránsito de Bogotá, 2006.
- [8] A. Gómez, “Control de la congestión vehicular en Bogotá con herramientas microeconómicas”, *Desarrollo y Sociedad*, no. 35, 1995.
- [9] E. Pozueta, “La experiencia internacional en peajes urbanos”, Instituto Juan de Herrera. Madrid, España: FASTER, 2008.
- [10] M. Salas, “Gestión de la movilidad mediante tarifas”, *Rev. de ing.*, vol. 1, no. 29, p. 8, 2009.
- [11] Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Ley Número 1450, Colombia, 2011.
- [12] Ministerio de Transporte, Decreto 2883, Colombia, 2013.
- [13] J. Viegas, “Making urban road pricing acceptable and effective: Searching”, *Transp. Policy*, no. 8, pp. 289-294, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(01\)00024-5](https://doi.org/10.1016/S0967-070X(01)00024-5)
- [14] J. Muñoz, “Disponibilidad y accesibilidad en el transporte público madrileño como garantía de equidad social ante la aplicación de un peaje urbano para la ciudad de Madrid”, *Investigación europea de dirección y economía*, no. 20, pp. 47-54, 2013.
- [15] D. Albalade y G. Bel, “What local policy makers should know about urban road charging: Lessons from worldwide experience”, *Public Administration Review*, vol. 69, no. 5, pp. 962-975, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6210.2009.02045.x>
- [16] J. Schade y M. Baum, “Reactance or acceptance? Reactions towards the introduction of road pricing”, *Transportation Research*, vol. 41, no. 1, pp. 41-48, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2006.05.008>
- [17] B. Schlag y U. Teubel, “Public acceptability of traffic demand management in Europe”, *Traffic Engineering & Control*, vol. 41, pp. 314-318, 1997.
- [18] G. Giuliano, “Equity and Fairness Considerations of Congestion Pricing”. In *Curbing Gridlock: Peak-period fees to relieve traffic congestion*, Transportation Research Board Special Report 242, vol. 2, pp. 250-279, Washington DC: National Academy Press, 1994.
- [19] J. Ortuzar y L. G. Willumsen, *Modelling Transport*, Fourth Edition. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2011. <https://doi.org/10.1002/9781119993308>
- [20] R O’Ryan y L Larraguibel, “Contaminación del aire en Santiago: estado actual y soluciones”, *Centro de Economía Aplicada*, Universidad de Chile., no. 75, 2000.
- [21] A. Bull y I. Thomson, “La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales”, *Rev. CEPAL*, no. 76, pp. 109-121, 2002.
- [22] M. Börjesson, J. Eliasson, M. B. Hugosson y K. Brundell-Freij, “The Stockholm congestion charges—5 years on. Effects acceptability and lessons learnt”, *Transport Policy*, vol. 20, pp. 1-12, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.11.001>
- [23] C. Munro, “The evolution of road pricing: past, present and future”, in Australian Road Forum (ARF) National Roads Summit, Sydney/Australia, 2008.
- [24] J. Ferrando, “El peaje urbano de Londres”, *Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*, no. 177, pp. 68-75, 2011.
- [25] D. Newbery, *Road user and congestion charges. Theory and practice of excise taxation: smoking, drinking, gambling, polluting, and driving*. Oxford: Sijbren Cnossen, 2005.

- [26] E. Kenneth y K. Train, *Discrete Choice Methods with Simulation*, Second Edition. United Kingdom, USA: Cambridge University Press, 2003.
- [27] D. Hensher, J. Louviere y J. Swait, "Combining Sources of Preference Data", *Journal of Econometrics*, vol. 89, no. 1-2, pp. 197-221, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0304-4076\(98\)00061-X](https://doi.org/10.1016/S0304-4076(98)00061-X)
- [28] V. Cantillo y J. Ortúzar, "A Semi-compensatory Discrete Choice Model with Explicit Attribute Thresholds of Perception", *Transportation Research*, parte B, vol. 39, no. 7, pp. 641-657, 2005.
- [29] E. Cherchi y J. Ortuzar, "On fitting mode specific constants in the presence of new options in RP/SP models", *Transportation Research*, parte A, vol. 40, pp. 1-18, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.04.002>
- [30] D. McFadden y K. Train, "Mixed MNL models for discrete response", *Journal of Applied Econometrics* 15, pp. 447-470, 2000. [https://doi.org/10.1002/1099-1255\(200009/10\)15:5<447::AID-JAE570>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/1099-1255(200009/10)15:5<447::AID-JAE570>3.0.CO;2-1)
- [31] C. Daganzo, *Multinomial Probit: The Theory and its Applications to Demand Forecasting*. Nueva York: Academic Press, 1979.
- [32] D. McFadden, "Econometric models of probabilistic choice", in *Structural Analysis of Discrete Data: With Econometric Applications*. Cambridge, Mass: MIT Press, 1981.
- [33] M. Ben-Akiva y S.R. Lerman, *Discrete Choice Analysis. Theory and Application to Travel*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, vol. 9, 1985.
- [34] A. Orro, "Modelos de elección discreta en transportes con coeficientes", tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de A Coruña, Coruña, 2005.
- [35] J. Simón, "La influencia de las externalidades en la economía del bienestar: El enfoque tradicional", *Cuadernos de economía: Spanish Journal of Economics and Finance*, vol. 15, no. 43, pp. 239-268, 1987.
- [36] G. Santos, "Externalities and economic policies in road transport", *Research in Transportation Economics*, vol. 28, no. 1, pp. 2-45, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2009.11.002>
- [37] W. Rothengatter, "How good is first best? Marginal cost and other pricing principles for user charging in transport", *Transport Policy*, vol. 10, no. 2, pp. 121-130, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(02\)00063-X](https://doi.org/10.1016/S0967-070X(02)00063-X)
- [38] C. Nash, "Marginal cost and other pricing principles for user charging in transport: a comment", *Transport Policy*, vol. 10, no. 4, pp. 345-348, 2003. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2003.09.004>
- [39] Universidad Industrial de Santander, "Elaboración de la matriz actual origen – destino de viajes y diseño de rutas para las fases II, III y IV del sistema Metrolínea," Bucaramanga, 2011.
- [40] A. Pardo y J. Mosquera, "Implementación de una tarifa para reducir la congestión," Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, 2012.
- [41] K. Zwerina, J. Huber y W. Kuhfeld, "A General Method for Constructing Efficient Choice Designs", 2015.
- [42] M. Bliemer y J. Rose, "Constructing efficient stated choice experimental designs". *Transport Reviews*, no. 29, pp. 587-617, 2009.
- [43] P. Bhatta y O. Larsen, "Errors in variables in multinomial choice modeling: A simulation study applied to a multinomial logit model of travel mode choice," *Transport Policy*, vol. 18, no. 2, pp. 326-335, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.10.002>
- [44] L. Marquez y V. Cantillo., "Evaluación de los parámetros de las funciones de costo en la red estratégica de transporte de carga para Colombia", *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 29, no. 2, 2011.
- [45] Secretaria distrital de movilidad de Bogotá, "Servicios integrales para la movilidad", 2011. web: [https://www.simbogota.com.co/index.php?option=com\\_content&view=article&id=229:sdm-entrega-resultados-de-la-encuesta-de-movilidad-para-bogota-2011&catid=57:prensa&Itemid=272](https://www.simbogota.com.co/index.php?option=com_content&view=article&id=229:sdm-entrega-resultados-de-la-encuesta-de-movilidad-para-bogota-2011&catid=57:prensa&Itemid=272)
- [46] J. Jiménez y M. Salas, "Análisis experimental de los factores que influyen en un individuo para viajar en taxi compartido", in XVII Congreso chileno de ingeniería de transporte, Chile, 2015.
- [47] Small, Kenneth A.; Yan, Jia, "The value of "value pricing" of roads: Second-best pricing and product differentiation", *Journal of Urban Economics*, vol. 49, no. 2, pp. 310-336, 2001.
- [48] Consejo Nacional de Planeación, "Plan nacional de desarrollo 2014-2018", CNP, Bogota D.C., 2014.

### **ANÁLISIS DE ELECCIÓN DE MODO TENIENDO EN CUENTA LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN UN INDIVIDUO CON LA VIABILIZACIÓN DEL COBRO POR CONGESTIÓN**

Se pretende experimentar un conjunto de situaciones hipotéticas enmarcadas en la realidad y casos internacionales referente a la implementación del cobro por congestión en zonas urbanas, la situación que se estudiará será mostrar al individuo un escenario donde se ubica un peaje urbano en una vía congestionada con velocidades no mayores a 20 km/h, con el objeto de cobrar una tasa a los autos particulares que congestionan la vías, los cobros dinámicos en el peaje serán controlados por un identificador de radio frecuencia (TAG) que contiene un chip que guarda toda la información del usuario y el cual es ubicado en un sitio estratégico en el auto para ser leído por un radar ubicado en el pórtico *free flow* (flujo libre), con este sistema se evitará que los vehículos se detengan para realizar sus pagos.

Esta encuesta esta orientada a establecer que factores influyen en un individuo frente a la viabilización de un cobro por congestión en una vía saturada de vehículos y como se distribuyen los modos de transporte públicos y privados.

Las variables a considerar en el experimento son:

Tiempo de Viaje, Tiempo de Espera, Costo del modo a utilizar (Bus, Taxi o Auto particular), Tasa por Congestión.



**ENCUESTA PARA ESTUDIAR EL  
IMPACTO DE UN PEAJE URBANO EN LA DISTRIBUCIÓN DE LOS MODOS  
DE TRANSPORTES**

**CONFIDENCIAL:** Los datos que la UPB solicita en este formulario son estrictamente confidenciales y en ningún caso tienen fines distintos al objeto de la encuesta.

**OBJETIVO:** Estudiar experimentalmente las decisiones que tomarían los individuos frente a la implementación de una tasa por congestión y la distribución de los modos de transportes.

**A. IDENTIFICACIÓN Y CONTROL DE LA ENCUESTA**

Encuestador: \_\_\_\_\_ Ciudad: \_\_\_\_\_ Fecha: 

|    |    |    |
|----|----|----|
| DD | MM | AA |
|----|----|----|

1. Edad: 

|  |  |
|--|--|
|  |  |
|--|--|

 2. Sexo: 

|   |   |
|---|---|
| M | F |
|---|---|

3. Último nivel educativo aprobado:

Primaria  Bachillerato  Técnico/tecnológico  Universitario  Posgrado  Otro  NR

4. Estrato socioeconómico de la familia:

1  2  3  4  5  6  NR

5. Motivo de Viaje mas Frecuente:  Estudio  Trabajo  Negocios  Otra  NR

6. Seleccione su nivel de ingreso mensual :

0-500.000  500.001-1.000.000  1.000.001-2.000.000  2.000.001-4.000.000  mas de 4.000.001 8.

7. Viaja solo o acompañado(a):  Solo(a)  Acompañado(a)

8. Estaría dispuesto a Compartir un Taxi  SI  NO

9. Cambiaría usted el pico y placa en vías saturada de autos por un cobro por congestión:

SI  NO

10. Donde Preferiría usted invertir parte de los recaudos obtenidos de la tasa por congestión:

Mejoramiento de Vías Alternas  Construcción de Nuevas Vías  Mejoramiento del Transporte Público Existente  
 Construcción de Ciclo Vías

11. El costo del transporte del Metrolinea en relación al servicio que brinda es:

Bajo  Razonable  Alto  Exagerado  NR

12. De las alternativas siguientes cual cambiaría por la Tasa por congestión:

Sobre Tasa de la Gasolina  Valorización  Impuestos de Rodamiento



ENCUESTA PARA ESTUDIAR EL  
IMPACTO DE UN PEAJE URBANO EN LA DISTRIBUCIÓN DE LOS MODOS  
DE TRANSPORTES  
Marzo de 2015

**CONFIDENCIAL:** Los datos que la UPB solicita en este formulario son estrictamente confidenciales y en ningún caso tienen fines distintos al objeto de la encuesta.

**OBJETIVO:** Estudiar experimentalmente las decisiones que tomarían los individuos frente a la implementación de una tasa por congestión y la distribución de los modos de transportes.

### B. CARACTERÍSTICAS DEL VIAJE

Encuestador: \_\_\_\_\_ Fecha: 

|    |    |    |
|----|----|----|
| DD | MM | AA |
|----|----|----|

13. Cómo califica los siguientes aspectos del servicio:

A. Confort (1: Poco Cómodo, 5: Muy Cómodo)

B. Probabilidad de ocurrencia de accidente (1: Muy probable, 5: Poco probable)

| ALTERNATIVA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------|---|---|---|---|---|
| BUS         |   |   |   |   |   |
| TAXI        |   |   |   |   |   |
| METROLINEA  |   |   |   |   |   |
| AUTO        |   |   |   |   |   |

| ALTERNATIVA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------|---|---|---|---|---|
| BUS         |   |   |   |   |   |
| TAXI        |   |   |   |   |   |
| METROLINEA  |   |   |   |   |   |
| AUTO        |   |   |   |   |   |

### C. ENCUESTA DE PREFERENCIA DECLARADA

Suponga que en la vía Bucaramanga (Puerta del Sol) hacia Floridablanca (Cañaveral). Se instala un peaje urbano y usted tiene la posibilidad de utilizar su vehículo todo el día pero debe pagar una tarifa por congestión a través del peaje urbano que se cobra por medios electrónicos.

En esa situación, escoja una de las alternativas (para cada caso) para realizar su viaje de acuerdo a sus preferencias (BUS-METRO, TAXI, AUTO PARTICULAR). Por favor intente vivir las circunstancias planteadas, evalúe cada una de esas situaciones independientemente de las demás y responda con **LA MAYOR SINCERIDAD POSIBLE** que modo utilizaría.

1.  BUS /METRO  TAXI  AUTO PARTICULAR
2.  BUS /METRO  TAXI  AUTO PARTICULAR
3.  BUS /METRO  TAXI  AUTO PARTICULAR
4.  BUS /METRO  TAXI  AUTO PARTICULAR
5.  BUS /METRO  TAXI  AUTO PARTICULAR
6.  BUS /METRO  TAXI  AUTO PARTICULAR
7.  BUS /METRO  TAXI  AUTO PARTICULAR
8.  BUS /METRO  TAXI  AUTO PARTICULAR
9.  BUS /METRO  TAXI  AUTO PARTICULAR