



Cobros por congestión como alternativa al “pico y placa” en las ciudades Colombianas: Caso Medellín

Por

Raúl Alfonso Ramos Guerrero

Ingeniero Civil, Universidad del Norte (2009)

Presentado al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental en el cumplimiento de los requisitos para el grado de:

Magister en Ingeniería Civil

Énfasis en Vías y Transporte

Universidad del Norte

Bajo la supervisión de:

Víctor Cantillo Maza y

Julián Arellana Ochoa

Barranquilla, Junio 2015



Agradezco a mi familia por su apoyo incondicional, a Víctor Cantillo por incentivar me a tomar este camino y a Ana María Loaiza y José David Díaz por su confianza y por darme la oportunidad de trabajar en el tema que me apasiona.

TABLA DE CONTENIDO

1	El “pico y placa” como medida de gestión de la demanda.....	10
1.1	Bogotá.....	10
1.2	Medellín.....	13
1.3	Medidas de restricción a la circulación de vehículos en Latinoamérica.....	16
1.4	Análisis económico del de pico y placa.....	17
2	La política de cobros por congestión.....	21
2.1	Complicaciones en la teoría del cobro por congestión.....	21
2.2	Tipos de esquemas de cobro por congestión.....	23
2.2.1	Basados en infraestructura (Facility-based).....	23
2.2.2	Cordones.....	24
2.2.3	Esquema zonal.....	24
2.2.4	Sistemas mixtos.....	25
2.2.5	Diferenciación temporal.....	25
2.3	Aceptación de la medida.....	26
2.4	Cobros por congestión en América Latina.....	27
2.5	Cobros por congestión en Colombia.....	28
2.5.1	Sistema de cobro por congestión de Bogotá.....	29
2.5.2	Cobros por congestión en Medellín.....	32
3	modelación de demanda para escenarios con cobro por congestión en Medellín.....	34
3.1	Modelos híbridos de elección discreta con variables latentes.....	34
3.2	Descripción de la base de datos.....	38
3.3	Estructura del modelo.....	42
3.3.1	Ecuaciones de medición.....	43
3.3.2	Ecuaciones estructurales.....	44
3.3.3	Especificación de modelos.....	45
3.3.4	Estimación del modelo.....	47
3.4	Resultados del modelo.....	47
3.5	Análisis de resultados.....	53
3.5.1	Calculo de Elasticidades.....	55
3.6	Propuesta de un esquema de cobro por congestión para Medellín.....	61

3.6.1	Horario de aplicación de la medida.	61
3.6.2	Zona de cobro	64
3.6.3	Políticas complementarias al cobro por congestión	66
4	Conclusiones.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Parque automotor total de la ciudad de Bogotá	11
Figura 2 Evolución de a) Nuevos autos registrados y b) Producto interno bruto en Bogotá y el resto de Colombia.....	12
Figura 3 Porcentaje de utilización del transporte público y particular en Bogotá.....	12
Figura 4 Evidencia del número de la placa como atributo en el mercado de vehículos.....	13
Figura 5 Porcentaje de utilización de auto, motocicleta y transporte público en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá años 2000, 2005 y 2012.....	14
Figura 6 Vehículos registrados por año en Medellín (punto de referencia año 2004 = 100)	15
Figura 7 Tiempo promedio de viaje en 2005 y 2012.....	15
Figura 8 Equilibrio del mercado y óptimo social en una vía congestionada.....	18
Figura 9 Equilibrio después de aplicar una medida de restricción	19
Figura 10 Equilibrio a largo plazo después de aplica una restricción vehicular	20
Figura 11 Zona sugerida para el cobro por congestión en Bogotá	30
Figura 12 Mecanismo de cobro del sistema de cobro por congestión de Bogotá	31
Figura 13 Diagrama general del modelo híbrido.....	37
Figura 14 Diagrama del modelo híbrido	43
Figura 15 Variación de la elasticidad de la demanda con respecto a la tarifa por congestión para individuos de ingreso alto.....	56
Figura 16 Variación de la elasticidad de la demanda con respecto a la tarifa por congestión para individuos de ingreso medio.....	56
Figura 17 Variación de la elasticidad de la demanda con respecto a la tarifa por congestión para individuos de ingreso bajo.....	57
Figura 18 Variación de la elasticidad de la demanda con respecto a <i>TS_Antes</i>	57
Figura 19 Variación de la elasticidad de la demanda con respecto a <i>TS_Despues</i>	58
Figura 20 Variación de la probabilidad de elección con respecto a la tarifa por congestión	59
Figura 21 Variación de la probabilidad de elección con respecto a <i>TS_Antes</i>	60
Figura 22 Variación de la probabilidad de elección con respecto a <i>TS_Despues</i>	60
Figura 23 Probabilidad de elección para el Escenario (1): 7:00 am a 8:30 am	61
Figura 24 Probabilidad de elección para el Escenario (3): 6:00 am a 8:30 am	62
Figura 25 Probabilidad de elección para el Escenario (3): 6:00 am a 9:00 am	62
Figura 26 Zona de pico y placa de Medellín	65
Figura 27 Zona de cobro por congestión propuesta	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cambios modales porcentuales al cobrar \$COL 6.500 (Hora pico).....	31
Tabla 2 Cambios en veh-km y veh-min al cobrar 6.500 (hora pico).....	32
Tabla 3 Características socioeconómicas de la muestra.....	39
Tabla 4 Promedio tiempo de viaje y tarifa	40
Tabla 5 Variables y niveles de la encuesta de preferencias declaradas.....	40
Tabla 6 Indicadores de percepción usados para la estimación	42
Tabla 7 Variables ecuaciones estructurales de las variables latentes	44
Tabla 8 Variables de las ecuaciones estructurales de las variables latentes	45
Tabla 9 Variables del Modelo de elección	46
Tabla 10 Utilidades representativas de las alternativas	46
Tabla 11 Parámetros θ_{ik} y β_{jl} del modelo híbrido y del modelo MNL.....	48
Tabla 12 Parámetros α_{jlr} de las ecuaciones estructurales	49
Tabla 13 Desviaciones estándar σ_{jp} de las ecuaciones de medición	51
Tabla 14 Parámetros γ_{jlp} ecuaciones de medición	52
Tabla 15 Valores del tiempo por nivel de ingreso.....	53
Tabla 16 Signo de los Parámetros α_{jlr} significativos de las ecuaciones estructurales.....	54

RESUMEN

Con el objetivo de reducir los efectos negativos de la congestión, la mayoría de las grandes ciudades colombianas han optado por implementar una política de restricción de la circulación vehicular basada en el último dígito de la placa denominado “pico y placa”. Sin embargo, al hacer una revisión de los estudios realizados sobre el tema y de la evolución de las tasas de motorización y utilización de vehículos particulares en las ciudades de Bogotá y Medellín (pioneras en la implementación del “pico y placa”), resulta evidente que la medida reduce la congestión sólo en el corto plazo y que en el mediano y largo plazo incentiva la compra de un segundo vehículo, con lo cual resurgen los problemas de movilidad. Un análisis económico del equilibrio entre oferta y demanda demuestra la ineficiencia de las políticas de restricción vehicular y prueba que la mejor forma de alcanzar un óptimo social es aplicando el cobro de la externalidad generada por la congestión.

Ante el evidente fracaso del “pico y placa”, algunas ciudades Colombianas han empezado a estudiar la posibilidad eliminar esta restricción a la circulación y remplazarla por una política de cobros por congestión. La ciudad de Bogotá ha realizado avances en la estructuración de un esquema zonal para el centro de la ciudad; sin embargo, la medida ha sido rechazada en dos oportunidades por el concejo de la ciudad. Medellín realizó un estudio de viabilidad de la medida, realizando una encuesta de preferencias declaradas para un escenario con cobros por congestión, pero a la fecha no se han presentado mayores avances en el tema.

Los problemas para la implementación de políticas de cobros por congestión no son exclusivos de las ciudades colombianas. A pesar del consenso entre economistas y expertos en transporte acerca de las bondades de los cargos por congestión, la política sólo ha sido implementada en un puñado de ciudades de países con alto nivel de desarrollo. Esto se debe a algunos problemas prácticos que la teoría convencional pasa por alto, a la dificultad que representa elegir el esquema de cobro más adecuado para cada ciudad y principalmente a los bajos niveles de aceptación entre el público en general y entre los tomadores de decisiones.

Con el fin de elaborar una herramienta de análisis de la demanda que contribuya a realizar la transición del pico y placa hacia políticas de tarificación vial en las ciudades Colombianas, se estimó a partir de la base de datos del estudio de viabilidad de un esquema de cobros por congestión de Medellín, un modelo de elección discreta incluyendo las variables latentes con el cual se analizan diferentes opciones de implementación, evaluando el impacto sobre la demanda de la nueva política.

En este orden de ideas, el objetivo de la investigación es evaluar la influencia factores de la política de cobro por congestión como la tarifa y los horarios de cobro sobre la demanda. Además, se evalúa el efecto de la percepción de las variables latentes seguridad, comodidad y confiabilidad sobre la utilización de los modos de transporte público disponibles en la

ciudad (Bus, Metro y Taxi), la disposición de usar el auto en los horarios de aplicación de la medida y la disposición por cambiar el horario del viaje para evitar el cobro.

Finalmente, basado en el análisis de las políticas de “pico y placa” y cobros por congestión, y en los resultados de la estimación del modelo de elección discreta se hace una propuesta de un esquema zonal de cargos por congestión para la ciudad de Medellín. La propuesta incluye los horarios más convenientes de aplicación de la medida para el periodo pico de la mañana, un rango de tarifas deseable, las zonas que deberían ser tarifadas y algunas medidas complementarias que deberían ser adoptadas.

INTRODUCCIÓN

La congestión vehicular y las externalidades asociadas a ella, se han convertido en un problema creciente en la mayoría de las ciudades de los países en vías de desarrollo. En Colombia, debido al crecimiento económico, se ha incrementado la posesión y el uso del vehículo particular de un 18% en 2002 a un 29% en 2012, con la consecuente disminución del uso del transporte público de un 73% a un 51% en el mismo periodo (Ipsos Napoleón Franco, 2012). Esta tendencia se ha consolidado a pesar de los avances realizados en materia de transporte público con la construcción de sistemas tipo BRT en todas las ciudades de más de un millón de habitantes y la implementación de sistemas estratégicos en las ciudades intermedias.

Con el fin de mitigar el impacto de la congestión, la ciudad de Bogotá optó por implementar una política de restricción a la circulación basada en el último dígito de la placa del vehículo conocida como “pico y placa”. Debido al aparente éxito de la medida, al menos en sus etapas iniciales, su aplicación se extendió a otras ciudades de Colombia como Medellín, Cali, Bucaramanga, Cúcuta, Pereira y Cartagena, entre otras. A pesar de que la evidencia empírica indica que en Bogotá y Medellín la medida solo tuvo un impacto positivo en el corto plazo y que de hecho, en el mediano y largo plazo, han aumentado las tasas de nuevos vehículos matriculados y el uso del vehículo particular (Cantillo & Ortúzar, 2014).

Ante el evidente fracaso de las políticas de restricción vehicular, las ciudades de Bogotá y Medellín han empezado a estudiar la posibilidad de eliminar el “pico y placa” y reemplazarlo por una política de cobros por congestión. La teoría económica que sustenta esta política data de la década de 1920, cuando Pigou (1920) y Knight (1924) hicieron importantes contribuciones acerca de la inadecuada asignación de recursos que resulta de un acceso gratuito a la red vial. La razón fundamental detrás de este fenómeno son las externalidades asociadas al transporte: si hay congestión, cada viaje adicional en la red obliga a otros usuarios a reducir su velocidad y por lo tanto a tener mayores tiempos de viajes. En ausencia de un cobro, un conductor no tiene que pagar por el costo adicional que impone a los otros; cuando este costo es ignorado el mercado falla, pero esta situación puede ser corregida mediante el cargo de una tarifa (Rouwendal & Venhoef, 2006).

Aunque la mayoría de los planificadores de transporte y economistas están de acuerdo en que la tarificación de la congestión es la mejor y tal vez la única forma de reducir la congestión vehicular, los tomadores de decisión (nivel político) la ven como un complicado nuevo cobro a algo que siempre ha sido gratis (King, Manville, & Shoup, 2007). En otras palabras se asume que los conductores no están dispuestos a pagar por usar sus vehículos en horas pico, incluso si esto conlleva a una reducción en los tiempos de viaje para todos los usuarios de la vía. Este rechazo inicial de la medida por parte del público en general y por consiguiente de los tomadores de decisiones se convierte en el principal problema a superar para la implementación de un esquema de cobros por congestión.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar los resultados del pico y placa, y elaborar una herramienta de análisis de la demanda que contribuya a realizar la transición de este tipo de políticas hacia esquemas de cobros por congestión en las ciudades Colombianas. Para esto el documento se divide en cuatro secciones:

En el primer capítulo se realiza una revisión de la política del “pico y placa” y se presentan las estadísticas de tasa de motorización y utilización de vehículo particular y los resultados de diversos estudios realizados en las ciudades de Medellín y Bogotá. También se realiza una breve revisión de medidas de restricción vehicular implementadas en otras ciudades de Latinoamérica.

Posteriormente se hace un análisis económico de la política de “pico y placa” y se muestra que la implementación de esta medida tiene como consecuencia una pérdida social asociada a la imposibilidad de utilizar el auto aun cuando existe una disposición por hacerlo. Finalmente usando los mismos supuestos que en el análisis del “pico y placa” se demuestra que para lograr alcanzar un equilibrio social se requiere cobrar una tarifa adicional relacionada con las externalidades.

En el segundo capítulo se hace un análisis detallado de la política de cobro por congestión, haciendo énfasis en las dificultades que no han permitido que esta se extienda más allá de un número limitado de ciudades del primer mundo. En primer lugar se presentan una serie de complicaciones que la teoría convencional pigouviana pasa por alto y que hacen que la implementación de la medida no sea tan sencilla como esta sugiere. A continuación se hace una revisión de los diferentes esquemas de implementación del cobro por congestión y se aborda el problema de la elección del más adecuado basado en sus ventajas y desventajas.

Posteriormente se presenta el tema de la aceptación de la medida por parte del público en general y de los tomadores de decisiones. Además, se realiza una revisión de los resultados de más de 20 estudios diferentes sobre esta problemática y se elaboran algunas recomendaciones al respecto.

Sigue el capítulo con una exploración de las dificultades que hacen que la implementación de políticas de cobros por congestión sea aún más complicada en Latinoamérica y con una breve descripción del esquema de peajes diferenciados por niveles de congestión que han sido implementados en dos autopistas urbanas en Santiago de Chile.

Para finalizar esta sección, se presentan los resultados de la estructuración del sistema de cobro por congestión de Bogotá y del estudio de viabilidad del cobro por congestión de Medellín; y se explica el estado actual de los planes de implementación de la medida en ambas ciudades.

En el tercer capítulo se estima un modelo de elección discreta con variables latentes en un escenario con cobros por congestión a partir de la encuesta de preferencias declaradas y le medición de indicadores de percepción realizados en el marco del estudio de viabilidad de cobros por congestión de Medellín. El objetivo es analizar el impacto de la tarifa, los

horarios de cobro y la percepción de seguridad, comodidad y confiabilidad sobre la disposición a usar el auto pagando el cobro por congestión, cambiar el horario de viaje para evitar el cobro o usar los modos de transporte público disponibles en la ciudad.

El capítulo inicia con una descripción de los modelos de elección discreta con variables latentes y continuas con una descripción de la base de datos usada para la estimación. Posteriormente se presenta la estructura del modelo, con las variables socioeconómicas de los individuos y las variables de las alternativas usadas en las ecuaciones estructurales y de medición, se presentan los resultados de la estimación, se calculan valores del tiempo y elasticidades de la demanda y se hace un análisis de los resultados obtenidos.

Posteriormente se propone un esquema de cobros por congestión zonal para la ciudad de Medellín, considerando lo presentado en segundo capítulo. Se usa el modelo de elección discreta para evaluar el comportamiento de la demanda ante variaciones de la tarifa, para tres escenarios de horarios de aplicación de la medida durante el periodo pico de la mañana. Basado en las áreas actuales de donde aplica el pico y placa, los usos de suelo y la oferta vial, se propone una zona de la ciudad donde sería factible la implementación de un esquema de cargos por congestión.

En el cuarto y último capítulo del informe se presentan las conclusiones relevantes y se hacen una serie de recomendaciones a consultores y tomadores de decisiones que deseen diseñar e implementar una política de cobros por congestión en las ciudades Colombianas.

1 EL “PICO Y PLACA” COMO MEDIDA DE GESTIÓN DE LA DEMANDA

A continuación se presenta una revisión de la evidencia empírica y de varios estudios que muestran que en el mediano y largo plazo la política de “pico y placa” no ha cumplido el objetivo de reducir la congestión vehicular por la cual fue implementada, analizando los casos específicos de Bogotá y Medellín. Ante la ausencia de datos de velocidades o niveles de servicio en las principales vías u otros indicadores que sirvan para evaluar en forma directa el impacto de la medida, se usan datos de tasas de motorización, partición modal y flujos vehiculares para hacer el análisis de la situación antes y después de la aplicación y sucesivas ampliaciones de la política. También se hace una revisión de los estudios realizados sobre la efectividad de medidas similares implementadas en Santiago de Chile, Ciudad de México y Sao Paulo

Posteriormente se presenta un análisis económico del “pico y placa” que explica la ineficacia de las políticas de restricción a la circulación y se introduce la necesidad de cambiar este tipo de medidas por esquemas de cobros por congestión.

1.1 Bogotá

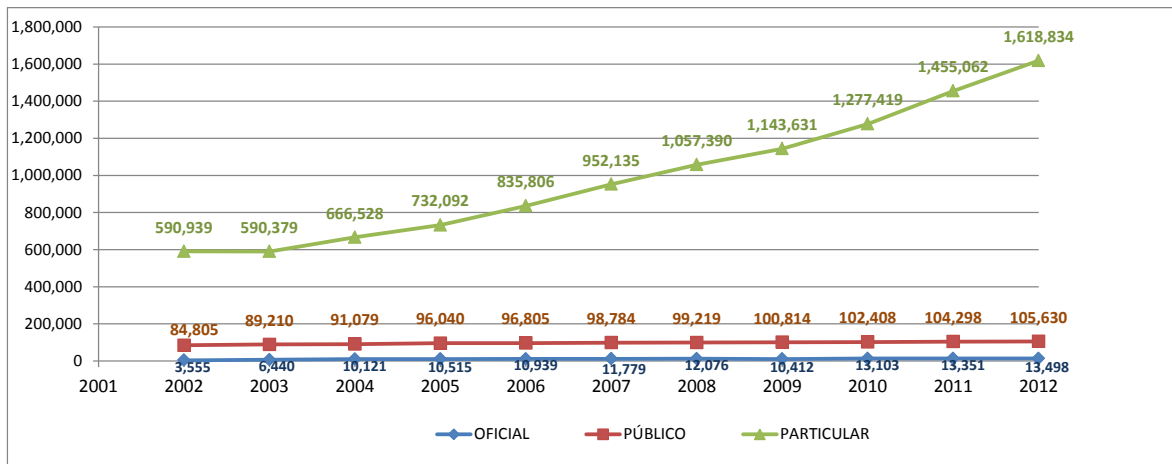
El pico y placa fue adoptado en la ciudad de Bogotá como una medida transitoria en 1998, con el fin de reducir los niveles de congestión durante las horas pico e incentivar el uso del sistema BRT de la ciudad y de la creciente red de ciclorutas que se encontraba en construcción. Inicialmente la medida restringía la circulación de un 20% de los vehículos entre las 7:00 y las 9:00 am y entre las 5:30 y las 7:30 pm durante los días de semana basándose en el último dígito de la placa del vehículo.

La medida se ha mantenido en el tiempo y en el año 2002 la restricción se extendió a un 40% de los vehículos y progresivamente se fueron ampliando los horarios de restricción hasta que en 2009 la medida se implementó de 6:00 am a 8:00 pm. Desde 2012 la restricción abarca el 50% de los vehículos particulares entre las 6:00 am y las 8:30 am y entre las 3:00 pm y las 7:30 pm y el 20% de los taxis entre las 5:30 am y las 9:00 pm. Debido a problemas relacionados con la accidentalidad se está estudiando la posibilidad de agregar una restricción similar a la circulación de motocicletas.

Desafortunadamente la Alcaldía de Bogotá no cuenta con un sistema de monitoreo del tráfico, por lo que no hay mediciones confiables de las velocidades del flujo vehicular antes y después de la medida (Cantillo & Ortúzar, 2014). La falta de información hace difícil sacar conclusiones sobre algunos temas esenciales como: ¿Qué pasa exactamente con el 50% de los viajes en auto después de que la medida surte efecto? ¿En dónde se presentan los cambios en la elección de modo? ¿Qué viajes dejan de realizarse? ¿Cambian las horas en las cuales las personas realizan sus viajes? Sin embargo basado en información del tamaño del parque automotor y de la partición modal de la ciudad se pueden obtener algunas conclusiones acerca de la medida.

La Figura 1 muestra la evolución del parque automotor de Bogotá desde el año 2002 hasta el año 2012, se observa que entre los años 2002 y 2003 el número de vehículos se mantuvo casi constante, lo que coincide con la ampliación de la medida de un 20% a un 40% de los autos, de manera que desde 2004 se presentó un incremento sostenido del total de vehículos en la ciudad hasta el año 2009. A partir de este año, en el cual la restricción se amplió a casi todo el día, se presentó un aumento en la tasa de crecimiento del parque automotor que pasó de 92 mil vehículos anuales a casi 160 mil vehículos anuales.

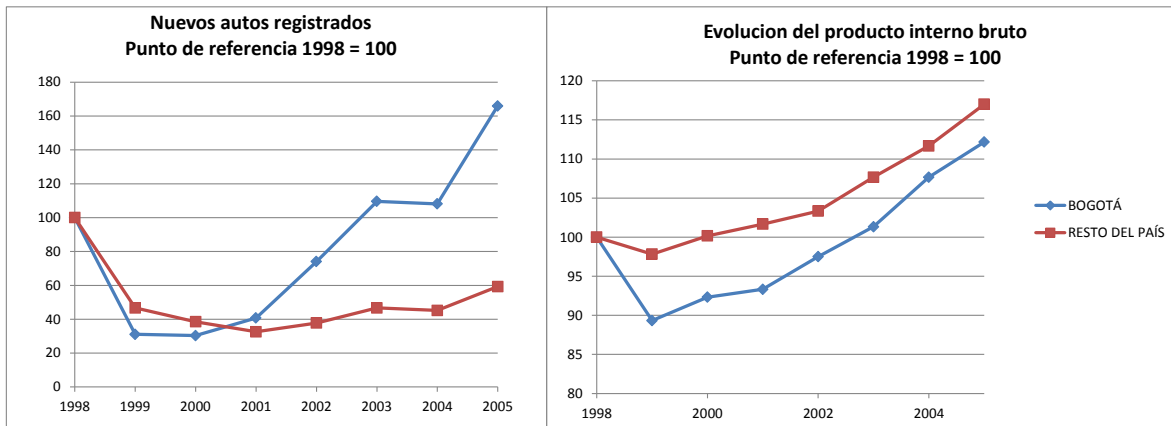
Figura 1 Parque automotor total de la ciudad de Bogotá



Fuente: Secretaria de Movilidad de Bogotá (2014)

Debido a que el crecimiento del parque automotor se explica por diferentes variables socioeconómicas -principalmente el ingreso-, conviene comparar el caso de Bogotá con el resto del país. Cantillo & Ortuzar (2014) hacen una comparación entre los vehículos matriculados y el producto interno bruto per cápita de Bogotá y del resto de Colombia entre los años 1998 y 2005 (año en que el pico y placa se extendió a otras ciudades importantes del país), demostrando que aunque en ese periodo el crecimiento del PIB per cápita de la capital fue menor que el del resto del país, la tasa de crecimiento del parque automotor fue mayor como se puede ver en la Figura 2, lo que puede ser explicado, al menos parcialmente, como una consecuencia del “pico y placa”.

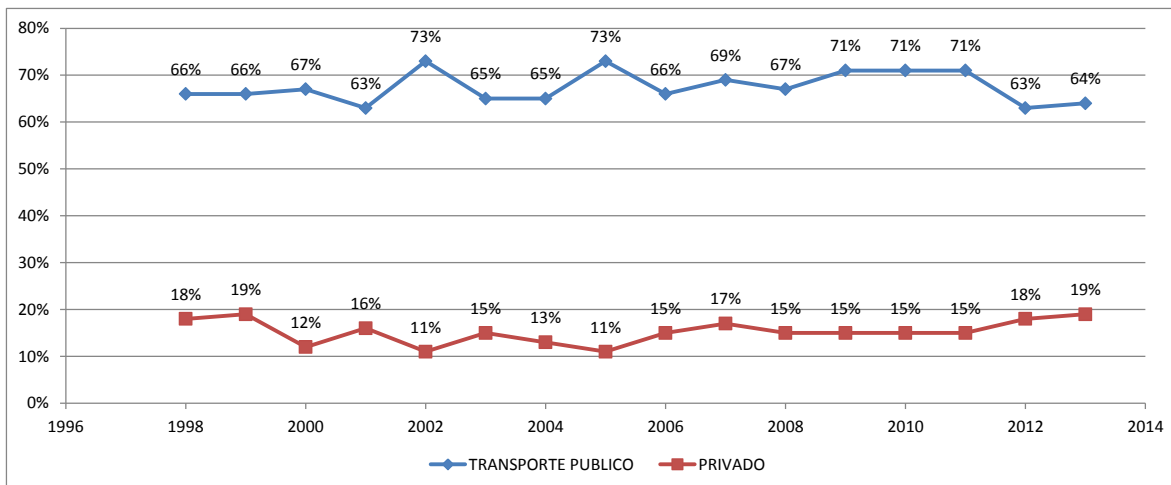
Figura 2 Evolución de a) Nuevos autos registrados y b) Producto interno bruto en Bogotá y el resto de Colombia



Fuente: Ortuzar & Cantillo (2014)

La Figura 3 presenta el porcentaje de utilización de transporte público y transporte particular en la ciudad de Bogotá desde el año 1998 hasta el año 2013. Nuevamente se observa un efecto positivo en el corto plazo al disminuir el porcentaje de utilización del vehículo privado después de la implementación de la medida en el año 1998 y de las ampliaciones de la política en 2002 y 2009. Sin embargo el aparente efecto positivo se disipa rápidamente y los porcentajes de utilización de vehículo particular regresan a los valores presentados antes del “pico y placa”.

Figura 3 Porcentaje de utilización del transporte público y particular en Bogotá



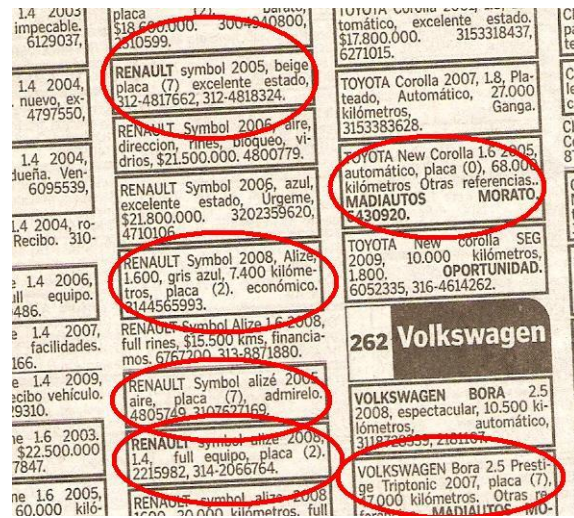
Fuente: Bogotá cómo vamos (2014)

Basándose en el conocimiento de algunos parámetros de la situación actual, especialmente los relacionados con la velocidad y al uso de las vías, Bocarejo (2008) examinó el impacto económico de la política de “pico y placa”, calculando el costo generalizado promedio percibido por los usuarios de auto junto al costo social en situaciones con y sin restricción y el cambio en el excedente de los consumidores. Los resultados de este análisis indican que

la restricción de la circulación en las horas picos en Bogotá (Antes de 2009) pudo haber generado una pérdida en la utilidad de los consumidores de unos 118 millones de euros al año. Estos resultados muestran el daño potencial que este tipo de medidas puede ocasionar en la sociedad.

Por otra parte, la Figura 4 muestra un extracto de un aviso clasificado para la venta de vehículos usados en Bogotá. Puede apreciarse claramente, que el último número de la placa es un atributo importante. Esto evidencia una señal clara del mercado en el sentido que los individuos, en particular quienes ya tienen un vehículo, consideran al número de la placa como relevante en la toma de decisión (procurando que no coincida con la de vehículos que ya posean) (Cantillo & Ortúzar, 2012).

Figura 4 Evidencia del número de la placa como atributo en el mercado de vehículos



1.4 2005 impecable. 6129037,	placa (7) excelente estado, \$18.400.000, 3000000, 310599.	1.4 2004, nuevo, ex- 4797550,	RENAULT symbol 2005, beige placa (7) excelente estado, 312-4817662, 312-4818324.	1.4 2004, dueña. Ven- 6095539,	RENAULT Symbol 2006, azul, excelente estado, Urgeme, \$21.900.000, 3202359620, 4710106.	1.4 2006, ill. equipo. 486,	RENAULT Symbol 2008, Alize, 1.600, gris azul, 7.400 kilómetros, placa (2), económico. 3144565993.	1.4 2007, facilidades. 166,	RENAULT Symbol Alize 1.6 2008, full rines, \$15.500 kms, financiamos. 6767200 313-8871880.	1.4 2009, adorno vehiculo. 19310,	RENAULT Symbol alize 2005, aire, placa (7), admirelo. 4805749, 3107627169.	1.6 2003. \$22.500.000 7847.	RENAULT symbol alize 2008, 1.4, full equipo, placa (2). 2215982, 314-2066764.	1.6 2005, 60.000 kilo-	RENAULT symbol alize 2008, 1.600, 20.000 kilometros, full	1.4 2004 Corolla 2004, automático, excelente estado. \$17.800.000. 3153318437, 6271015.	TOYOTA Corolla 2007, 1.8, Plateado, Automático, 27.000 kilómetros, 3153383628.	TOYOTA New Corolla 1.6 2005, automático, placa (0), 68.000 kilómetros Otras referencias. MADIAUTOS MORATO 5430920.	TOYOTA New corolla SEG 2009, 10.000 kilómetros, 1.800. OPORTUNIDAD. 6052335, 316-4614262.	262 Volkswagen	VOLKSWAGEN BORA 2.5 2008, espectacular, 10.500 kilómetros, 311928855, 2101107.	VOLKSWAGEN Bora 2.5 Prestige Triptonic 2007, placa (7), 27.000 kilómetros. Otras referencias MADIAUTOS MORATO
------------------------------------	--	-------------------------------------	--	--------------------------------------	---	-----------------------------------	---	-----------------------------------	--	---	--	------------------------------------	---	---------------------------	---	---	--	--	---	----------------	--	---

Fuente: Cantillo & Ortúzar (2012)

1.2 Medellín

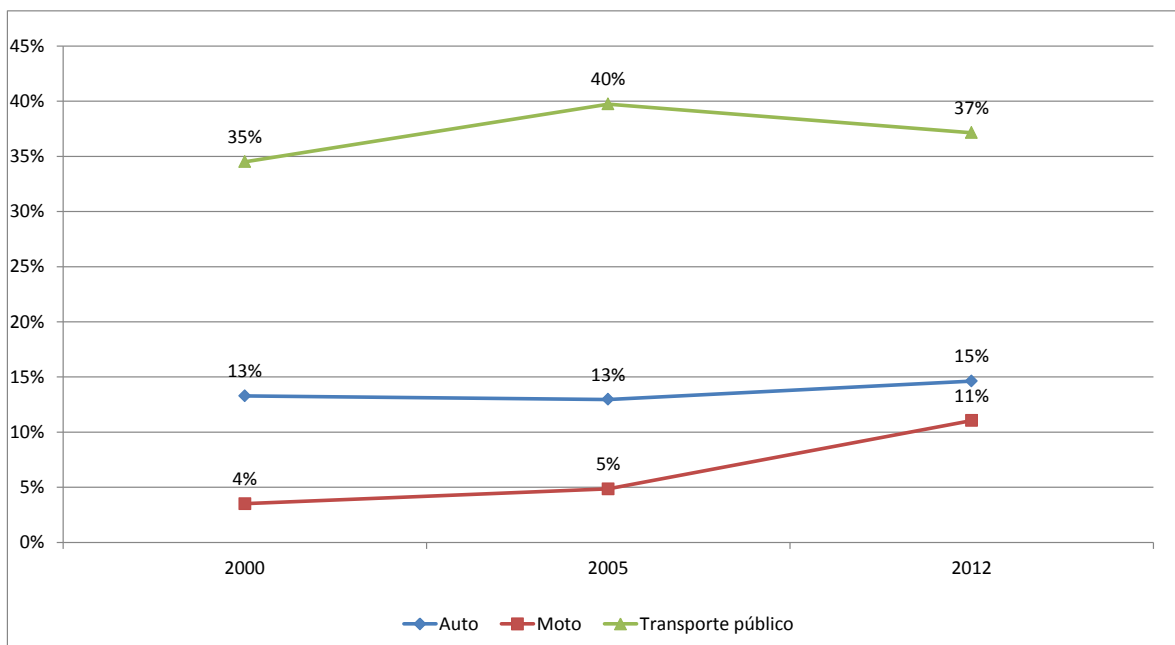
Siguiendo los pasos de Bogotá, la ciudad de Medellín adoptó el “pico y placa” en el año 2005 para un 20% de los vehículos entre las 6:30 y las 8:30 am y las 5:30 y 7:30 pm, ampliándolo a un 40% de los autos y un 20% de las motos en el año 2008; Actualmente la medida aplica entre las 7:00 am y las 8:30 am y las 5:30 pm y las 7:00 pm. Nuevamente, se hace uso de las tasas de motorización y la partición modal estimadas para la ciudad con el fin de evaluar la efectividad de la medida.

La Figura 5 muestra el porcentaje de utilización del transporte público y particular en el área metropolitana del valle de Aburrá (Conformada por Medellín y ocho municipios vecinos) entre los años 2000 y 2012. Se observa que entre 2000 y 2005 (antes del pico y placa) la participación del auto en el mercado se mantuvo constante, pero entre 2005 y 2010 aumento de un 13% a un 15%. El transporte público paso de una tendencia creciente antes de la medida a una tendencia decreciente y llamativamente se duplicó el uso de la motocicleta pasando de un 5 a un 11%. Es claro que la medida no ha logrado los resultados

esperados y que, de hecho, la situación ha empeorado ya que se ha reducido el uso del transporte público y aumentado el uso de transporte particular.

Cabe aclarar que el crecimiento en el uso de la motocicleta es una tendencia a nivel nacional. El número de estos vehículos en Colombia se ha incrementado en un 212% entre 2000 y 2010 (Hidalgo, 2014) y aportan el 44% del total de las víctimas fatales en accidentes de tránsito (Departamento Nacional de Planeación, 2015), por lo que el tema es motivo de preocupación para las autoridades locales y Nacionales. Medellín implementó “pico y placa” para motocicletas de dos tiempos, que aplica a dos números (20%) cada día.

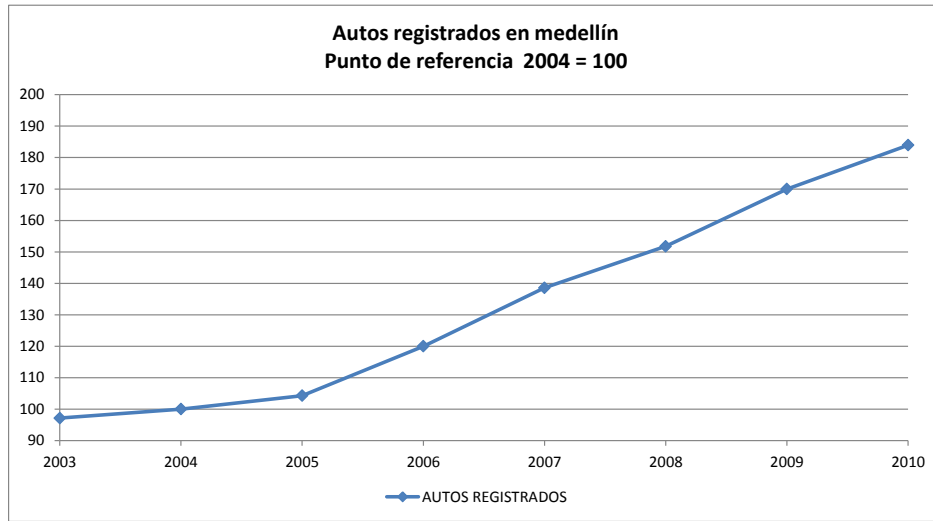
Figura 5 Porcentaje de utilización de auto, motocicleta y transporte público en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá años 2000, 2005 y 2012



Fuente: Área Metropolitana del Valle de Aburra (2012)

Sarmiento y Zuleta (2009) y Posada et al (2011) mostraron que como resultado de la medida la ciudad ya no cuenta con horas pico definidas. Esto se debe a que los usuarios de auto trasladaron muchas de sus actividades a los horarios sin restricción. Adicionalmente un análisis antes y después de nueve de las intersecciones más importantes de la ciudad muestra que los flujos de tráfico durante las horas pico disminuyeron durante el primer año de aplicación de la política, pero solo dos años después los flujos regresaron a los valores observados antes de su implementación. Analizando los mismos datos Posada et al (2011) también concluyo que inicialmente algunos conductores reprogramaron sus viajes fuera de la hora pico como una consecuencia de la implementación del pico y placa, sin embargo la medida se volvió obsoleta debido a que incentivó el incremento en la tasa de motorización como se muestra en la Figura 6, notando que hubo un quiebre en 2005, coincidente con el año que entró en vigencia la política.

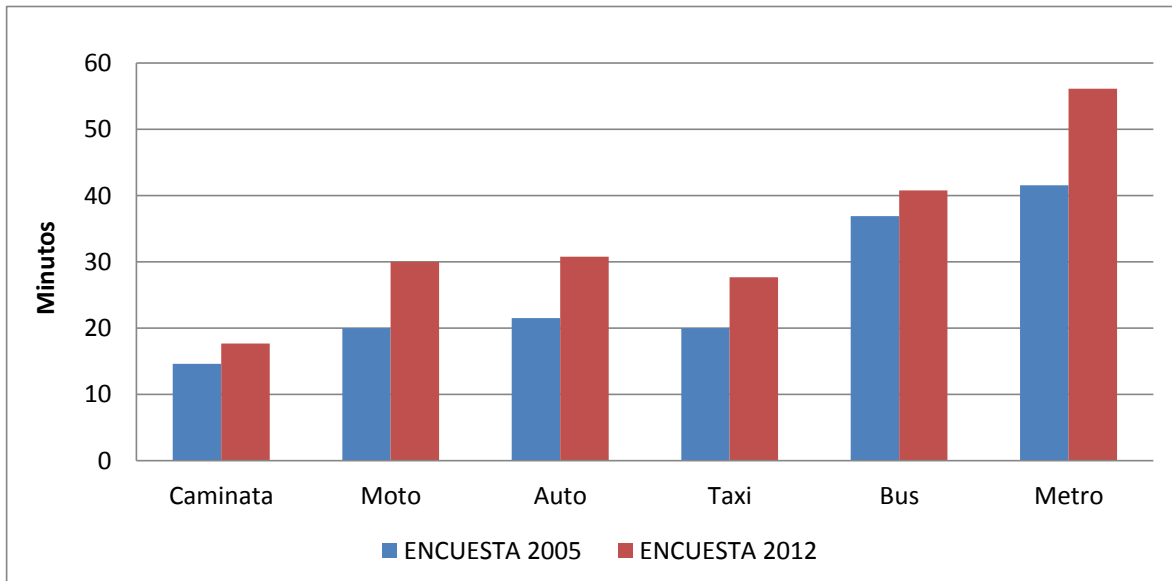
Figura 6 Vehículos registrados por año en Medellín (punto de referencia año 2004 = 100)



Fuente: Cantillo y Ortúzar (2014)

La falta de efectividad del pico y placa para reducir el uso del auto en las horas pico también se refleja en el aumento en los tiempos de viaje para todos los modos mostrado en la Figura 7, donde el aumento en la congestión afecta a todos los modos, incluyendo a las rutas alimentadoras que transportan el 50% de la demanda del metro.

Figura 7 Tiempo promedio de viaje en 2005 y 2012



Fuente: Área Metropolitana del Valle de Aburra (2012)

1.3 Medidas de restricción a la circulación de vehículos en Latinoamérica

Otras ciudades de Latinoamérica han implementado medidas similares al “pico y placa”, principalmente con el objetivo de reducir los problemas de contaminación atmosférica o de congestión. En Santiago de Chile los vehículos sin convertidores catalíticos están sujetos a restricciones de circulación durante el otoño y el invierno desde 1986 y recientemente la restricción también ha sido aplicada a los vehículos con convertidores catalíticos durante días de emergencia ambiental (Bull, 2003). Sin embargo diversas fuentes indican que la medida no solo no ha tenido un impacto positivo en la reducción del uso de automóviles en la ciudad (De Grange & Troncoso, 2011) , sino que tampoco afecta de forma equitativa a los conductores de ingresos bajos e ingresos altos ya que estos últimos tienen la capacidad de adquirir un vehículo menos contaminante que no se ve afectado por la restricción o lo que es aún más inconveniente pueden adquirir un segundo auto para evitar la restricción (Fresard, 1998) .

En Ciudad de México se introdujo en el año 1989 la política denominada “hoy no circula” que prohíbe a los conductores usar su vehículo durante un día a la semana en el zona central del área metropolitana. Al igual que en Santiago se ha demostrado que la medida no ha tenido ningún impacto en la reducción de niveles de contaminación en el largo plazo y que, por el contrario, la calidad del aire se empeoró en los días cuando la restricción no aplica y en fines de semana (Davis, 2008; Gallego, Montero, & Salas, 2013; Gallego, Montero, & Salas, 2013).

Como una respuesta a la creciente congestión y la pobre calidad del aire, la Secretaría de Medio Ambiente del estado de Sao Paulo introdujo un grupo de medidas en los años noventa. Una de estas incluyó el programa “rodizio” (Rivasplata, 2013), que buscaba reducir los niveles de contaminación al restringir la circulación de un quinto de la flota vehicular durante los días de semana (Hochstetler & Keck, 2004). El programa fue inicialmente desarrollado por el estado de Sao Paulo, pero la ciudad de Sao Paulo inicialmente se opuso a esta principalmente por presiones de las compañías de autos (Mahendra A. , 2008). La política tuvo resultados iniciales aparentemente favorables; sin embargo, a mediados de los noventa un cambio en el gobierno local resultó en un fin abrupto de esta. En 1997 se implementó un programa “rodizio” menos restrictivo con el fin de reducir la congestión en la zona central de Sao Paulo (Mahendra A. , 2008)

Otros ejemplos de medidas de restricción vehicular en Latinoamérica se dan en La Paz donde se implementó en 2003 la denominada restricción vial (La Ciudad, 2006), en San José de Costa Rica desde 2005 en donde el objetivo es reducir el consumo de combustibles (Nacion, 2005), en Quito donde la medida está vigente desde 2010 (Agencia metropolitana de tránsito de Quito, 2015) y en Caracas donde se implementó el día de parada entre los años 1979 y 1988 (El Universal, 2007).

Fuera de Latinoamérica se han implementado medidas similares en Manila (Thomson, 1988), y en Beijing donde en el corto plazo se evidencia una mejoría en los niveles de

congestión de la ciudad pero no así en los niveles de contaminación, además de una alta tasa de incumplimiento de la restricción (Sun, Zheng, & Wang, 2014).

1.4 Análisis económico del pico y placa

El análisis de transporte no puede desprenderse de la consideración de las externalidades asociadas. Una externalidad es una acción llevada a cabo por un agente económico (una compañía o un individuo) que tiene un impacto en los procesos productivos de otras compañías y/o en el bienestar de otros individuos, algunas de las externalidades asociadas al transporte son la congestión, los accidentes, el ruido y la contaminación atmosférica.

Al realizar un análisis de las externalidades asociadas al transporte Cantillo y Ortúzar (2014) muestran que las medidas de restricción a la circulación según número de patente (caso del “pico y placa”) solo son aparentemente afectivas en el corto plazo. Para ello se considera un par origen destino conectado por una sola vía en la que los individuos viajan en vehículos idénticos en una condición de equilibrio estático. Por simplicidad se ignoran otros factores como la posible redistribución de viajes a otros modos de transporte, o a otros días. Tampoco se incluye la demanda inducida por los usuarios sin restricción que aprovechan las mejoras en las condiciones del tráfico en el corto plazo. Adicionalmente el flujo, la velocidad y la densidad son las mismas a lo largo de toda la vía.

El equilibrio en estas condiciones es representado en la Figura 8, la cual es atribuida a Walters (1961), el eje horizontal indica el volumen vehicular (V), mientras que el eje vertical representa al costo generalizado de viaje (C), que incluye costos operacionales, tiempo de viaje y otros cargos. Cuando los flujos (V) se incrementan la congestión aumenta, las velocidades de los vehículos disminuye y por lo tanto el costo también se incrementa.

En el modelo propuesto la curva $CMe(V)$ representa el costo medio o costo privado percibido por los conductores y la curva $CMa(V)$ representa el costo marginal o social, ambos costos están relacionados por la Ecuación (1), donde el segundo término de la derecha representa las externalidades, es decir que el costo marginal es el costo promedio más el costo de las externalidades.

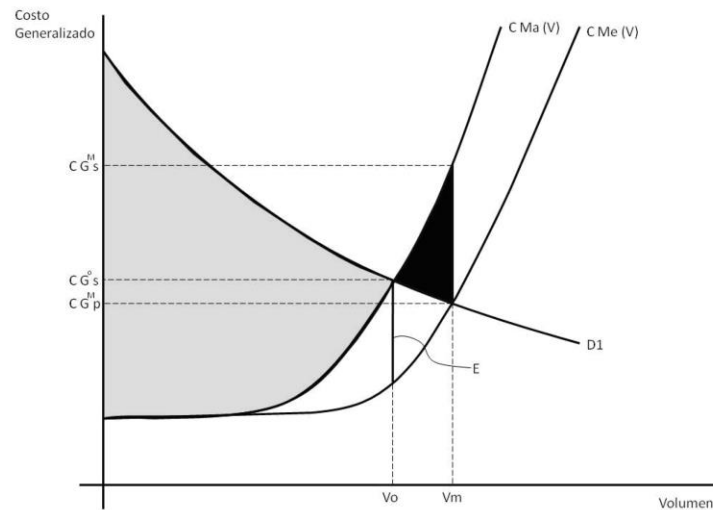
$$CMa(V) = CMe(V) + \frac{\partial CMe(V)}{\partial V} \quad (1)$$

Si se interpreta el flujo como el número de viajes demandado por unidad de tiempo, entonces se obtiene la curva de demanda y el diagrama oferta-demanda mostrado en la Figura 8, donde D_1 es definido como la demanda inicial (antes de la restricción). Si no hay intervenciones ni ningún cargo adicional a los costos operacionales y de viaje, entonces se obtiene el equilibrio inicial del mercado con un flujo igual a V_m , un costo generalizado privado igual a CG^M_p y un costo social igual a CG^M_s . Por otro lado el equilibrio óptimo

social, que corresponde a la intersección de la curva de costo marginal y la curva de demanda, tiene lugar con un flujo igual a V_0 y un costo social igual a CG^0_s .

Para alcanzar el óptimo social es necesario cobrar una cantidad E igual a la externalidad por congestión (conocido en la literatura como cobro Pigouviano, por ser propuesto por primera vez por Pigou en 1920) debido a que el equilibrio del mercado resta una pérdida social (área sombreada negra) del beneficio social (área sombreada gris).

Figura 8 Equilibrio del mercado y óptimo social en una vía congestionada

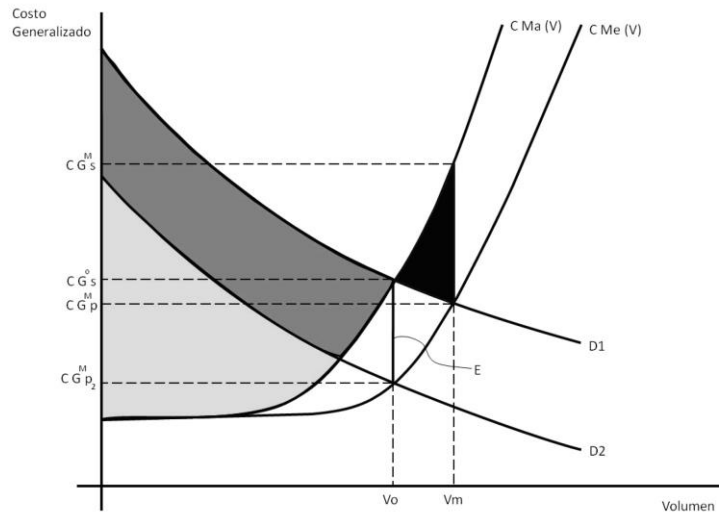


Fuente: Adaptado de Lindsey y Verhoef (2001)

La lógica en las ciudades donde se han implementado políticas de restricción vehicular parece muy simple, desplazar la curva de demanda con el fin de lograr un nuevo equilibrio con costos menores como se puede observar en la Figura 9, donde la restricción a la circulación vehicular ha desplazado la curva de demanda a la posición D_2 , a la izquierda de la curva inicial D_1 . Si se asume la condición más favorable, donde en el nuevo equilibrio del mercado (correspondiente a un costo privado igual a $CG^M_{p_2}$) el flujo es igual al del óptimo social, entonces no sería necesario implementar el cobro de una tarifa adicional para alcanzar un flujo similar al que se obtendría si los conductores percibieran la externalidad por congestión.

Sin embargo un análisis más detallado de la medida muestra que los efectos no son los mismos. Se sabe que la curva de demanda refleja la disponibilidad a pagar de los conductores, es por esto que la restricción de usar un vehículo genera una pérdida social representada por el área gris más oscura entre las curvas D_1 y D_2 en la Figura 9.

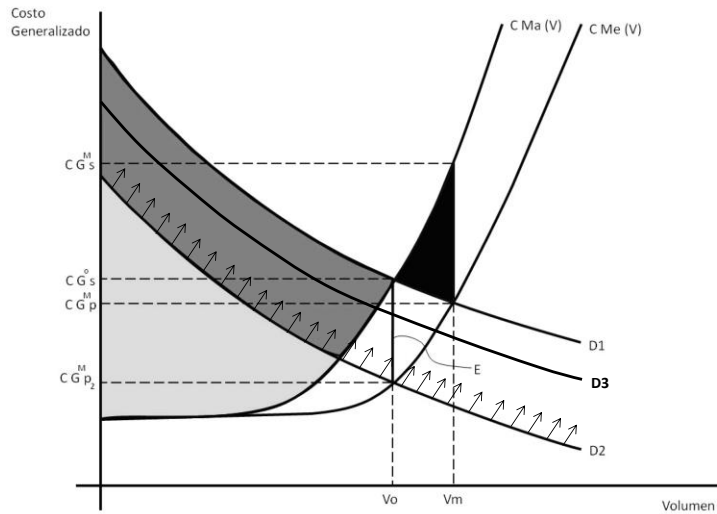
Figura 9 Equilibrio después de aplicar una medida de restricción



Fuente: Cantillo y Ortuzar (2014)

Lo anteriormente descrito corresponde a un equilibrio en el corto plazo. En el largo plazo los conductores toman decisiones que cambian este equilibrio como se muestra en la Figura 10. Existe una disposición insatisfecha entre los conductores a pagar por usar sus autos reflejada en el área (en gris fuerte) correspondiente a la pérdida social, de manera que un número alto de personas expresan esta disposición comprando un segundo o tercer vehículo con número de placa que no esté restringido en el mismo día del que ya posee. Por tal razón, esto la curva de demanda se desplazará hacia arriba hasta una posición $D3$ que puede, incluso en un periodo de tiempo relativamente corto, superar a la curva original $D1$, retornando a una situación similar o incluso peor que la situación inicial. Otro agravante es que una vez adquieren un segundo vehículo, las familias tienden a usar ambos los días en los que ninguno de los dos autos tiene restricción, que es el efecto observado durante fines de semana, en especial los días sábado.

Figura 10 Equilibrio a largo plazo después de aplica una restricción vehicular



Fuente: Cantillo y Ortuzar (2014)

Es claro entonces que las medidas de restricción vehicular como el “pico y placa” no son efectivas para reducir la congestión y que la mejor forma de alcanzar el óptimo social es cobrando por las externalidades generadas por la circulación de vehículos en las vías. Esta es la filosofía de la política de cobros por congestión la cual ha sido implementada exitosamente en ciudades como Londres, Singapur y Estocolmo.

2 LA POLÍTICA DE COBROS POR CONGESTIÓN

La mayoría de los expertos están de acuerdo en que la tarificación es la política más adecuada para abordar el problema asociados a las externalidades del transporte, debido a que gracias a ella los conductores perciben los costos sociales derivados de su comportamiento. Adicionalmente los ingresos provenientes de estos cobros pueden ser invertidos adecuadamente; por ejemplo, para mejorar el transporte público o para financiar proyectos de infraestructura.

Los cobros por congestión tienen una gran ventaja sobre otras políticas de gestión de la demanda de transporte como el “pico y placa”, ya que alienta a los viajeros a ajustar todos los aspectos de su comportamiento como: número de viajes, destino, modo, hora, ruta, etc. Así como decisiones a largo plazo como donde vivir, estudiar, trabajar y ubicar sus negocios (de Palma & Lindsey, 2011).

A pesar de todas sus ventajas, desde la experiencia pionera en Singapur y los sistemas de Londres y Estocolmo, muy pocos esquemas de cobros por congestión han sido implementados. Dentro de estos se cuentan algunas autopistas en Estados Unidos y algunas ciudades de Europa como: Veleta, Trondheim, Oslo, Bergen, Roma, Milán y Durham. Aunque el número de casos de aplicación sigue siendo limitado, es notorio el incremento en el número de ciudades adoptando y/o tratando de evaluar los efectos de la tarificación por congestión (por ejemplo: Copenhague, Budapest, Gotehemburg, San Francisco, Santiago de Chile, Bogotá, Sídney y Yakarta). También se destaca la política de cobro vial en Holanda y las actuales discusiones sobre la introducción de cobros por congestión en Bélgica (Grisolía, López, & Ortúzar, 2015).

Por otro lado, varias propuestas han sido rechazadas debido a la oposición política y/o del público en general. Los planes de cobro en cordón para Edimburgo y Manchester fueron rechazados en referendos realizados durante los años 2005 y 2008, respectivamente y una petición online al gobierno de Reino Unido en 2007, interrumpió los planes nacionales de cobros por el uso de vía. En la ciudad de Nueva York se propuso un esquema de cobro de tipo cordón el cual fue detenido por la legislatura del estado de Nueva York en abril de 2008 (de Palma & Lindsey, 2011).

Considerando todas estas experiencias, a continuación se discuten las razones técnicas, de aceptación del público en general y políticas que han dificultado la aplicación de los cobros por congestión en más ciudades del mundo. Además, se hace una revisión de las condiciones que hacen que la aplicación de este tipo de medidas sea particularmente complicada en las ciudades de Latinoamérica y finalmente se muestran los avances realizados en la materia en Bogotá y Medellín.

2.1 Complicaciones en la teoría del cobro por congestión

Tal como se anotó anteriormente, la teoría económica del cobro por congestión data de la década de 1920, cuando Pigou (1920) y Knight (1924)¹ hicieron importantes contribuciones acerca de la inadecuada asignación de recursos que resulta de un acceso gratuito a la red vial cuando hay congestión. La fórmula de cobro pigouviano para una solo arco se puede extender a toda una red vial si todos los arcos pueden ser tarificados eficientemente. Para un arco i con un flujo V_i el costo marginal está dado por la ecuación 2 donde el segundo término de la derecha es el la tarifa para cada arco.

$$CMa_i(V_i) = CMe_i(V_i) + \frac{\partial CMe_i(V_i)}{\partial V_i} \quad (2)$$

A pesar de la aparente simplicidad de la teoría pigouviana convencional, esta no tiene en cuenta muchas complicaciones que hacen que la aplicación práctica de la tarificación vial sea más difícil de lo que esta sugiere. En tal sentido, De Palma y Lindsey (2011) hacen una recopilación de los principales temas que la formulación tradicional del cobro por congestión pasa por alto:

1. El valor del tiempo, que está implícito en la función de costo generalizado, no es un único al depender de factores como el motivo del viaje, la hora del día, la duración del viaje e incluso el nivel de congestión (Calfée & Winston, 1998; Wardman, 2001)
2. Los flujos varían mucho con la hora del día, el día de la semana y la época del año. Formular un óptimo dinámico del sistema en una red de vial, calcular los cobros que soporten ese óptimo y resolver el sistema de ecuaciones numéricamente sigue siendo un desafío a pesar de muchos años de investigación.
3. La congestión no solo varía a lo largo del tiempo de forma predecible con los patrones de la demanda. También lo hace de forma impredecible debido a los accidentes de tránsito, clima, eventos especiales etc.
4. La externalidad que un vehículo genera depende de su tamaño, aceleración, capacidad de frenado y maniobrabilidad
5. El primer mejor cobro (el cobro pigouviano) solo es eficiente si todos los arcos pueden ser tarificados, de no ser así se debe implementar el principio del segundo mejor cobro² (es decir que maximice el bienestar social sujeto a algunas restricciones)
6. La congestión afecta las magnitudes de otros externalidades relacionadas con el tráfico como la accidentalidad (Hensher, 2006; Steimetz, 2008) y las emisiones

¹ Siguiendo a Pigou y Knight una gran cantidad de literatura se ha desarrollado acerca de los cobros por congestión, una revisión detallada de esta se puede encontrar en Lindsey y Verhoef (2001), Small y Verhoef (2007) y Parry (2009).

² Un caso ampliamente estudiado es en el que existen dos arcos paralelos en los que solo uno puede ser tarificado. El cobro entonces se fija por debajo del costo marginal de la congestión en el arco donde se puede realizar con el fin de limitar la congestión en el otro.

(Daniel & Bekka, 2000; Glaister & Graham, 2005) . Esta interferencia es importante porque estos costos no son totalmente internalizados por los conductores.

En síntesis, los cobros por congestión deberían ser diferenciados dependiendo del tipo de vehículo, el arco de la red, la hora del día, las condiciones reales del tráfico, el motivo de viaje y otras condiciones locales. Sin embargo en la práctica hacer esto no resulta ni sencillo ni mucho menos barato. En la mayoría de los casos se adopta un esquema de cobro que permita aplicar el principio del segundo mejor óptimo o alcanzar un nivel de servicio determinado en las vías tarificadas.

2.2 Tipos de esquemas de cobro por congestión

Existen tres esquemas básicos de tarificación por congestión dependiendo de la forma como se realiza el cobro, además de otras consideraciones como la diferenciación temporal de la medida (de Palma & Lindsey, 2011):

2.2.1 Basados en infraestructura (Facility-based)

Los cargos basados en la infraestructura son cobrados regularmente en vías, puentes y túneles. Siguen siendo la forma más común de cobro por circulación, aunque las tarifas diseñadas para gravar la congestión solo han sido implementada en muy pocas de estas infraestructuras viales. Un ejemplo de este tipo de cobro por congestión son los carriles HOT (high occupacy toll lanes) en Estados Unidos

Los HOT son la forma de cobro por congestión de menor escala en la cual la tarifa solamente es pagada en una parte de la capacidad de una vía (comúnmente uno o dos carriles) y los vehículos con ocupación alta (normalmente mayor a uno) están exentos del pago. Por lo tanto, los conductores pueden evitar el cobro al compartir el viaje con un acompañante, al usar los carriles libres del cobro (que generalmente están más congestionados) o sencillamente al seleccionar otra ruta en caso de que exista. En este último caso, modelos sencillos con dos rutas paralelas y usuarios idénticos indican que los beneficios potenciales de este tipo de cobros son mínimos a menos que una fracción alta de la capacidad de la vía pueda ser tarifcada (Verhoef, Nijkamp, & Rietveld, 1996).

Cuando se realiza un cobro por congestión solo en algunos arcos de una red vial urbana real, calcular el desempeño de la medida resulta bastante más complicado debido al gran número de pares origen-destino, las diferencias en la capacidad y longitud de los arcos y a la topología de la red vial que crea independencia entre los flujos, con algunos arcos actuando como sustitutos y otros actuando como complemento de los arcos tarifcados.

Además de no lograr cobrar por las externalidades en toda la red vial, la tarificación parcial tiene la desventaja de incrementar la congestión en los arcos no gravados y podría originar problemas de seguridad y daños estructurales si los arcos sin cobro no están construidos para los flujos atraídos por la implementación de la medida.

2.2.2 Cordones

Los esquemas de cobro tipo cordón son una forma de tarificación en donde los vehículos pagan un valor por cruzar una frontera entrando y/o saliendo de un área específica. Este tipo de cobro puede abarcar múltiples cordones y también puede incluir líneas de monitorio radial para controlar los movimientos orbitales.

A diferencia de los cobros basados en la infraestructura los esquemas basados en un área tienen la ventaja de interceptar una mayor cantidad de viajes y en general son menos susceptibles a tener cambios en los flujos no deseados.

El ejemplo más relevante de un peaje en cordón para manejar la congestión es el sistema de cobro por congestión de Estocolmo, implementado en 2007. El cordón rodea el centro de la ciudad y tiene 18 puntos de control. El peaje es cobrado en cada paso de ingreso durante los días de semana desde las 6:30 am hasta las 6:30 pm y su valor varía dependiendo de la hora del día.

Parte del éxito del esquema adoptado en Estocolmo es que la ciudad está construida sobre una isla por lo que con los 18 puntos de control instalados se pudo acordonar casi por completo el centro de la ciudad. En áreas urbanas que carezcan de fronteras naturales, la elección del número de cordones, de su ubicación y de los puntos de control puede resultar más compleja.

2.2.3 Esquema zonal

Con una medida zonal los vehículos pagan una tarifa por entrar o salir de un área determinada o por desplazarse dentro de esta sin cruzar su frontera. Las fronteras de las zonas pueden ser definidas por condiciones naturales como ríos, lagos y montañas así como por elementos artificiales como vías, túneles, puentes, zonas residenciales o jurisdicciones políticas.

El sistema de cobro por congestión de Londres es el ejemplo más significativo de un esquema de cobro zonal. Implementado en 2003, la zona de cobro original era de 21 km² alrededor del centro de la ciudad, con una tarifa fija en los días de semana entre las 7:00 am y las 6:30 pm por conducir a cualquier punto dentro de la zona.

Los esquemas zonales comparten la mayoría de las ventajas y desventajas de los esquemas de cordón, sin embargo debido a que captan los viajes realizados dentro del área tarificada (aunque este cobro sea independiente de la distancia recorrida) funcionan mejor. La elección entre cordones o cobros zonales no ha sido demasiado estudiada y la experiencia práctica es limitada debido al número reducido de ciudades que han implementado este tipo de políticas para el manejo de la congestión.

2.2.4 Sistemas mixtos

Dentro de un mismo perímetro urbano se pueden combinar esquemas de cobro por congestión basados en infraestructura, cordones y zonales. El caso más emblemático de este tipo de esquema es el sistema de cobro por congestión de Singapur el cual cubre algunas vías expresas y arteriales así como tres zonas de restricción en el central de la ciudad y un cordón de cobro en la avenida Orchard.

2.2.5 Diferenciación temporal

Las políticas de cobro también pueden ser categorizadas según la variación de la tarifa con el tiempo como planas, basada en la hora del día o adaptativa. Las tarifas planas son constantes con el tiempo. Ejemplos de este tipo de cobro son la mayoría de peajes en la infraestructura vial y el sistema de cargo por congestión de Londres.

Aunque se asume que un esquema de cobro plano maximizaría los ingresos para el operador del sistema de cobro, la realidad marca que el operador del sistema tiene un incentivo por internalizar los costos originados en la congestión, por otro lado, la elasticidad de la demanda generalmente varía durante el periodo del día, siendo normalmente menor durante las horas pico. Por todo lo anterior y considerando la facilidades que la tecnología de cobros electrónicos provee, los cobros variables con la hora y las tarifas adaptativas son preferibles en la mayoría de los casos.

Las tarifas variables cambian con la hora del día, el día de la semana y la época del año de acuerdo a unos cronogramas preestablecidos. Ejemplos de este tipo de cobro se dan en Singapur y Estocolmo.

La mayoría de los estudios asumen que los cronogramas de cobro son seleccionados para que cumplan con la condición de segundo mejor óptimo; sin embargo, la aplicación en la práctica ha resultado mucho más pragmática. En Singapur los cronogramas de cobro son ajustados trimestralmente y en las vacaciones estudiantiles de junio y diciembre, con el objetivo de mantener velocidades de 45 a 65 km/h en las vías expresas y 20 a 30 km/h en vías arteriales por lo menos durante un 80% del tiempo (Chew, 2008)

Fijar la tarifa con el objetivo de mantener cierto nivel de servicio tiene algunas ventajas. En primer lugar su cálculo es mucho menos demandante en términos computacionales ya que solo se necesita información de los arcos tarifados. En segundo lugar, la tarifa puede ser encontrada con un proceso de prueba y error y ser ajustada de acuerdo a los cambios en la demanda o en la oferta vial. Además, la regla para fijar el costo puede ser explicada rápidamente al público en general y, por último, es fácil de verificar usando los datos de flujo vehicular si el objetivo se está cumpliendo o no.

Los cobros adaptativos varían en tiempo real como una función de las condiciones de tráfico existentes, los únicos ejemplos de tarificación adaptativa son unos cuantos carriles de

alta ocupación (HOV lanes) en Estados Unidos donde el cobro se ajusta en tiempo real para mantener la condición de flujo libre.

2.3 Aceptación de la medida

Quizás el principal problema para la implementación de políticas de cobro por congestión es la poca aceptación que estas tiene entre el público en general. Los usuarios de automóviles no están dispuestos a pagar lo que desde su perspectiva es un impuesto adicional por usar el automóvil, especialmente en países en donde la tenencia y los combustibles de estos vehículos ya cuentan con altas cargas tributarias.

Grisolía et al. (2015) Hacen una revisión de un número sustancial de estudios que analizan el tema de la aceptación de la medida sacando las siguientes conclusiones:

1. La oposición general a los cobros por congestión puede estar muchas veces basada en la falta de confianza en el uso de los recursos recaudados por parte de los gobiernos (Kim, Schmöcker, & Noland, 2013).
2. Cuando se convocan referendos para decidir la implementación de un esquema de cobro por congestión, frecuentemente muestran un rechazo del público en general (Hensher & Li, 2013). Los estudios que analizan la relación entre la intención de voto en escenarios de referendos y la aceptabilidad de la medida han remarcado la importancia de proveer al público con información acerca de los impactos positivos de la política (Eliasson & Jonsson, 2011; Hensher, 2013) y de “vender” apropiadamente los beneficios de los cambios que se van a implementar (Cools, Brijs, Tormans, Moons, Janssens, & Wets, 2011). A pesar de la información suministrada directamente por los gobiernos, los medios de comunicación juegan un papel importante en la aceptación de un escenario de tarificación vial (Ardıç, Annema, & van Wee, 2013).
3. La percepción pública de los problemas relacionados al uso del automóvil y acerca de los beneficios de una medida de cobro por congestión aparece como un factor adicional en el análisis. Se espera que la aceptación de la política se incremente en la medida que la conciencia general de los efectos negativos del uso del auto aumentan, así como con la percepción de efectividad de la tarificación para resolver los problemas relacionados con el tráfico (Jones, 2003; Schade & Schlag, 2000; 2003; Steg, 2003). La percepción de los costos y beneficios de la medida también depende de las características de las personas (Gehlert, Kramer, Nielsen, & Schlag, 2011), por ejemplo se espera que la oposición a cargos por congestión sea mayor entre los dueños de vehículos que en los usuarios de transporte público (Cain, 2005; Jaensirisak, Wardman, & May, 2005; Kottenhoff & Brundell-Freij, 2009); y menor entre las personas con una mayor preocupación por el medio ambiente (Jaensirisak, Wardman, & May, 2005; Janssens, Cools, Moons, Wets, Arentze, & Timmermans, 2009).
4. Es más probable que las personas acepten un esquema de cobros por congestión cuando este es presentado como un paquete que incluya información clara acerca

del destino final de los ingresos (Albalade & Bel, 2009) y que de esta forma el beneficio de la medida pueda ser observado claramente. Las inversiones en transporte público (Kottenhoff & Brundell-Freij, 2009) y en medio ambiente (Loukopoulos, Jakobsson, Gärling, Schneider, & Fujii, 2005) parecen ser los destinos más aceptados para las utilidades de la política.

5. Las cuestiones de equidad son consideradas como una de las objeciones más importantes a la tarificación por congestión (Levinson, 2010), dado que la medida puede ser interpretada como regresiva en términos de distribución de los ingresos (Teubel, 2000). En este caso la aceptación pública y política depende crucialmente de la distribución de las ganancias y pérdidas de la esquema adoptado (Jakobsson, Fujii, & Gärling, 2000; Ittner, Becker, & Kals, 2003; Bartley, 1995).
6. Finalmente ciertas características de los cobros por congestión como el valor, el periodo de tiempo y la zona tarifada claramente afectan la aceptación del público (Kockelman & Kalmanje, 2005). La evidencia también sugiere que cuando se implementa un esquema complejo, una parte importante del rechazo es explicado porque las personas no lo entienden (de Palma, Lindsey, & Proost, 2007), como lo revelan Hansher y Li (2013), quienes muestran que la complejidad del plan puede llevar a niveles más altos de rechazo, como ocurrió en Edimburgo y Manchester. La experiencia de Milán también muestra una preferencia por la simplicidad en los esquemas de cobro (80% de los votantes aceptaron cambiar a un nuevo sistema de cobro más sencillo en 2011).

2.4 Cobros por congestión en América Latina

Se ha revisado de forma general las dificultades para la implementación de esquemas de cobro por congestión basándose principalmente en las experiencias exitosas de Singapur, Londres y Estocolmo; y en diversos estudios realizados sobre el problema de aceptación de la medida en países del primer mundo.

La literatura sobre la implementación de medidas de cobro en países en vía de desarrollo y más específicamente para países de Latinoamérica, es bastante limitada. Mahendra (2008; 2011) hace un estudio de la posibilidad de implementar cargos por congestión en cuatro ciudades de Latinoamérica donde actualmente existen políticas de restricción vehicular, estas son: Santiago de Chile, Ciudad de México, Sao Paulo y Bogotá. A través de un análisis histórico de la implementación de las restricciones, enriquecido con una encuesta aplicada a expertos locales de transporte, encontró tres factores para mejorar las posibilidades de implementación de la medida. El primero es difundir información al público en general acerca de los problemas ambientales y de salud de la congestión vehicular y la contaminación ambiental resultante de esta. El segundo es la implementación de políticas complementarias como mejoras al transporte público e incrementos en las tarifas de parqueo en las zonas más congestionadas y, el tercero se relaciona con el desarrollo de una cultura de conocimiento entre políticos y expertos a través de conversatorios acerca de la política de cobro por congestión.

Mahendra (2008; 2011) también muestra que las preocupaciones acerca de la equidad en el cobro por congestión debido a que el cargo que se aplicará a los usuarios de auto de bajos recursos es menos aplicable en los casos estudiados; sin embargo, una preocupación adicional es que las personas con ingresos altos e influencias políticas son aquellas quienes predominantemente poseen y usan autos en las cuatro ciudades estudiadas, caso común a América Latina..

Un interesante análisis de las posibilidades y restricciones en la implementación de políticas de cobro por congestión en Latinoamérica fue realizado por Rivasplata (2013), quién señaló que una primera dificultad identificada es que los ingresos de los ciudadanos y los recursos disponibles en América Latina son menores que en Europa. Dependiendo del tamaño de la zona de congestión y la tecnología de cobro usada, los sistemas de tarificación pueden costar cientos de millones de dólares en ser diseñados, implementados y operados. En el caso de Londres los costos iniciales sumaron más de 139 millones (Transport for London, 2009), mientras que Eliasson (2009) estimó los costos iniciales del sistema de cobro por congestión de Estocolmo en 275 millones de dólares. Se espera entonces que los esquemas de cobro por congestión en Latinoamérica requerirán inversiones de esa misma magnitud, aunque podrían disminuirse considerarlo que la tecnología se ha abaratado.

Adicionalmente, Rivasplata (2013) encuentra otras dificultades económicas e institucionales que deben ser resueltas. Entre ellas, que la inversión inicial en un sistema de cobros por congestión podría relegar otros proyectos, sectores y regiones geográficas de inversiones importantes, independientemente de la fuente original de recursos. Referente a la institucionalidad, una dificultad importante es asegurar que la agencia o agentes privados que implementen los esquemas de cobro tengan la capacidad técnica operar estos esquemas.

Un ejemplo de esquemas de cobro basado en infraestructura, con tarifas diferenciadas por el nivel de congestión, se puede encontrar en Santiago de Chile. La Autopista Costanera y la Autopista central hacen parte del programa de concesión de autopistas urbanas de la ciudad. Ambas cuentan con un sistema electrónico de tele-peajes con cobros diferenciados para periodos fuera de punta, punta y de saturación, los cuales varían de acuerdo a un cronograma preestablecido. La tarifa cobrada durante la hora punta y de saturación son el doble y el triple del costo del peaje durante la hora fuera de punta (Concesión Internacional Sistema Oriente-Poniente, 2015) (Concesión Autopista Central, 2015).

Si bien inicialmente el cobro estaba concebido para financiar la construcción, mantenimiento y operación de ambas autopistas, la inclusión de tarifas diferenciales a lo largo del día se dio para mantener la congestión en niveles aceptables.

2.5 Cobros por congestión en Colombia

En Colombia, el Gobierno Nacional a través de los dos últimos planes nacionales de desarrollo ha invitado a las autoridades locales a estudiar la implementación de medidas de

cobros por uso de áreas de alta congestión, de alta contaminación, o de infraestructura construida o mejorada para evitar la congestión urbana (vehículos particulares y motocicletas); con el objetivo de reducir los efectos negativos relacionados con el tráfico, incentivar el uso de modos no motorizados de transporte y como una fuente alternativa de financiación para los sistemas de transporte público (Departamento Nacional de Planeación, 2011; 2015).

Solo dos ciudades han realizado avances en el tema, la ciudad de Bogotá ya ha estructurado a detalle su sistema de cobro por congestión, sin embargo aún no ha sido aprobado por el concejo municipal, mientras que la ciudad de Medellín ha realizado un estudio de viabilidad de la medida.

2.5.1 Sistema de cobro por congestión de Bogotá

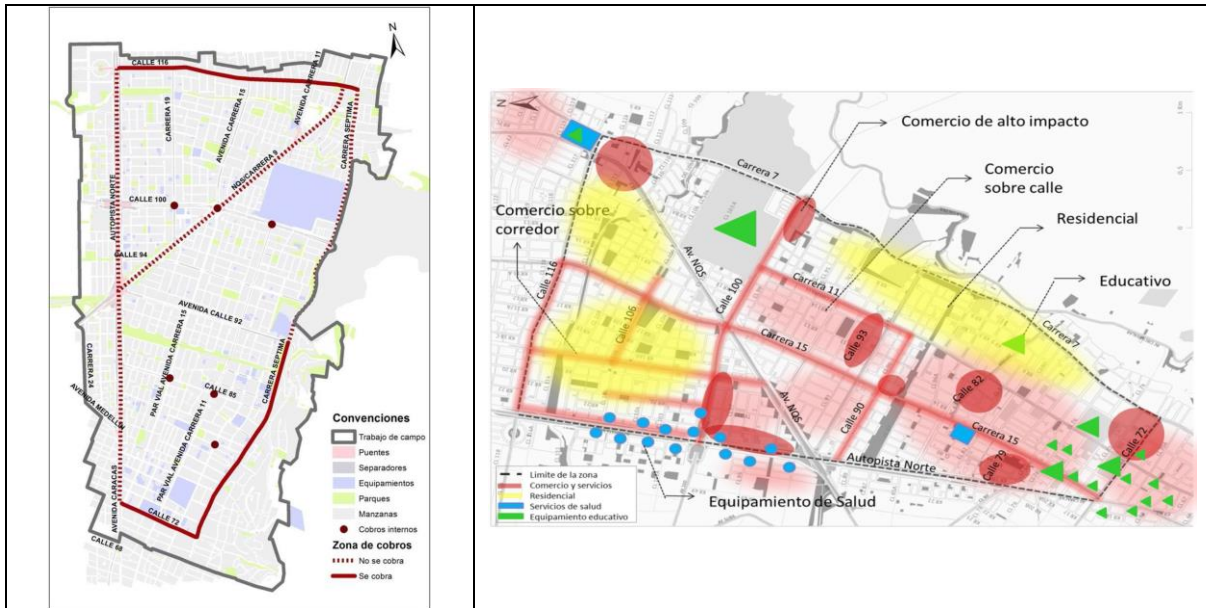
La Universidad de los Andes de Colombia y la University College de Londres elaboraron el estudio “Cobros de congestión en ciudades Colombianas” (2013), donde se expone la teoría convencional de los cobros por congestión, se explican los diferentes esquemas y tecnologías disponibles, se presentan los impactos de los cobros por congestión, se revisan las principales experiencias internacionales, y se hace un diagnóstico de la movilidad de la ciudad de Bogotá³

El estudio hace un análisis de los objetivos de un posible esquema de cobro por congestión en la ciudad, propone dos posibles zonas para la implementación de la medida y hace el cálculo de la tarifa pigouviana mediante el estimación de las curvas de costo marginal y de demanda para las dos zonas propuestas (entre COL \$2.100 y COL \$3.100). Adicionalmente se hace una estimación de la tarifa que maximiza los ingresos asociados al cobro por congestión y se estima la relación entre la tarifa y la disminución del volumen vehicular.

Con el fin de implementar una medida de cobro por congestión, la Alcaldía de Bogotá contrato el estudio “Sistema Cobros por Congestión para Bogotá – Estructuración técnica, legal y financiera” (Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá, 2014). La estructuración propone una zona de cobro de 9 kilómetros cuadrados, correspondiente al 2,1% del área urbana de la ciudad, entre la llamada Autopista Norte y la carrera 7 y las calles 114 y 72, tal como se muestra en la Figura 11.

³ El estudio también hace un análisis de Cali pero se limita a establecer los objetivos del cobro por congestión y a proponer una zona potencial para aplicar la política.

Figura 11 Zona sugerida para el cobro por congestión en Bogotá

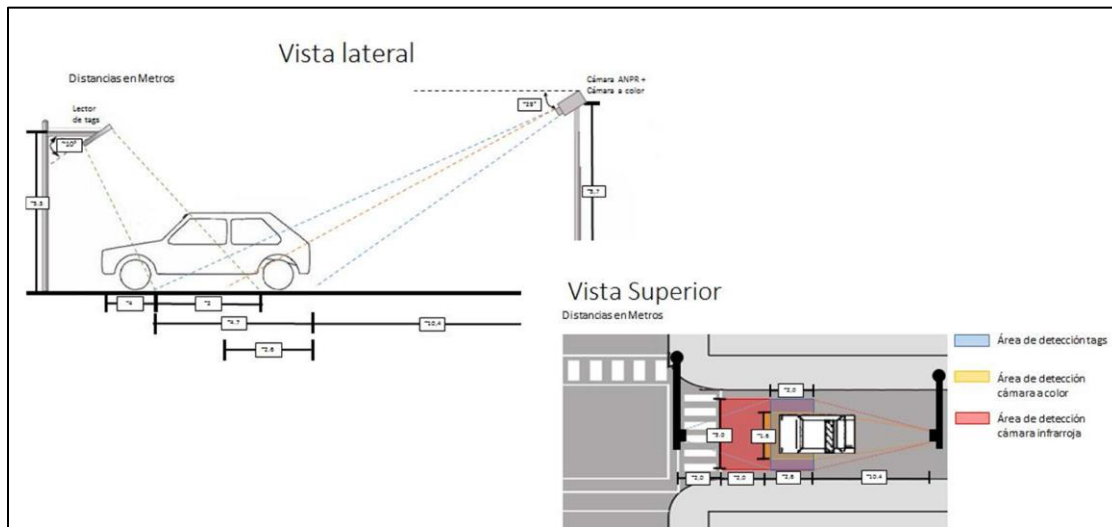


Fuente: Secretaria de Distrital de Movilidad (2014)

Se propone un esquema de cobro zonal, con tarificación por entrar, salir o circular al interior de la zona desde las 6:30 am hasta las 7:30 pm los días de semana, con una tarifa variable de entre COL \$5.500 y COL \$7.500. El sistema de cobro es diferencial según hora del día, sentido de desplazamiento, número de detecciones, punto de detección y tipo de usuario.

El mecanismo de cobro propuesto combina dispositivos a bordo y cámaras como se muestra en la Figura 12, cuando el usuario atraviesa un punto de detección el sistema genera el cobro asignando la tarifa aplicable según la estructura tarifaria y exenciones definidas. Los usuarios que no pagan son sujetos a multas de tránsito de forma automática.

Figura 12 Mecanismo de cobro del sistema de cobro por congestión de Bogotá



Fuente: Secretaria de Distrital de Movilidad (2014)

Con la implementación de la medida se espera una reducción en el uso del automóvil y de del taxi, un aumento en el uso del transporte público y un aumento en la velocidad de marcha en toda la ciudad y especialmente para los viajes con origen o destino dentro de la zona tarifcada como se muestra en las Tabla 1 yTabla 2.

Tabla 1 Cambios modales porcentuales al cobrar \$COL 6.500 (Hora pico)

Modo	Tipo de Viaje	2011	2016	2021
VP	Ciudad	-4,6%	-2,3%	-2,0%
	Origen y Destino en la Zona	-10,8%	-11,4%	-11,4%
	Desde o Hacia o Desde y Hacia la Zona	-13,4%	-11,9%	-12,3%
TX	Ciudad	-3,0%	-1,7%	-1,4%
	Origen y Destino en la Zona	-8,8%	-8,7%	-8,4%
	Desde o Hacia o Desde y Hacia la Zona	-12,5%	-8,1%	-7,1%
MT	Ciudad	5,9%	0,2%	0,2%
	Origen y Destino en la Zona	6,8%	4,1%	3,4%
	Desde o Hacia o Desde y Hacia la Zona	8,9%	2,6%	2,2%
TP	Ciudad	0,8%	0,8%	1,0%
	Origen y Destino en la Zona	9,5%	10,9%	10,9%
	Desde o Hacia o Desde y Hacia la Zona	9,1%	6,7%	7,7%

Fuente: Secretaria de Distrital de Movilidad (2014)

Tabla 2 Cambios en veh-km y veh-min al cobrar 6.500 (hora pico)

Ubicación	Indicador	2011	2016	2021
Ciudad	Veh-min	-7%	-1%	-2%
	Veh-km	-5%	-1%	-1%
Zona de Cobro	Veh-min	-48%	-50%	-55%
	Veh-km	-38%	-94%	-94%

Fuente: Secretaria de Distrital de Movilidad (2014)

El sistema es financieramente viable y tiene potencial para generar recursos para otros proyectos de transporte en la ciudad, además de que los flujos de caja permiten plantear un esquema con requerimientos de financiación sin necesidad de deuda a largo plazo. La medida también ofrece oportunidades para mejorar el transporte público y el no motorizado y potenciar la zona con la implementación de planes como bicicletas públicas, zonas amarillas y plan de estacionamiento (Secretaria Distrital de Movilidad de Bogotá, 2014).

A pesar de contar con el apoyo del gobierno nacional y una estructuración técnica, legal y financiera robusta, el proyecto ha sido rechazado en dos oportunidades por el concejo de la Ciudad de Bogotá (Caracol Radio, 2015; El Espectador, 2015). Entre los argumentos dados por los concejales están: los bajos niveles de confianza en la administración municipal, que la ciudad no cuenta con sistema multimodal de transporte que satisfaga la demanda generada por la implementación de la medida y que se deben priorizar otros proyectos de transporte, como líneas de metro y troncales BRT (Revista Semana, 2014).

Desafortunadamente no se cuenta con ningún estudio que permita determinar el nivel de conocimiento del esquema propuesto y la aceptación del mismo entre el público en general. En cualquier caso, es claro que se deben intensificar los esfuerzos de difusión de los beneficios de la misma entre los ciudadanos para superar la barrera política que actualmente se presenta.

2.5.2 Cobros por congestión en Medellín

González, Posada, & Sánchez (2012) realizaron un análisis costo-beneficio para valorar los efectos de implementar una estrategia hipotética de cobro por congestión, basado en datos de estudios previos y la matriz origen destino de la ciudad de Medellín incluyendo las zonas con mayor densidad de autos. El resultado principal es que los beneficios de la implementación son positivos, por lo cual se recomienda la implementación de un cobro por congestión para mejorar la eficiencia del uso de la infraestructura vial de la ciudad basado en principios económicos.

En 2012, la Universidad Nacional sede Medellín realizó para la alcaldía de esta ciudad un estudio de viabilidad para la implementación de un esquema de cobros por congestión

(Universidad Nacional de Colombia, 2012). El estudio realiza una revisión bibliográfica de los sistemas de cobro por congestión en diversas ciudades del mundo y presenta las conclusiones de una visita realizada a Singapur. Por otro lado, con base en las notas técnicas de Singapur presentadas como guías para el estudio de sistema de cobro por congestión que en 2013 se realizó en la ciudad de Bogotá, se hace una discusión de los distintos aspectos tarifarios, horarios, tratamiento de residentes, de foráneos y de tecnología para el caso de Medellín.

El núcleo del estudio es la ejecución de una encuesta de preferencias declaradas (PD) donde las alternativas son salir antes o después del horario de cobro por congestión, pagar la tarifa, o usar alguno de los modos de transporte público disponibles en la ciudad; y de una encuesta de percepción de 10 indicadores relacionados con la seguridad, la comodidad y la confiabilidad de los modos disponibles.

En el estudio se estima un modelo logit multinomial con variación de gustos para la elección de las alternativas, usando solo las características de los individuos y las variables de la encuesta PD. Se hace un análisis de la variación en la probabilidad de elección de cada uno de las alternativas con respecto a la tarifa del cobro por congestión y se concluye que esta variable tiene un alto impacto en la elección del modo de transporte, dado por el nivel elasticidad.

A pesar de los avances de estos dos estudios no se ha reportado que las autoridades locales hallan iniciado el proceso de estructuración a detalle, o el proceso de aprobación en el consejo de la política de cobros por congestión para la ciudad.

3 MODELACIÓN DE DEMANDA PARA ESCENARIOS CON COBRO POR CONGESTIÓN EN MEDELLÍN

Usando la base de datos de la encuesta de preferencias declaradas e indicador de percepción realizada por la Universidad Nacional, a continuación se presentan modelos de elección discreta para la elección de modo en un escenario de cobro por congestión en Medellín. Se incluyen modelos incorporando las variables latentes comodidad, seguridad y confiabilidad.

El objetivo es evaluar la influencia de factores de la política de cargos por congestión como la tarifa y los horarios de cobro sobre la utilización de los modos de transporte público disponibles en la ciudad (Bus, Metro y Taxi). También su incidencia sobre el uso del auto en los horarios de aplicación de la medida y la disposición por cambiar el horario del viaje para evitar el cobro, ya sea antes o después del horario establecido.

Además, se quiere analizar como la percepción de variables intangibles como la seguridad, la comodidad y la confiabilidad de las diferentes alternativas afectan el proceso de elección de modo cuando se implementa una política de cobros por congestión, destacando la influencia de las características socioeconómicas de los usuarios sobre las decisiones.

Inicialmente se hace una breve revisión teórica de los modelos de elección discreta con variables latentes y su estimación, después se hace una descripción de la base de datos de encuestas de preferencias declaradas e indicadores de percepción usada y se presentan los resultados de la estimación del modelo usando el método simultáneo.

Posteriormente se hace un análisis de los resultados obtenidos en la estimación del modelo y se calculan las probabilidades de elección y las elasticidades de las alternativas ante variaciones en la tarifa cobrada por congestión y en el horario de salida antes y después de la medida para evitar el cobro.

Finalmente se evalúan tres escenarios de cargos por congestión para el periodo pico de la mañana variando los horarios de aplicación de la medida, se proponen las zonas en las cuales se realizara el cobro y se dan algunas recomendaciones sobre medidas complementarias que deberían aplicarse.

3.1 Modelos híbridos de elección discreta con variables latentes

Las variables latentes son atributos intangibles que buscan representar elementos subjetivos que influyen en el comportamiento de elección de un individuo y sus percepciones. Estas variables no pueden ser cuantificadas directamente en la práctica (Yáñez, Raveau, & Ortúzar, 2010), ya sea por su intangibilidad (no tienen una escala medible) o por su subjetividad intrínseca (diferentes personas pueden percibirlos de forma diferente) (Raveau, Yáñez, & Ortúzar, 2011).

La identificación de variables latentes requiere que las encuestas convencionales de preferencias declaradas y reveladas sean complementadas para captar la percepción de los usuarios respecto a algunos aspectos de las alternativas que de otra forma no podrían ser medidos; es por esto que se generan indicadores de percepción. Esta tarea demanda ser capaz de definir las variables latentes antes de realizar la encuesta basándose en conceptos considerados importantes para cada caso particular; por ejemplo, en el área de transporte variables como el confort, la confiabilidad y la seguridad son consideradas relevantes (Yáñez, Raveau, & Ortúzar, 2010). Esto en la práctica quiere decir que para el diseño de la encuesta se necesita identificar a priori los factores apropiados que permitan determinar eventualmente los indicadores de percepción. Este procedimiento que debe ser realizado en cualquier contexto de aplicación (Skrondal & Rabe-Hesketh, 2007).

En la literatura reciente el enfoque más popular para incluir el efecto de las variables latentes es usando modelo MIMIC (*Multiple Indicator Multiple Cause*), donde las variables latentes (η_{ilq}) son explicadas por las características s_{iqr} de los usuarios y las alternativas a través de ecuaciones estructurales (3). Al mismo tiempo las variables latentes explican los indicadores de percepción y_{ipq} , los cuales son observados por el modelador por medio de la encuesta, a través de ecuaciones de medición (4) (Raveau, Yáñez, & Ortúzar, 2011)

$$\eta_{ilq} = \sum_r \alpha_{ilr} \cdot s_{iqr} + v_{ilq} \quad (3)$$

$$y_{ipq} = \sum_l \gamma_{ilp} \cdot \eta_{ilq} + \zeta_{ipq} \quad (4)$$

Donde el índice i se refiere a la alternativa, q al individuo, l a una variable latente, r a una variable explicativa y p a un indicador; α_{ilr} y γ_{ilr} son parámetros a ser estimados, mientras que v_{ilq} y ζ_{ipq} son términos de errores con media cero y cierta matriz de covarianza. Como los términos η_{ilq} son desconocidos, ambas ecuaciones deben ser consideradas conjuntamente en el proceso de estimación de los parámetros (Bolduc & Alvarez-Daziano, 2010)

Tradicionalmente en los modelos de elección discreta se asume que las personas eligen de forma racional la alternativa que maximice su utilidad personal percibida U_{iq} . El modelador, que es un observador, define una utilidad representativa V_{iq} (debido a que no posee información perfecta) y un término de error ε_{iq} asociado a cada alternativa (5) (Ortúzar & Willumsen, 2011) :

$$U_{iq} = V_{iq} + \varepsilon_{iq} \quad (5)$$

La utilidad representativa V_{iq} es una función de los atributos tangibles X_{ikq} donde k hace referencia a un atributo en particular. Cuando se incluyen variables latentes se tiene una función de utilidad como la mostrada en la ecuación (6), donde θ_{ik} y β_{il} son parámetros a ser estimados asociados a los parámetros tangibles y a las variables latentes, respectivamente

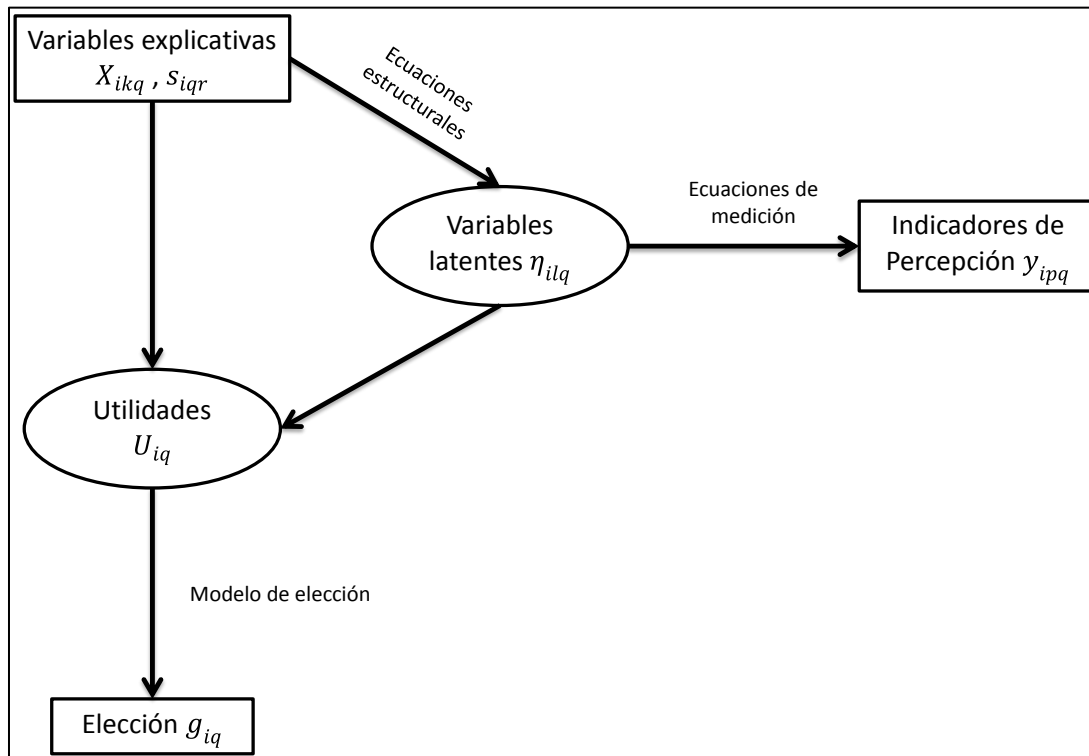
$$V_{iq} = \sum_k \theta_{ik} \cdot X_{ikq} + \sum_l \beta_{il} \cdot \eta_{ilq} \quad (6)$$

Dado que las variables latentes η_{ilq} son desconocidas, para evitar sesgos, el modelo de elección discreta debe ser estimado conjuntamente con las ecuaciones estructurales (3) y de medición (4) del modelo MIMIC. Finalmente para caracterizar las decisiones de los individuos sobre su conjunto de alternativas disponibles (A_q), se definen variables binarias g_{iq} , que toman el valor de acuerdo a la ecuación (6) (Raveau, Yáñez,, & Ortúzar, 2011)

$$g_{iq} = \begin{cases} 1 & \text{si } U_{iq} \geq U_{iq}, \forall J \in A_q \\ 0 & \text{en otros casos} \end{cases} \quad (6)$$

Las relaciones entre las ecuaciones estructurales y de medición de las variables latentes; las utilidades representativas de las alternativas y el modelo de elección se representan de forma esquemática en la Figura 13

Figura 13 Diagrama general del modelo híbrido



Fuente: Elaboración propia basado en Walker J.L (2001)

La estimación simultánea es realizada al maximizar la verosimilitud de la probabilidad de replicar las decisiones de los individuos basado en la utilidad representativa propuesta por el modelador la cual es $Prob(g_{iq}|V_{iq})$. Esta probabilidad condicional puede ser expresada en términos de las variables y parámetros del modelo de elección discreta. Sin embargo como las variables latentes no son observables es necesario integrar sobre todo su rango de variación, condicionándolas por sus variables explicativas. Debido a esto la probabilidad de elección está dada por la ecuación (7) donde $h(\eta_{ilq}|\alpha_{ilr}, S_{iqr})$ es la función de densidad de probabilidad de las variables latentes

$$\begin{aligned}
 & Prob(g_{iq} | x_{ikq}, s_{iqr}, \theta_{ik}, \beta_{il}, \alpha_{ilr}) \\
 &= \int_{\eta_{ilq}} Prob(g_{iq} | x_{ikq}, \eta_{ilq}, \theta_{ik}, \beta_{il}) \cdot h(\eta_{ilq} | \alpha_{ilr}, s_{iqr})
 \end{aligned} \tag{7}$$

Sin embargo para estimar el modelo también es necesario introducir la información provista por los indicadores de percepción y_{ipq} de las ecuaciones de medición (4), ya que de otra manera el modelo no sería identificable. Los indicadores no son variables explicativas del modelo, en cambio son endógenos de las variables latentes, esto implica que la probabilidad de elección usada para la estimación está dada por (8) donde $f(y_{ipq}|\eta_{ilq}, \gamma_{ilp})$ es la función de densidad de probabilidad de los indicadores (Ortúzar & Willumsen, 2011)

$$\begin{aligned}
 & Prob(g_{iq}, y_{ipq} | x_{ikq}, s_{iqr}, \theta_{ik}, \beta_{il}, \alpha_{ilr}, \eta_{ilq}, \gamma_{ilp}) \\
 &= \int_{\eta_{ilq}} Prob(g_{iq} | x_{ikq}, \eta_{ilq}, \theta_{ik}, \beta_{il}) \cdot f(y_{ipq} | \eta_{ilq}, \gamma_{ilp}) \\
 & \cdot h(\eta_{ilq} | \alpha_{ilr}, s_{iqr})
 \end{aligned} \tag{8}$$

Una vez que la forma funcional del modelo de elección discreta ha sido definida el método de máxima verosimilitud simulada puede ser usado para la estimación (Bolduc & Alvarez-Daziano, 2009; Bolduc & Giroux, 2005).

Para estimar el modelo MIMIC generalmente tantos parámetros como variables latentes deben ser fijados, pero aún más restricciones pueden ser necesarias dependiendo de la estructura de las Relaciones. Stapleton (1978) recomienda fijar tantos parámetros en las ecuaciones de medición (γ_{ilp}) como sea necesario, pero también muestra que el modelo puede ser estimado fijando la varianza de las ecuaciones estructurales (v_{ilq}). Restringir los parámetros de las ecuaciones de medición es más usado (Ben-Akiva, Walker, Bernardino, Gopinath, Morikawa, & Polydoropoulou, 2002; Vredin Johansson, Heldt, & Johansson, 2006) que restringir las varianzas de las ecuaciones estructurales (Raveau, Alvarez-Daziano, Yáñez, Bolduc, & Ortúzar, 2010), aun cuando no hay evidencia concluyente de alguna ventaja en ninguno de los dos casos.

Más información sobre la estimación de modelos híbridos y sobre los problemas de identificación de los parámetros se puede encontrar en Raveau, Yáñez, & Ortúzar (2011); Walker J. L., (2001) y Walker & Ben-Akiva, (2002).

3.2 Descripción de la base de datos

La base de datos utilizada para la estimación del modelo corresponde a la encuesta de preferencias declaradas y medición de indicadores de niveles de servicio realizada por la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín como parte del estudio de viabilidad de un sistema de cobro por congestión para esta ciudad (Universidad Nacional de Colombia, 2012).

Se realizaron un total de 1098 encuestas validas entre usuarios de autos cuyo último viaje haya tenido por motivo trabajo o estudio. La muestra se distribuye proporcionalmente al número de viajes en auto por estrato socioeconómico⁴ y genero reportados en la encuesta origen-destino de Medellín del año 2012. En la Tabla 3 se muestra un resumen de las características socioeconómicas de la muestra.

⁴ La estratificación socioeconómica es una clasificación en estratos de los inmuebles residenciales que deben recibir servicios públicos. Se realiza principalmente para cobrar de manera diferencial por estratos los servicios públicos domiciliarios permitiendo asignar subsidios y cobrar contribuciones en esta área.

De esta manera, quienes tienen más capacidad económica (5 y 6) pagan más por los servicios públicos y contribuyen para que los estratos bajos (1, 2 y 3) puedan pagar sus facturas (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2015).

Tabla 3 Características socioeconómicas de la muestra

Variable	Muestra (%)
Sexo	
Masculino	55%
Femenino	45%
Ingresos	
Bajos (Estratos 1 y 2)	9%
Medios (Estratos 3 y 4)	52%
Altos (Estratos 5 y 6)	39%
Motivo del Viaje	
Trabajo	82%
Estudio	18%
Edad	
<21	7%
21-40	57%
41-60	33%
>60	3%
Formación Educativa	
Básica	26%
Técnica - Tecnológica	18%
Profesional o superior	56%
Cargo	
Independiente	23%
Directivo	13%
Empleado	47%
Otro	16%
Flexibilidad Horario de entrada al trabajo	
No	42%
Si	58%
Paga Parqueadero en el lugar de destino de su viaje	
No	74%
Si	26%
Modo de transporte más disponible	
Bus	64%
Metro	15%
Bus-Metro	20%

Fuente: Elaboración Propia

Además de la información socioeconómica al encuestado se le pregunto por la duración de su último viaje en auto y por la tarifa y el tiempo de viaje en caso de que el viaje lo hubiese

realizado en transporte público y en taxi. Los valores promedios de estos dos atributos se presentan en la Tabla 4

Tabla 4 Promedio tiempo de viaje y tarifa

Variable	Promedio de la muestra
Tiempo de Viaje	
Auto	31 min
Transporte Público	45 min
Taxi	26 min
Tarifa del viaje	
Transporte público	COL\$ 2,427
Taxi	COL\$ 11,412

Fuente: Elaboración Propia

La información del último viaje es usada para la generación de los casos de elección de la encuesta de preferencias declaradas. Para los escenarios mostrados en los diferentes casos, se usó una tabla donde se describen 4 bloques de posibles preguntas a aplicar a los encuestados. Cada bloque de preguntas contiene los nueve casos y para cada caso aplica diferentes valores a los datos que se le presentan a los encuestados. Los bloques se asignan aleatoriamente, tratando de mantener un equilibrio entre la cantidad de los bloques de preguntas utilizados, de esta manera se garantiza que los escenarios que se presenten sean lo bastante diversos para evitar que las respuestas sean cautivas o lexicográficas.

Las alternativas disponibles en la encuesta PD son: el modo de transporte público elegido como el más disponible entre: (1) Bus, (2) Metro o (3) Bus-metro; (4) Taxi, (5) Salir en auto antes del cobro por congestión, (6) Salir en auto y pagar el cobro por congestión y (7) Salir en auto después del cobro por congestión. Las variables para cada alternativa con su respectivo número de niveles se muestran en la Tabla 5

Tabla 5 Variables y niveles de la encuesta de preferencias declaradas

Alternativa	Variable	Numero de Niveles
Transporte Publico	Tiempo de viaje	2
	Costo	2
Taxi	Tiempo de viaje	2
	Costo	2
Auto saliendo antes del cobro por congestión	Tiempo de viaje	2
	Hora de salida	3
Auto pagando el cobro por congestión	Tiempo de viaje	2
	Costo	3
Auto saliendo después del cobro por congestión	Tiempo de viaje	2
	Hora de salida	3

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente Se midieron 9 indicadores de percepción, contruidos para las variables: comodidad, seguridad y confiabilidad. La escala de medición para estas variables es de 1 a 7. Las alternativas consideradas fueron: Bus, taxi, metro, Auto saliendo antes del cobro por congestión, Auto pagando cobro por congestión y Auto saliendo después del cobro por congestión.

Las preguntas para medir los indicares latentes fueron:

Preguntas de seguridad	Abreviatura
A. ¿Cómo es la percepción que tiene de la seguridad en cuanto a la ocurrencia de robo o atraco si su desplazamiento se realiza por una vía congestionada en el modo de transporte?	Seguridad robo
B. ¿Cómo es su percepción de seguridad en cuanto a la ocurrencia de un accidente de transito si su desplazamiento se realiza por una vía congestionada en el modo de transporte?	Seguridad accidente
C. ¿Cómo es la percepción que tiene de la seguridad en cuanto a sentirse vulnerable en su integridad física si su desplazamiento lo realiza por una vía congestionada en el modo de transporte?	Seguridad vulnerable
D. ¿Cómo es la percepción que tiene de la seguridad en cuanto a la presencia de fuerza pública en la vía si su desplazamiento lo realiza por una vía congestionada en el modo de transporte?	Seguridad fuerza publica

Preguntas de comodidad	Abreviatura
A ¿Cómo es la percepción de comodidad en cuanto a la suavidad en el desplazamiento si su recorrido lo realiza por una vía congestionada en el modo de transporte?	Comodidad suavidad
B ¿Cómo es la percepción de comodidad en cuanto a la facilidad para acceder al destino del viaje si su desplazamiento lo realiza por una vía congestionada en el modo de transporte?	Comodidad acceso
C ¿Cómo es la percepción de comodidad en cuanto a encontrar un asiento disponible y espacios adecuados en el modo de transporte?	Comodidad asiento

Preguntas de confiabilidad	Abreviatura
A. ¿Cómo es la percepción que tiene de la Confiabilidad en cuanto a saber con anticipación, cuando será el tiempo de viaje si su desplazamiento lo realiza por una vía congestionada en el modo de transporte?	Confiabilidad tiempo de viaje
B. ¿Cómo es la percepción que tiene de la Confiabilidad en cuanto a saber con anticipación, cuando será el tiempo de espera si el vehículo se desplaza por una vía congestionada en el modo de transporte?	Confiabilidad tiempo de espera

Al realizar un análisis de los indicadores de auto antes y después del cobro por congestión y auto pagando el cobro, se encontró que eran estadísticamente muy similares, es decir que la percepción del nivel de servicio está relacionada con el vehículo y no con el horario de salida o el pago de una tarifa. Por lo anterior se decidió usar el promedio de los tres indicadores y por lo tanto una sola variable latente para las tres alternativas de auto.

Los indicadores de comodidad en cuanto a conseguir asiento para los modos auto y taxi y el indicador de confiabilidad en el tiempo de espera para el auto no fueron incluidos dentro del modelo. En los primeros dos casos porque la lógica indica que para estos modos siempre habrá asientos disponibles y en el segundo caso porque el tiempo de espera no es aplicable a los viajes realizados en auto particular. En la Tabla 6 se muestran los indicadores de percepción usados para la estimación del modelo.

Tabla 6 Indicadores de percepción usados para la estimación

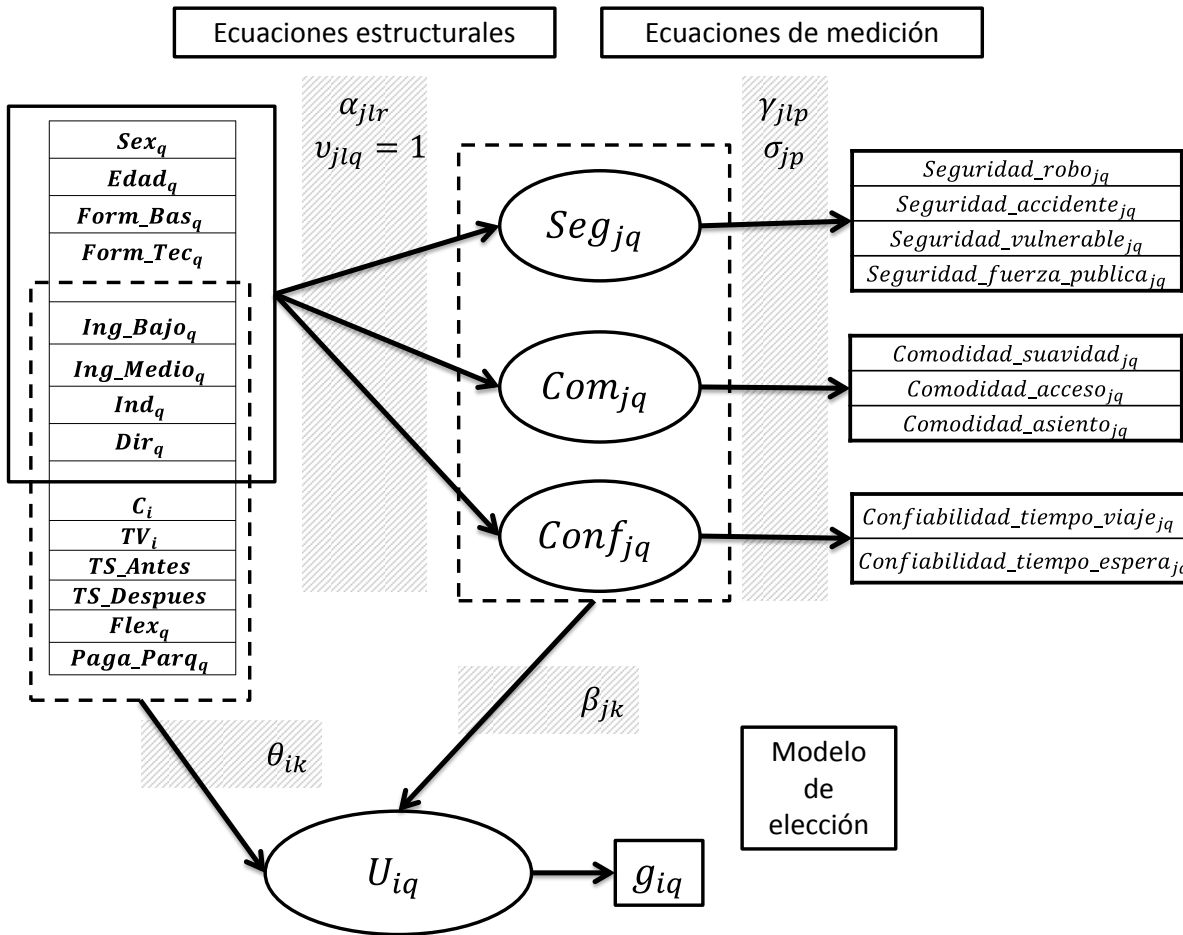
Indicador	Modo j			
	Bus	Metro	Taxi	Auto
<i>Seguridad_robo_{jq}</i>	X	X	X	X
<i>Seguridad_accidente_{jq}</i>	X	X	X	X
<i>Seguridad_vulnerable_{jq}</i>	X	X	X	X
<i>Seguridad_fuerza_publica_{jq}</i>	X	X	X	X
<i>Comodidad_suavidad_{jq}</i>	X	X	X	X
<i>Comodidad_acceso_{jq}</i>	X	X	X	X
<i>Comodidad_asiento_{jq}</i>	X	X		
<i>Confiabilidad_tiempo_viaje_{jq}</i>	X	X	X	X
<i>Confiabilidad_tiempo_espera_{jq}</i>	X	X	X	

Fuente: Elaboración Propia

3.3 Estructura del modelo

La estructura del modelo MIMIC consta de $j = 4$ modos de transporte (Bus, Metro, Taxi y Auto) para las $l = 3$ variables latentes (Seguridad, Comodidad, Confiabilidad) y $p = 9$ indicadores de percepción (ver Tabla 6). El modelo de elección discreta consta de $i = 7$ alternativas de elección: (1) Bus, (2) Metro o (3) Bus-metro; (4) Taxi, (5) Salir en auto antes del cobro por congestión, (6) Salir en auto y pagar el cobro por congestión y (7) Salir en auto después del cobro por congestión. Las relaciones entre indicadores, variables latentes, variables explicativas y elección de alternativa se presentan en la Figura 14.

Figura 14 Diagrama del modelo híbrido



Fuente: Elaboración propia

3.3.1 Ecuaciones de medición

Se asume que el término de error de las ecuaciones de medición sigue una distribución con media cero y una varianza σ_{jp} que debe ser estimada, se tiene además un parámetro γ_{jlp} para cada indicador por lo que la función de densidad probabilidad de los indicadores de percepción se supuso normal según (9):

$$f(y_{jlpq} | \eta_{jlpq}, \gamma_{jlp}) = \frac{1}{\sigma_{jp} \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y_{jlpq} - \gamma_{jlp} \cdot \eta_{jlpq}}{\sigma_{jp}} \right)^2 \right] \quad (9)$$

La relación entre indicadores de percepción y variables latentes es directa debido a la forma como estos fueron contruidos y preguntados a los individuos. Sin embargo para confirmar esta relación y asegurar el correcto desempeño del modelo se llevó a cabo un análisis factorial.

3.3.2 Ecuaciones estructurales

Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados (al asegurar que el valor de la variable latente siempre sea positivo) se formulan ecuaciones estructurales utilizando transformación exponencial (10) donde v_{jlq} sigue una distribución normal con media cero y varianza uno:

$$\eta_{jlq} = \exp\left(\sum_r \alpha_{jlr} \cdot s_{jqr} + v_{jlq}\right) \quad (10)$$

Inicialmente se consideraron cuatro variables explicativas para las ecuaciones estructurales: sexo, edad, formación educativa, nivel de ingreso y cargo desempeñado del individuo q como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7 Variables ecuaciones estructurales de las variables latentes

Variable	Valor
<i>Sex_q</i>	= 1: masculino, = 0 femenino
<i>Edad_q</i>	= Edad [años]
<i>Ing_Bajo_q</i>	= 1: Ingreso bajo, = 0: Ingreso medio e ingreso alto
<i>Ing_Medio_q</i>	= 1: Ingreso medio, = 0: Ingreso bajo e ingreso alto
<i>Form_Bas_q</i>	= 1: Formación educativa ninguna, primaria o bachiller; = 0: Formación educativa técnica, tecnológica, profesional o superior
<i>Form_Tec_q</i>	= 1: Formación Educativa técnica o tecnológica, = 0: Formación educativa ninguna, primaria, bachiller, profesional o superior
<i>Ind_q</i>	= 1: Trabajo Independiente, =0: en otro caso
<i>Dir_q</i>	= 1: Cargo directivo, =0: en otro caso

Fuente: Elaboración Propia

Con estas variables se hizo una estimación exploratoria del modelo MIMIC con el fin de descartar las variables muy poco significativas en las ecuaciones estructurales de las variables latentes⁵. Para la estimación se usó el método de máxima verosimilitud simulada para las funciones de densidad de probabilidad de las ecuaciones estructurales y las ecuaciones de medición. Los parámetros de las ecuaciones estructurales que resultaron significativos en el modelo MIMIC se presentan en las Tabla 8.

⁵ En esta etapa exploratoria conservan en el modelo las variables significativas a un 80% es decir t-values mayores de 0,9.

Tabla 8 Variables de las ecuaciones estructurales de las variables latentes

Variable explicativa	Variable latente											
	Seguridad				Comodidad				Confiabilidad			
	Bus	Metro	Taxi	Auto	Bus	Metro	Taxi	Auto	Bus	Metro	Taxi	Auto
<i>Sex_q</i>	X	X			X	X		X	X		X	
<i>Edad_q</i>	X		X	X	X		X	X	X		X	
<i>Ing_Bajo_q</i>	X		X					X	X		X	
<i>Ing_Medio_q</i>	X	X	X		X		X			X	X	
<i>Form_Bas_q</i>	X				X	X					X	X
<i>Form_Tec_q</i>		X	X		X					X	X	
<i>Ind_q</i>	X	X	X		X				X			
<i>Dir_q</i>	X		X		X	X			X			X

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Especificación de modelos

Para las utilidades representativas del modelo de elección se tuvieron en cuenta las variables de la encuesta de preferencias declaradas, las características socioeconómicas de los individuos y las variables latentes de cada modo como se puede observar en la Tabla 9. Se consideraron variaciones de gusto en el costo con el nivel de ingreso⁶ y de la flexibilidad de elección de horario con el cargo desempeñado; Las variables latentes se incluyeron directamente en las funciones de utilidad de cada modo, para el caso de la alternativa combinada Bus-Metro se usan las variables latentes del Bus⁷ como se muestra en la Tabla 10.

Inicialmente se plantea un modelo de elección tipo Logit, por lo que la probabilidad de elección condicionada para una alternativa *ies* (18):

$$Prob(g_{iq} | x_{ikq}, \eta_{ilq}, \theta_{ik}, \beta_{il}) = \frac{\exp[\sum_k \theta_{ik} \cdot X_{ikq} + \sum_l \beta_{il} \cdot \eta_{jlq}]}{\sum_{M \in A(q)} \exp[\sum_k \theta_{ik} \cdot X_{ikq} + \sum_l \beta_{il} \cdot \eta_{jlq}]} \quad (18)$$

Donde $A(q)$ es el subconjunto de alternativas disponibles para el individuo q

⁶ Modelos con variaciones de gustos en el tiempo de viaje dan como resultados parámetros positivos para los estratos 1 y 2.

⁷ Se estimaron modelos secuenciales usando las variables latentes del bus, del metro y el promedio de ambas para la alternativa bus-metro. El uso de las variables latentes del bus arrojó los mejores resultados.

Tabla 9 Variables del Modelo de elección

Variable	Valor
V_i	Utilidad representativa de la alternativa $i=\{ \text{Bus, Metro, Bus-Metro, Taxi, Auto saliendo antes del cobro por congestión (AutoSACC), Auto pagando el cobro por congestión (AutoPCC) y Auto saliendo después del cobro por congestión (AutoSDCC)}\}$
C_i	Costo de la alternativa i [Miles de COL\$]
TV_i	Tiempo de viaje alternativa i [min]
TS_Antes	Tiempo de salida antes de la 8:00 am necesario para evitar el cobro por congestión [min]
$TS_Despues$	Tiempo de salida después de las 8:00 am necesario para evitar el cobro por congestión [min]
$Flex_q$	=1, si el individuo tiene flexibilidad para llegar antes o después de su hora de trabajo; = 0 en otro caso
$Paga_Parq_d$	=1, si el individuo debe pagar el parqueadero en el destino de su viaje; = 0 en otro caso
Ing_Bajo_q	=1: Ingreso Bajo, =0: Ingreso medio e ingreso alto
Ing_Medio_q	=1: Ingreso Medio, =0: Ingreso bajo e ingreso alto
Ind_q	=1: Trabajo Independiente, =0: en otro caso
Dir_q	=1: Cargo directivo, =0: en otro caso
Seg_{jq}	Variable latente Seguridad del modo $j = \{ \text{Bus, Metro, Taxi, Auto} \}$
Com_{jq}	Variable latente Comodidad del modo j
$Conf_{jq}$	Variable latente Confiabilidad del modo j

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10 Utilidades representativas de las alternativas

Alt	Utilidad Representativa
(1) Bus	$\theta_{Bus} + (\theta_C + \theta_{C_Ing_Bajo} \cdot Ing_Bajo_q + \theta_{C_Ing_Medio} \cdot Ing_Medio_q) \cdot C_{Bus} + \theta_{TV} \cdot TV_{Bus} + \beta_{Seg} \cdot Seg_{Bus} + \beta_{Com} \cdot Com_{Bus} + \beta_{Conf} \cdot Conf_{Bus}$
(2) Metro	$\theta_{Metro} + (\theta_C + \theta_{C_Ing_Bajo} \cdot Ing_Bajo_q + \theta_{C_Ing_Medio} \cdot Ing_Medio_q) \cdot C_{Metro} + \theta_{TV} \cdot TV_{Metro} + \beta_{Seg} \cdot Seg_{Metro} + \beta_{Com} \cdot Com_{Metro} + \beta_{Conf} \cdot Conf_{Metro}$
(3) Bus-Metro	$\theta_{Bus-Metro} + (\theta_C + \theta_{C_Ing_Bajo} \cdot Ing_Bajo_q + \theta_{C_Ing_Medio} \cdot Ing_Medio_q) \cdot C_{Bus-Metro} + \theta_{TV} \cdot TV_{Bus-Metro} + \beta_{Seg} \cdot Seg_{Bus} + \beta_{Com} \cdot Com_{Bus} + \beta_{Conf} \cdot Conf_{Bus}$
(4) Taxi	$\theta_{Taxi} + (\theta_C + \theta_{C_Ing_Bajo} \cdot Ing_Bajo_q + \theta_{C_Ing_Medio} \cdot Ing_Medio_q) \cdot C_{Taxi} + \theta_{TV} \cdot TV_{Taxi} + \beta_{Seg} \cdot Seg_{Taxi} + \beta_{Com} \cdot Com_{Taxi} + \beta_{Conf} \cdot Conf_{Taxi}$
(5) AutoSACC	$\theta_{AutoSACC} + \theta_{TV} \cdot TV_{AutoSACC} + \theta_{TS_Antes} \cdot TS_Antes + (\theta_{Flex} + \theta_{FlexInd} \cdot Ind_q + \theta_{FlexDir} \cdot Dir_q) \cdot Flex_q + \theta_{Paga_Parq} \cdot Paga_Parq_q + \beta_{Seg} \cdot Seg_{Auto} + \beta_{Com} \cdot Com_{Auto} + \beta_{Conf} \cdot Conf_{Auto}$
(6) AutoPCC	$(\theta_C + \theta_{C_Ing_Bajo} \cdot Ing_Bajo_q + \theta_{C_Ing_Medio} \cdot Ing_Medio_q) \cdot C_{AutoPCC} + \theta_{TV} \cdot TV_{AutoPCC} + \theta_{Paga_Parq} \cdot Paga_Parq_q + \beta_{Seg} \cdot Seg_{Auto} + \beta_{Com} \cdot Com_{Auto} + \beta_{Conf} \cdot Conf_{Auto}$
(7) AutoSDCC	$\theta_{AutoSDCC} + \theta_{TV} \cdot TV_{AutoSDCC} + \theta_{TS_Despues} \cdot TS_Despues + (\theta_{Flex} + \theta_{FlexInd} \cdot Ind_q + \theta_{FlexDir} \cdot Dir_q) \cdot Flex_q + \theta_{Paga_Parq} \cdot Paga_Parq_q + \beta_{Seg} \cdot Seg_{Auto} + \beta_{Com} \cdot Com_{Auto} + \beta_{Conf} \cdot Conf_{Auto}$

Fuente: Elaboración Propia

3.3.4 Estimación del modelo

Para la estimación del modelo se utiliza la máxima verosimilitud simulada, donde haciendo uso de las propiedades del valor esperado de la función de probabilidad condicionada, es posible remplazar la formulación por la media empírica dada por (19). Donde η_{ilq}^S es un valor aleatorio simulado específico de η_{ilq} y S es el total de simulaciones sobre las que se evalúa la función de probabilidad aproximada (Raveu, 2009):

$$\begin{aligned} \widetilde{Pr}(g_{iq}, y_{jpq} | x_{ikq}, s_{jqrp}, \theta_{ik}, \beta_{jl}, \alpha_{jlr}, \gamma_{jlp}, \sigma_{jp}) \\ = \frac{1}{S} \sum_{S=1}^S \left\{ \frac{\exp[\sum_k \theta_{ik} \cdot X_{ikq} + \sum_l \beta_{il} \cdot \eta_{jlq}]}{\sum_{M \in A(q)} \exp[\sum_k \theta_{ik} \cdot X_{ikq} + \sum_l \beta_{il} \cdot \eta_{jlq}]} \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

Dado que la función de verosimilitud corresponde al producto de las probabilidades de elección de las alternativas efectivamente escogidas para todos los individuos, es conveniente aplicar el logaritmo a fin de trabajar con una suma de términos. De esta manera la función objetivo a maximizar es (20) (Raveu, 2009):

$$Max \log L = \sum_q \ln \widetilde{Pr}(g_{iq}, y_{jpq} | x_{ikq}, s_{jqrp}, \theta_{ik}, \beta_{jl}, \alpha_{jlr}, \gamma_{jlp}, \sigma_{jp}) \quad (20)$$

Se usó el paquete OxMetricsTM para la estimación de los parámetros de la ecuación (20), con 500 simulaciones, teniendo en cuenta efecto el efecto panel producido por tener 9 elecciones diferentes para cada individuo.

3.4 Resultados del modelo

En la Tabla 11 se muestran los valores de los parámetros θ_{ik} y β_{jl} del modelo híbrido y los resultados de un modelo logit multinomial (MNL)⁸, en la Tabla 12 se presentan los valores de los parámetros α_{jlr} de las ecuaciones estructurales (como se indicó anteriormente la desviación estándar de las ecuaciones estructurales fue fijada en uno) y en la Tabla 13 y Tabla 14 se muestran los valores de los parámetros γ_{jlp} y las desviaciones estándar σ_{jp} de las ecuaciones de medición.

⁸ Las funciones de utilidad del modelo MNL son iguales a las del modelo híbrido excluyendo las variables latentes

Tabla 11 Parámetros θ_{ik} y β_{jl} del modelo híbrido y del modelo MNL

Parametro	Modelo Híbrido			MNL		
	Valor	T - Value	Rob T - Value	Valor	T - Value	Rob T - Value
θ_{Bus}	-2,0339	-15,869	-12,642	-1.4718	-26.956	-16.38
θ_{Metro}	-2,317	-11,349	-9,201	-1.4713	-19.258	-10.868
$\theta_{Bus-Metro}$	-1,7575	-9,9174	-8,2927	-1.2775	-18.126	-10.733
θ_{Taxi}	-1,6068	-9,0337	-8,1623	-0.48028	-9.4737	-5.7902
$\theta_{AutoSACC}$	-0,21807	-1,6198	-1,0639	-0.15788	-1.258	-0.83254
$\theta_{AutoSDCC}$	-2,6176	-24,089	-17,107	-2.34	-23.172	-16.384
θ_C	-0,36137	-35,973	-22,291	-0.29603	-34.88	-19.953
$\theta_{C_Ing_Bajo}$	-0,074343	-4,1279	-2,1656	-0.080221	-5.5305	-2.9779
$\theta_{C_Ing_Medio}$	-0,053073	-6,0439	-3,3126	-0.067369	-9.1647	-4.5904
θ_{TV}	-0,011833	-4,6528	-4,2929	-0.01139	-5.936	-3.9646
θ_{TS_Antes}	-0,020533	-20,211	-13,034	-0.018546	-19.331	-13.307
$\theta_{TS_Despues}$	-0,019298	-12,935	-10,972	-0.018835	-12.854	-11.049
θ_{Flex}	0,19037	2,8664	1,6124	0.2583	5.0213	2.7183
$\theta_{FlexDir}$	0,059719	0,60691	0,31017	0.34645	4.4716	2.2792
$\theta_{FlexInd}$	0,16375	1,9602	1,1048	0.23302	3.6473	2.0404
θ_{Paga_Parq}	-0,36439	-2,6886	-2,9816	-0.29079	-5.9358	-3.5277
β_{Seg}	0,43216	7,8139	8,9446			
β_{Com}	0,54576	12,055	12,745			
β_{Conf}	0,51654	8,8395	8,8009			
LL Modelo de elección		-11805,9			-12980,6	
ρ^2		0,258			0,184	
ρ^2 corregido		0,192			0,112	
ρ^2 ajustado		0,257			0,183	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 12 Parámetros α_{jlr} de las ecuaciones estructurales

VARIABLE LATENTE	MODO	VARIABLE EXPLICATIVA	VALOR	T-VALUE	ROB T-VALUE
Seg	Bus	Sex	0,11292	4,0588	2,7114
		Edad	-0,0032011	-2,4917	-1,4816
		Ing_Bajo	0,18073	3,6724	2,5509
		Ing_Medio	-0,13029	-4,9229	-3,6666
		Form_Bas	-0,10607	-2,9794	-1,7919
		Ind	-0,05275	-1,6632	-1,2335
		Dir	-0,18313	-4,428	-3,0874
	Metro	Sex	0,077545	2,5297	2,5292
		Ing_Medio	-0,093745	-2,9989	-2,8684
		Form_Tec	0,07168	1,8195	1,7739
		Ind	-0,070775	-1,8947	-1,773
	Taxi	Edad	-0,0053611	-4,6487	-3,4786
		Ing_Bajo	0,15298	3,7386	3,419
		Ing_Medio	-0,063353	-2,267	-1,9709
		Form_Tec	-0,065646	-1,9179	-1,6364
		Ind	0,1116	3,5731	2,8773
		Dir	0,061897	1,4316	1,1449
Auto	Edad	-0,0019587	-1,443	-1,7204	
Com	Bus	Sex	-0,073225	-3,0711	-1,6262
		Edad	0,0038958	3,8525	1,8022
		Ing_Medio	-0,03149	-1,2618	-0,60395
		Form_Bas	0,050514	1,7477	0,99397
		Form_Tec	0,09667	3,4925	2,0162
		Ind	-0,10069	-3,8516	-2,1411
		Dir	-0,16489	-2,9888	-1,4373
	Metro	Sex	0,0876	3,7227	1,8993
		Form_Bas	0,083566	3,5355	1,9381
		Dir	-0,041882	-1,0369	-0,77501
	Taxi	Edad	0,0042393	2,2913	2,1519
		Ing_Medio	0,017667	0,37842	0,39454
	Auto	Sex	0,052199	1,0946	1,6513
		Edad	0,00026034	0,1121	0,11355
		Ing_Bajo	-0,077352	-0,99652	-1,4187
Conf	Bus	Sex	-0,063514	-2,9268	-1,8203
		Edad	-0,0050499	-5,6242	-3,3268
		Ing_Bajo	-0,08457	-3,0009	-2,3334

VARIABLE LATENTE	MODO	VARIABLE EXPLICATIVA	VALOR	T-VALUE	ROB T-VALUE
		Ind	0,041483	1,6368	1,0893
		Dir	-0,28748	-8,3403	-4,6027
	Metro	Ing_Medio	0,054116	1,1179	1,0751
		Form_Tec	0,064429	1,1075	1,1846
	Taxi	Sex	-0,090052	-2,4024	-1,8006
		Edad	-0,0025634	-1,7524	-1,3452
		Ing_Bajo	0,18559	3,0653	2,3386
		Ing_Medio	0,068928	1,6118	1,0217
		Form_Bas	-0,096681	-2,3246	-1,9154
		Form_Tec	0,024858	0,43047	0,24399
	Auto	Form_Bas	-0,15665	-2,3654	-2,3356
		Dir	0,26716	3,0363	2,9563

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13 Desviaciones estándar σ_{jp} de las ecuaciones de medición

VARIABLE LATENTE	MODO	INDICADOR	VALOR	T-VALUE	ROB T-VALUE
Seg	Bus	Seguridad_robo	0,91057	12,306	10,343
		Seguridad_accidente	0,72711	11,073	12,407
		Seguriad_vulnerable	0,71722	12,238	17,827
		Seguridad_fuerza_pública	0,685	9,4587	7,886
	Metro	Seguridad_robo	1,2051	9,094	5,8168
		Seguridad_accidente	2,251	20,561	36,489
		Seguriad_vulnerable	1,8843	15,712	21,477
		Seguridad_fuerza_pública	2,2098	20,575	26,793
	Taxi	Seguridad_robo	0,98741	12,424	14,408
		Seguridad_accidente	1,0472	10,885	13,947
		Seguriad_vulnerable	1,1684	12,248	15,717
		Seguridad_fuerza_pública	0,98409	10,758	11,574
	Auto	Seguridad_robo	1,6697	14,656	16,154
		Seguridad_accidente	1,937	20,329	42,961
		Seguriad_vulnerable	2,2507	21,965	50,22
		Seguridad_fuerza_pública	1,7345	16,369	24,123
Com	Bus	Comodidad_suavidad	0,37669	8,6669	7,1688
		Comodidad_acceso	0,96964	9,5203	11,751
		Comodidad_asiento	0,43548	9,9943	5,787
	Metro	Comodidad_suavidad	1,8009	15,64	18,406
		Comodidad_acceso	1,0331	8,4732	8,6136
		Comodidad_asiento	0,29995	7,8548	4,643
	Taxi	Comodidad_suavidad	1,5766	12,52	9,4399
		Comodidad_acceso	1,9394	14,55	22,392
	Auto	Comodidad_suavidad	2,3134	22,008	43,501
		Comodidad_acceso	2,2557	21,044	43,266
Conf	Bus	Confiabilidad_tiempo_viaje	0,47524	8,223	5,5914
		Confiabilidad_tiempo_espera	0,44307	7,8048	5,2172
	Metro	Confiabilidad_tiempo_viaje	2,0574	20,328	17,386
		Confiabilidad_tiempo_espera	1,8454	17,099	19,516
	Taxi	Confiabilidad_tiempo_viaje	1,118	12,261	9,0173
		Confiabilidad_tiempo_espera	1,0849	9,3903	7,5169
	Auto	Confiabilidad_tiempo_viaje	1,7484	18,492	22,438

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14 Parámetros γ_{jlp} ecuaciones de medición

VARIABLE LATENTE	MODO	INDICADOR	VALOR	T-VALUE	ROB T-VALUE
Seg	Bus	Seguridad_robo	3,253	17,986	12,345
		Seguridad_accidente	3,391	18,118	13,000
		Seguriad_vulnerable	3,119	19,298	14,342
		Seguridad_fuerza_pública	3,615	19,076	12,736
	Metro	Seguridad_robo	3,344	28,773	29,282
		Seguridad_accidente	4,464	21,999	28,556
		Seguriad_vulnerable	3,919	20,869	23,826
		Seguridad_fuerza_pública	4,281	19,863	17,634
	Tax	Seguridad_robo	3,902	19,972	16,399
		Seguridad_accidente	4,305	19,640	16,623
		Seguriad_vulnerable	4,365	19,059	16,761
		Seguridad_fuerza_pública	4,362	18,553	15,370
	Auto	Seguridad_robo	3,586	16,759	17,198
		Seguridad_accidente	3,991	16,044	20,209
		Seguriad_vulnerable	4,266	15,961	20,887
		Seguridad_fuerza_pública	3,918	15,668	16,334
Com	Bus	Comodidad_suavidad	1,950	16,659	7,227
		Comodidad_acceso	2,926	19,085	10,494
		Comodidad_asiento	2,306	22,692	11,191
	Metro	Comodidad_suavidad	3,493	26,013	33,281
		Comodidad_acceso	3,201	26,454	22,035
		Comodidad_asiento	2,572	59,526	38,579
	Tax	Comodidad_suavidad	2,950	11,673	10,232
		Comodidad_acceso	3,464	11,847	12,106
	Auto	Comodidad_suavidad	4,043	10,453	11,362
		Comodidad_acceso	3,935	11,195	12,672
Conf	Bus	Confiabilidad_tiempo_viaje	3,469	31,261	20,241
		Confiabilidad_tiempo_espera	3,774	30,490	20,000
	Metro	Confiabilidad_tiempo_viaje	3,643	21,102	16,490
		Confiabilidad_tiempo_espera	3,739	19,163	16,639
	Tax	Confiabilidad_tiempo_viaje	3,951	14,077	10,965
		Confiabilidad_tiempo_espera	3,904	13,331	9,993
	Auto	Confiabilidad_tiempo_viaje	3,500	21,785	19,437

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 15 se muestran los valores del tiempo de viaje y de salida antes y después de las 8:00 am para cada nivel de ingresos.

Tabla 15 Valores del tiempo por nivel de ingreso

Nivel de ingreso	Valor del tiempo de viaje [COL\$/min]	Valor del tiempo de salida antes [COL\$/min]	Valor del tiempo de salida después [COL\$/min]
Bajo	27,16	47,13	44,29
Medio	28,55	49,54	46,56
Alto	32,74	56,82	53,40

Fuente: Elaboración propia

3.5 Análisis de resultados

Todos los parámetros de los modelos de elección discreta resultan significativos y con el signo esperado, sin embargo a partir de los valores de log-verosimilitud y de los estadísticos ρ^2 se concluye que el modelo con variables latentes es superior al modelo logit multinomial.

La magnitud del parámetro del costo aumenta en la medida que disminuye el nivel de ingreso y es por esto que el valor del tiempo de viaje para los individuos de ingresos medios y altos es un 5 y 15 % superior al de los individuos con ingresos bajos.

Los parámetros del tiempo de salida antes y después de las 8:00 am para evitar el cobro por congestión son más significativos que el parámetro de tiempo de viaje, en consecuencia el valor del tiempo de salida antes y después del cobro por congestión es un 70 y 60% superior al valor del tiempo de viaje. Es decir que los conductores penalizan más el tiempo total requerido para evitar el cobro que el tiempo de viaje en el vehículo.

La flexibilidad de horario de llegada al trabajo aumenta la utilidad de las alternativas salir antes y después del cobro por congestión, este aumento es más importante entre los individuos con trabajos independientes que entre los individuos con cargos directivos, empleados o estudiantes. Por otro lado la utilidad de las alternativas que usan el auto como modo de transporte se reduce cuando el individuo debe pagar por el parqueadero en su lugar de destino. Si bien los parámetros de estas variables son significativos, su importancia es menor si se comparan con el costo de viaje y la hora de salida para evitar el cobro.

Todas las variables latentes resultaron muy significativas, destacándose la percepción de comodidad como la más importante. Al comparar los estadísticos t de ambos modelos se observa que las constantes específicas y la flexibilidad de horario de llegada al trabajo son menos significativas en el modelo híbrido que en el modelo MNL, es decir que estos parámetros están sobreestimados en el modelo logit multinomial ya que deben absorber el efecto de las variables latentes omitidas. Lo anterior, sumado a la mejora en la log-

verosimilitud, refleja la importancia de la inclusión de estas tres variables intangibles en el modelo de elección discreta.

En la Tabla 16 se muestra el signo de los parámetros α_{jlr} que resultaron significativos en el modelo híbrido, se observa que ninguna variable de las ecuaciones estructurales explica de forma significativa la variabilidad en las percepciones de seguridad y comodidad para el auto y la confiabilidad del metro.

En los casos anteriores el valor de la variable latente es cercano a uno para todos los individuos⁹ (al igual que la desviación estándar que fue normalizada) por lo tanto la variabilidad en la percepción de los indicadores es asumida en su totalidad por la desviación estándar de las ecuaciones de medición.

La falta de capacidad explicativa de estos atributos puede ser originada en el hecho de que todos los encuestados son usuarios (en muchos casos cautivos) del auto, lo que genera un sesgo en el valor de los indicadores de percepción. Por lo tanto es necesario realizar una encuesta que capte más atributos de los individuos y con una muestra que cubra de forma proporcional a los usuarios habituales de todos los modos de transporte para tener una mejor estimación de los parámetros de las ecuaciones estructurales.

Tabla 16 Signo de los Parámetros α_{jlr} significativos de las ecuaciones estructurales

Variable explicativa	Variable latente											
	Seguridad				Comodidad				Confiabilidad			
	Bus	Metro	Taxi	Auto	Bus	Metro	Taxi	Auto	Bus	Metro	Taxi	Auto
<i>Sex_q</i>	+	+			-	+			-		-	
<i>Edad_q</i>	-		-		+		+		-		-	
<i>Ing_Bajo_q</i>	+		+						-		+	
<i>Ing_Medio_q</i>	-	-	-								+	
<i>Form_Bas_q</i>	-				+	+					-	-
<i>Form_Tec_q</i>		+	-		+							
<i>Ind_q</i>	-	-	+		-				+			
<i>Dir_q</i>	-				-				-			+

Fuente: Elaboración Propia

⁹ Por la transformación exponencial cuando todos los parámetros son iguales a cero la variable latente toma el valor de 1

Las percepciones de seguridad y confiabilidad para los modos bus y taxi decrece con la edad, mientras que la percepción de comodidad aumenta con esta variable, la percepción de los indicadores del bus siempre es menor entre las personas con cargo directivo.

Según genero los hombres califican mejor la seguridad del bus además de la comodidad y seguridad del metro, mientras que las mujeres perciben mejor la confiabilidad del bus y del taxi y la comodidad del bus.

Teniendo en cuenta que para ingresos altos las dos variables correspondientes a los ingresos son iguales a cero, se observa que la percepción de seguridad disminuye entre las personas de ingresos medios para los modos de transporte público y aumenta para las personas de ingresos bajos (excluyendo el metro).

Considerando que se para personas con formación educativa universitaria o superior el valor de las dos variables de formación académica son iguales a cero. Se aprecia que la percepción de comodidad del bus y del metro es mayor para las personas con formación básica y técnica, mientras que la percepción de confiabilidad del auto y del taxi es menor para las personas con menor formación académica.

Todos los parámetros y desviaciones estándar de las ecuaciones de medición son muy significativos. Como es de esperarse aquellos indicadores relacionados con variables latentes con muy pocos parámetros explicativos tienen desviaciones estándar mayores.

3.5.1 Calculo de Elasticidades

La elasticidad directa, que es el cambio en la probabilidad de elegir la alternativa i dado un cambio marginal en el valor del atributo x_{ik} y está dada por (20):

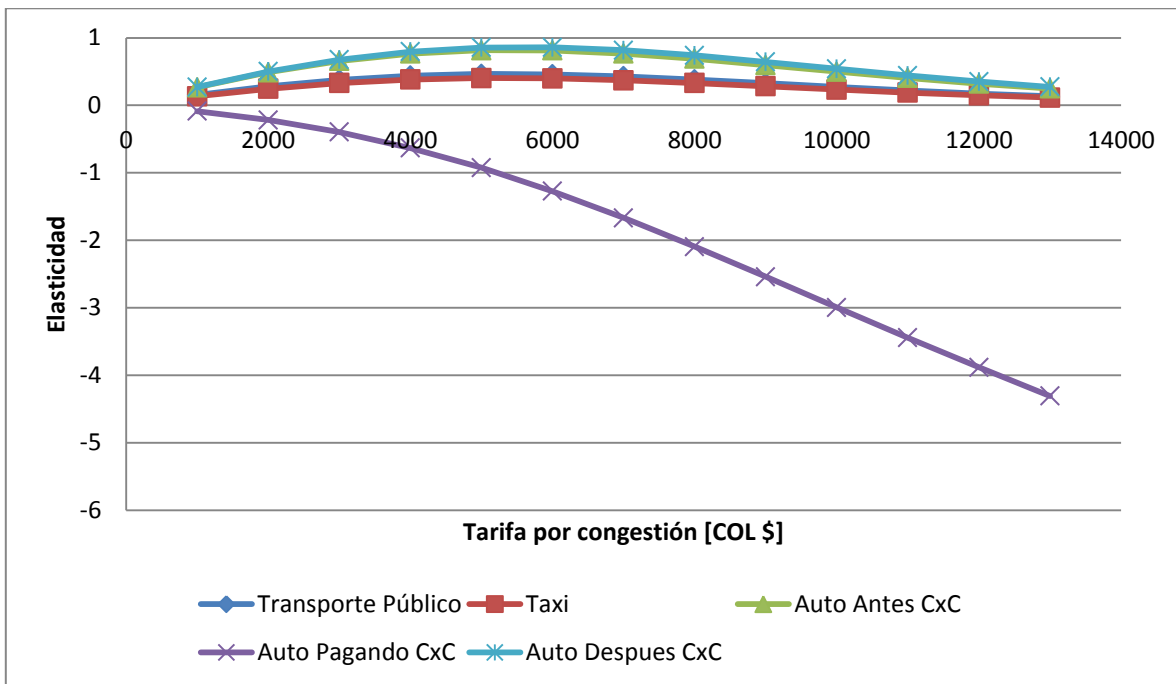
$$E_{P_i, x_{ik}} = \frac{\partial P_i}{\partial x_{ik}} \cdot \frac{x_{ik}}{P_i} \approx \frac{\Delta P_i}{\Delta x_{ik}} \cdot \frac{x_{ik}}{P_i} \quad (20)$$

Mientras que la elasticidad cruzada, que es el porcentaje de cambio en la probabilidad de elegir la alternativa i dado un cambio marginal en el valor del atributo x_{nk} perteneciente a la alternativa n y está dada por (21):

$$E_{P_i, x_{nk}} = \frac{\partial P_i}{\partial x_{nk}} \cdot \frac{x_{nk}}{P_i} \approx \frac{\Delta P_i}{\Delta x_{nk}} \cdot \frac{x_{nk}}{P_i} \quad (21)$$

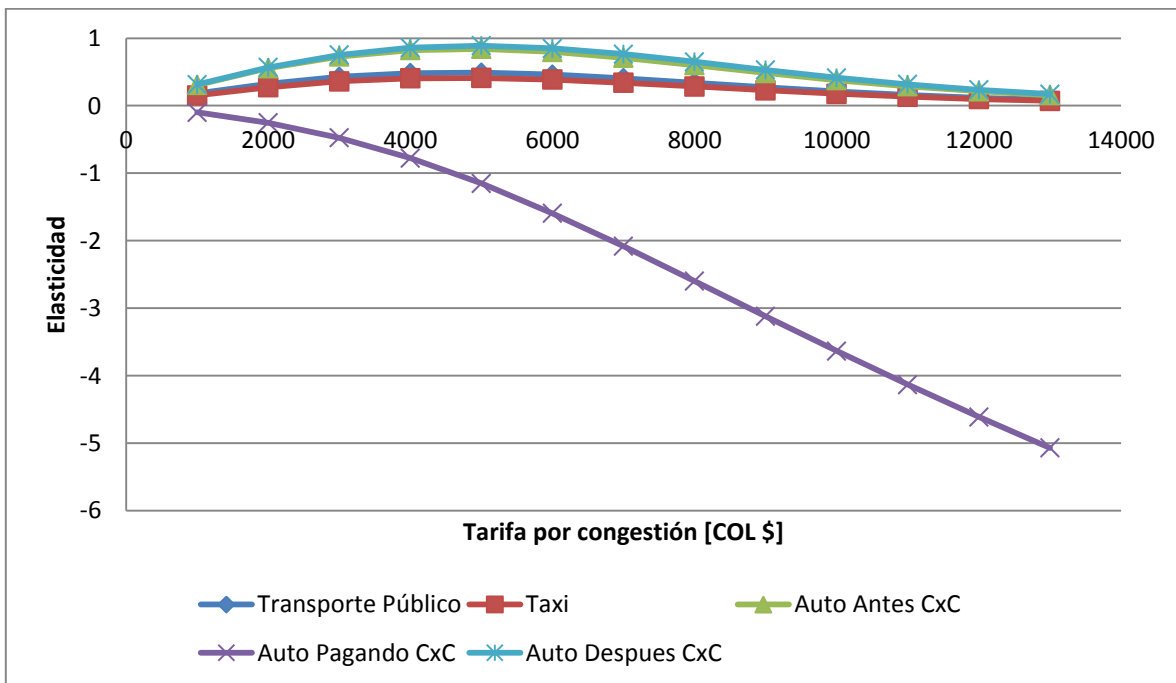
Se desea hacer un análisis de elasticidades de las variables directamente relacionadas con el cobro por congestión, estas son $C_{AutoPCC}$, TS_Antes y $TS_Despues$. En los tres casos se usa un diferencial Δx_k igual al 1% del valor de x_k . Los resultados obtenidos se presentan de la Figura 15 a la Figura 19.

Figura 15 Variación de la elasticidad de la demanda con respecto a la tarifa por congestión para individuos de ingreso alto



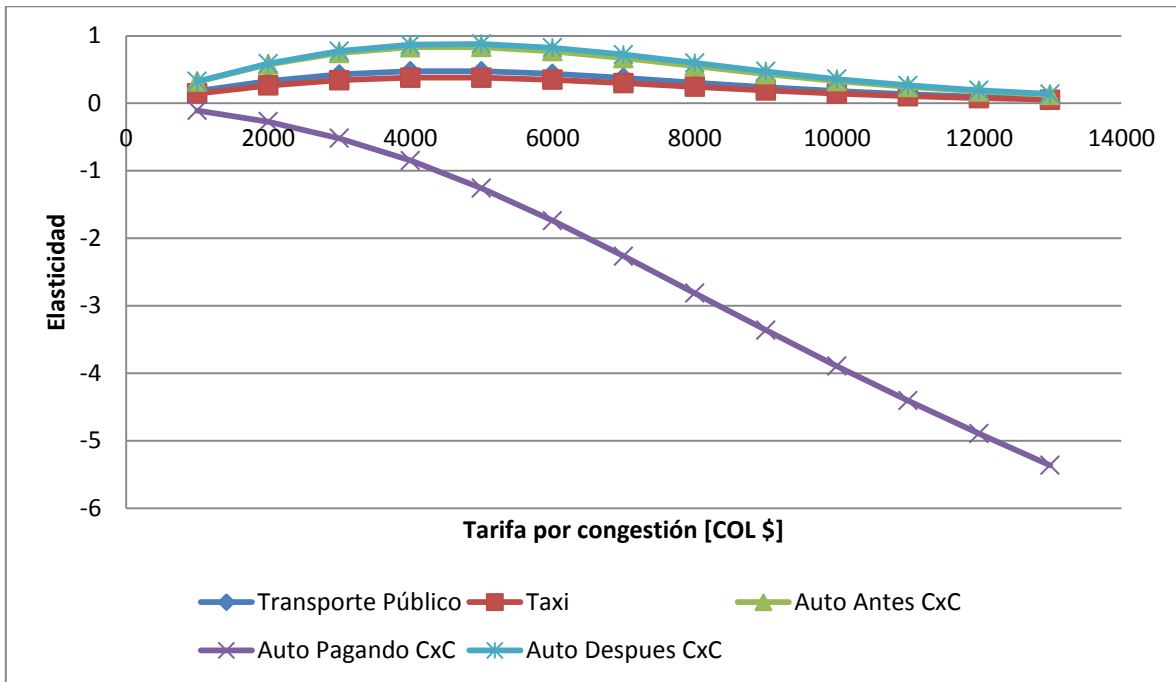
Fuente Elaboración Propia

Figura 16 Variación de la elasticidad de la demanda con respecto a la tarifa por congestión para individuos de ingreso medio



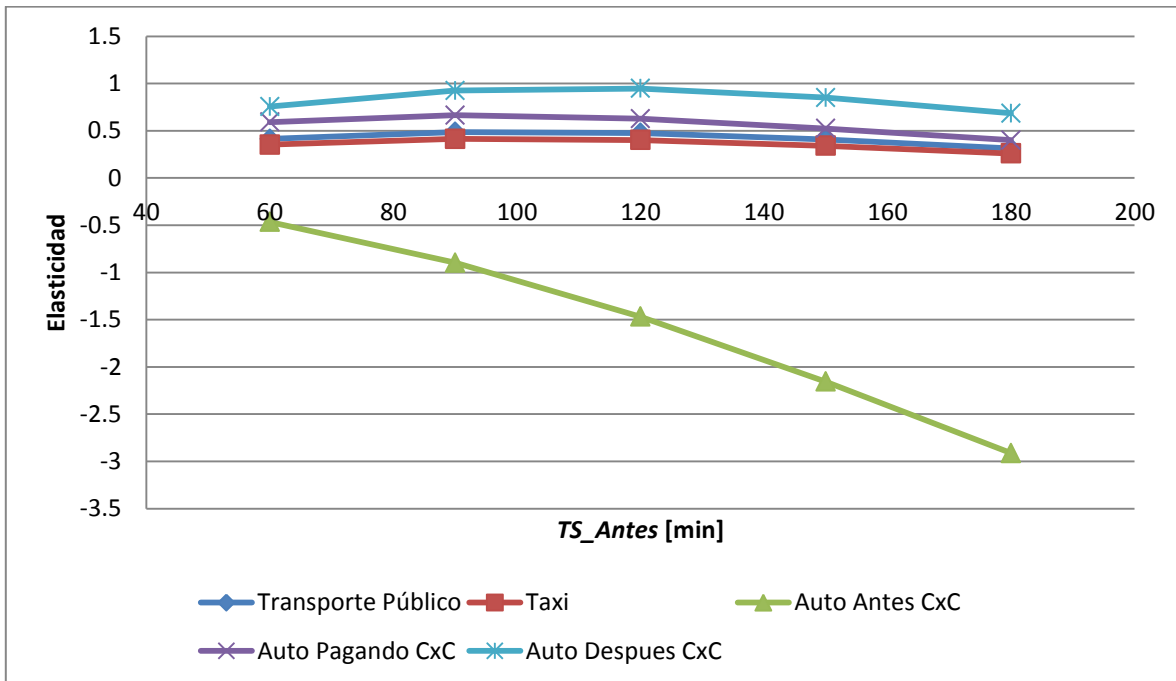
Fuente: Elaboración Propia

Figura 17 Variación de la elasticidad de la demanda con respecto a la tarifa por congestión para individuos de ingreso bajo



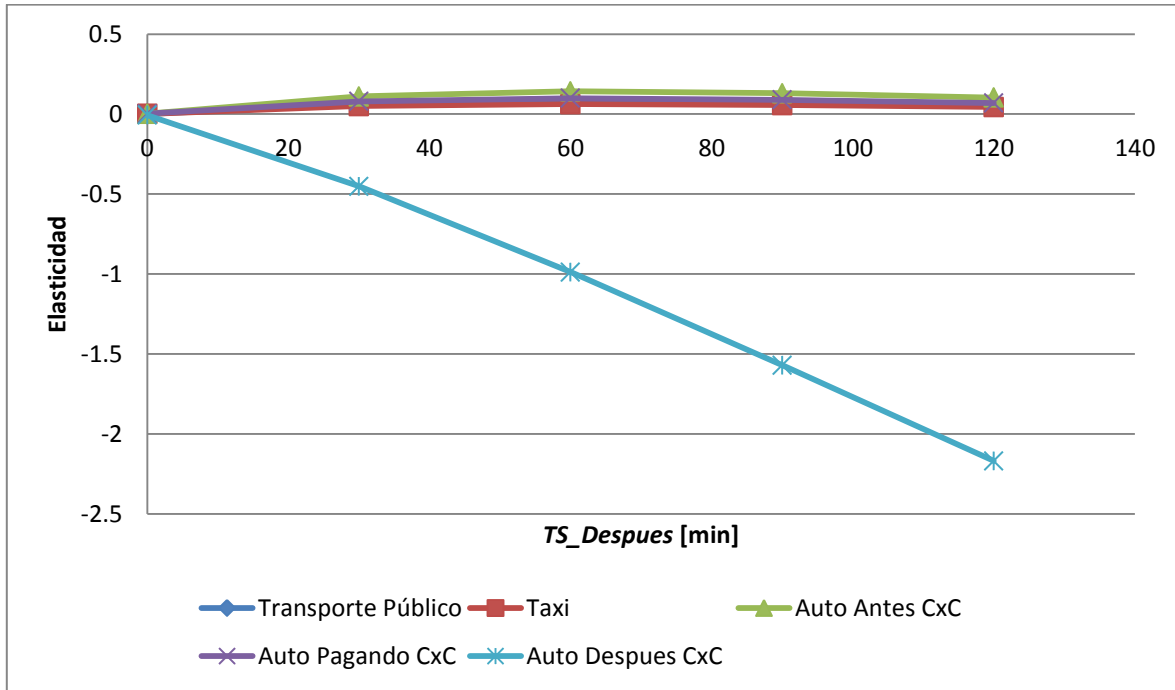
Fuente: Elaboración propia

Figura 18 Variación de la elasticidad de la demanda con respecto a TS_Antes



Fuente: Elaboración propia

Figura 19 Variación de la elasticidad de la demanda con respecto a $TS_Despues$



Fuente: Elaboración propia

La elasticidad directa de la tarifa del cobro por congestión aumenta con el nivel de ingreso, es decir que ante un cambio en la tarifa, los conductores con ingresos altos tienen variaciones menores en la probabilidad de pagar el cobro por congestión que los conductores de ingresos bajos. Para el rango de tarifas de cobro por congestión propuestos para la ciudad de Bogotá (de COL \$5500 a COL \$7500) la elasticidad directa varía entre -0.9 y -2.8.

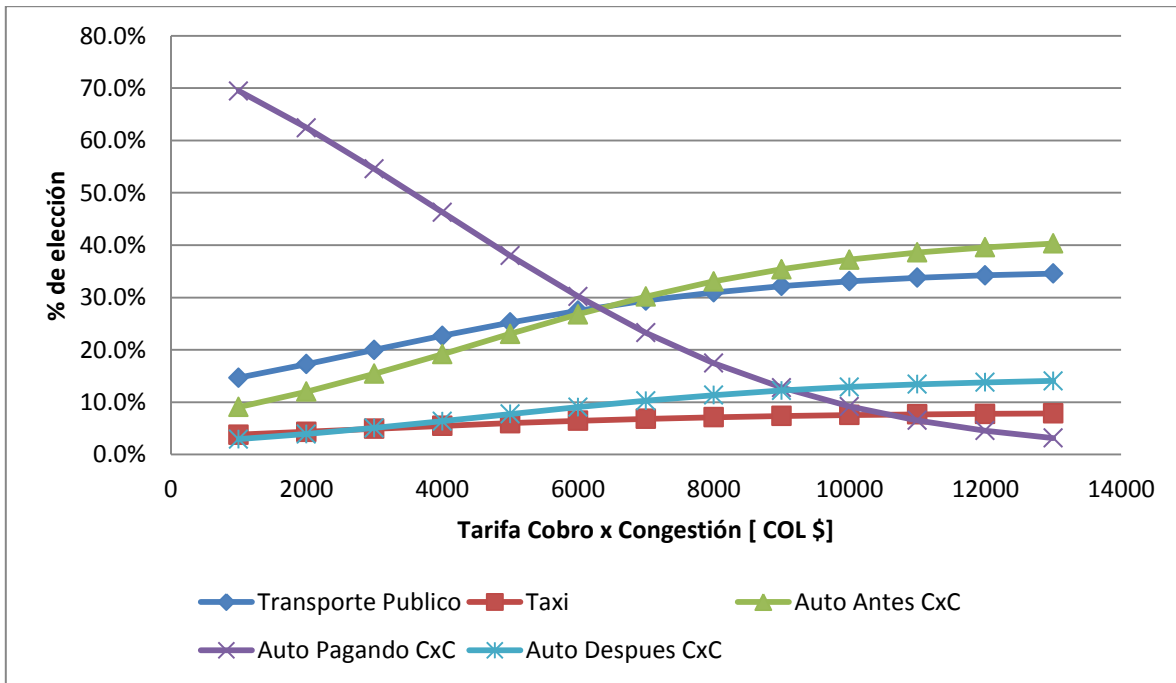
Las alternativas AutoSACC y AutoSDCC tienen elasticidades cruzadas con respecto a la tarifa mayores que las alternativas de transporte público y que el taxi para todos los niveles de ingresos, por lo tanto ante un cambio en la tarifa del cobro por congestión es más probable que los conductores cambien su horario de salida, a que realicen su viaje en otro modo. A partir de una tarifa de COL \$10.000 las elasticidades cruzadas se aproximan a cero por lo que valores superiores de tarifas tienen pocos efectos en la probabilidad de cambiar de modo u horario de salida.

La elasticidad directa de la alternativa AutoSACC con respecto a la variable TS_Antes varía desde un valor de -0,5 para un tiempo de salida de 60 minutos, hasta -3,0 para un tiempo de salida de 180 min. La elasticidad cruzada de la alternativa AutoSDCC llega a ser el doble que la elasticidad cruzada del transporte público. Ante un cambio en el horario de inicio de la medida es más probable que los conductores aplacen su viaje para evitar el cobro por congestión a que paguen la tarifa o usen alguno de los modos de transporte público.

Por último se observa que si bien la elasticidad directa con respecto a la variable *TS_Despues* después de las 8:00 am para evitar el cobro por congestión varía entre 0 y -2.1, las elasticidades cruzadas de las otras alternativas son bastante bajas, no superando el valor de 0.1. Ante cambios en el horario de finalización de la medida la variación en la probabilidad de cambio de modo u horario es muy baja. Esto es se debe a que solo se consideraron viajes con motivo estudio o trabajo.

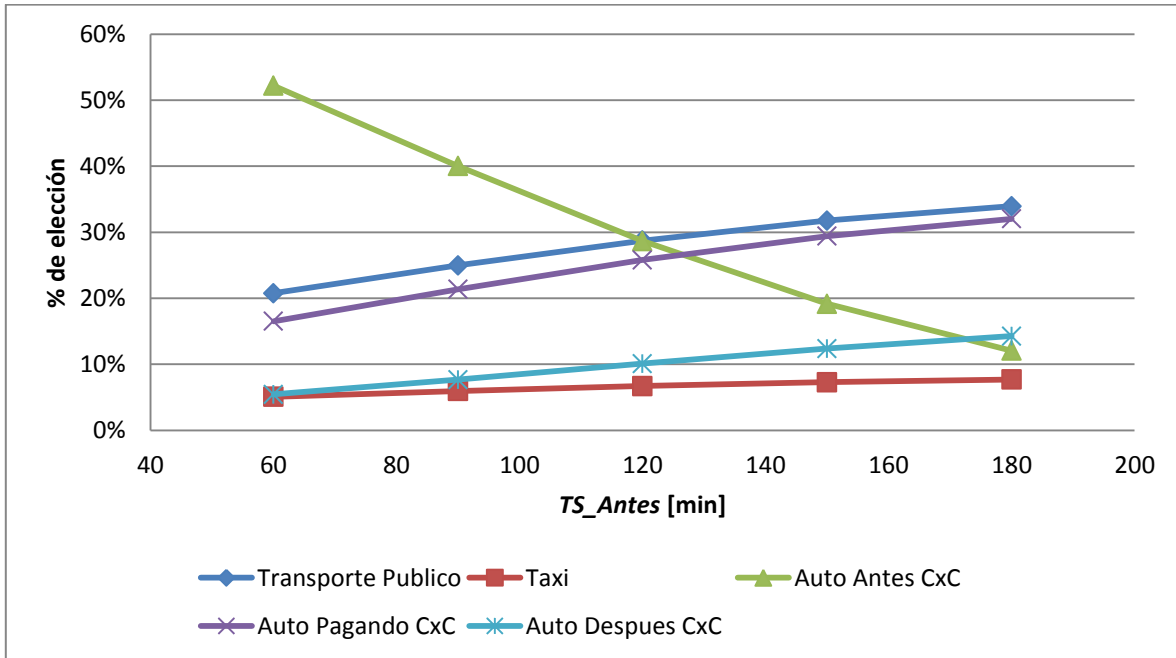
Para complementar el análisis de elasticidades de la Figura 20 a la Figura 22 se presenta la variación de la probabilidad de elección de cada alternativa ante variaciones en las variables tarifa y tiempo de salida antes y después de las 8:00 am para evitar el cobro por congestión.

Figura 20 Variación de la probabilidad de elección con respecto a la tarifa por congestión



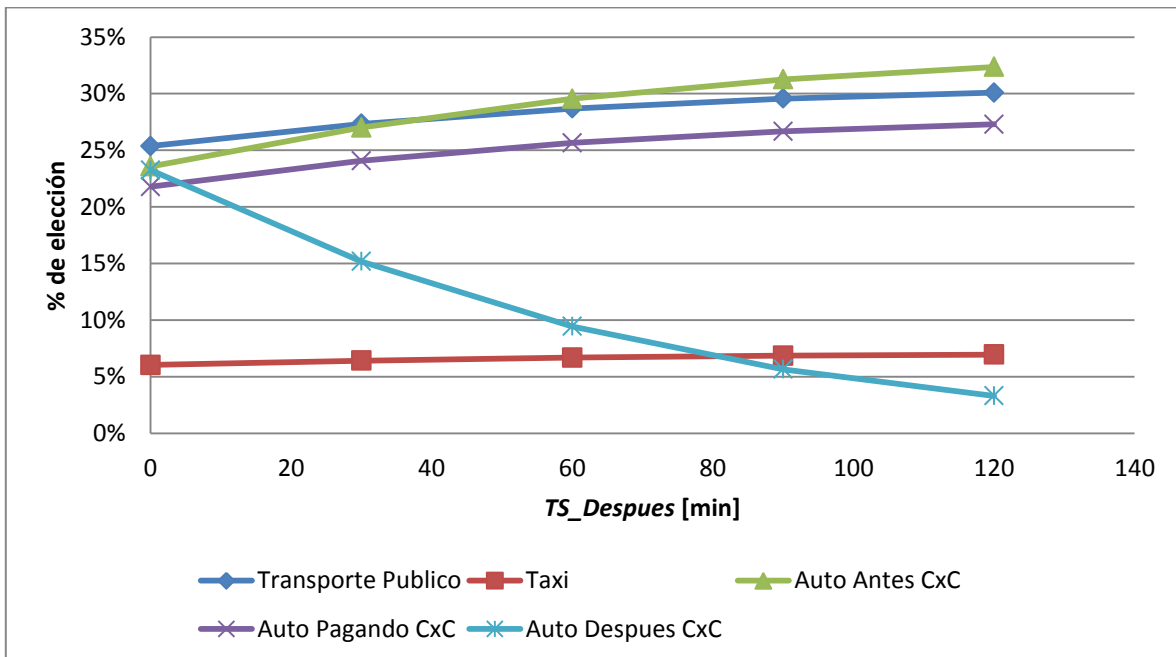
Fuente: Elaboración propia

Figura 21 Variación de la probabilidad de elección con respecto a *TS_Antes*.



Fuente: Elaboración propia

Figura 22 Variación de la probabilidad de elección con respecto a *TS_Despues*.



Fuente: Elaboración propia

Para tarifas inferiores a COL \$6000 la probabilidad de pagar el cobro por congestión es mayor que la probabilidad de cambiar de horario o de modo de transporte, para tarifas

superiores, la alternativa AutoSACC pasa a ser la de mayor probabilidad seguida por el uso de transporte público. El aumento en la probabilidad de las alternativas Taxi y AutoSDCC no supera un 10%.

La probabilidad de pagar el cargo por congestión o usar el transporte público supera la probabilidad del AutoSACC cuando la variable *TS_Antes* es mayor a 120 minutos. Al igual que con la tarifa, la variación de esta variable tiene poco impacto en la elección de las alternativas Taxi y AutoSDCC. Por último, solo la probabilidad de AutoSDCC se ve afectada de forma relevante por cambios en la variable *TS_Despues*.

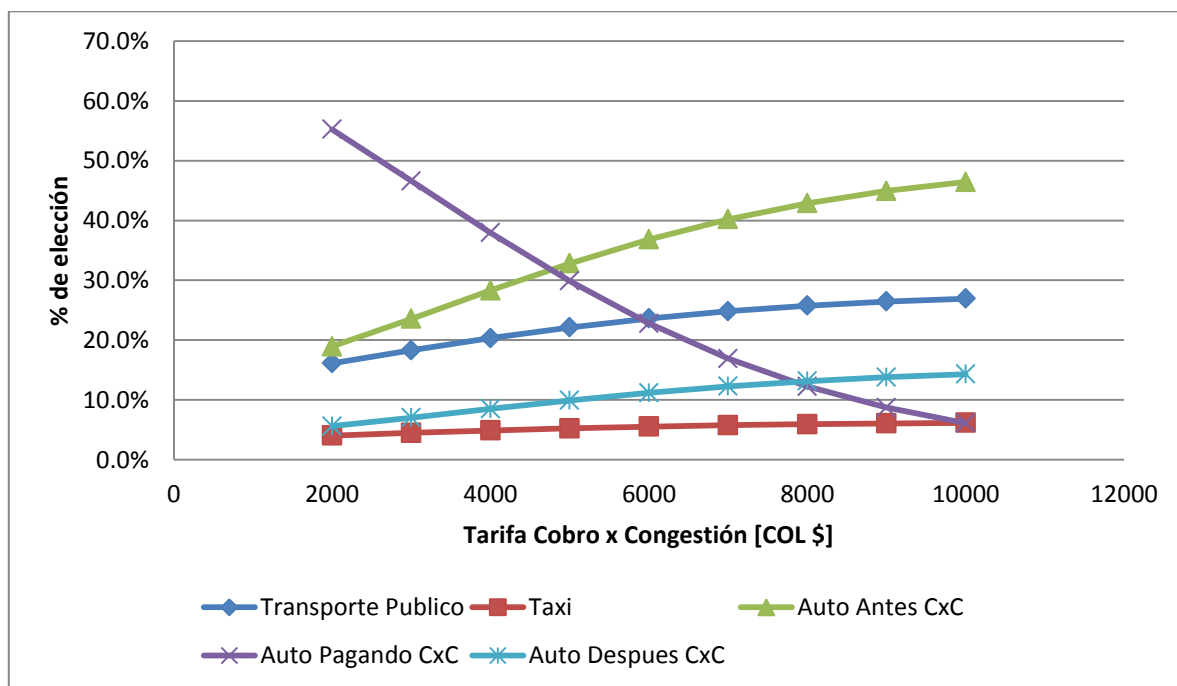
3.6 Propuesta de un esquema de cobro por congestión para Medellín

A partir de lo planteado en el capítulo 2 y de los resultados del modelo de elección discreta a continuación se propone un esquema de cobros por congestión para reemplazar la actual medida de “pico y placa” en la ciudad de Medellín.

3.6.1 Horario de aplicación de la medida.

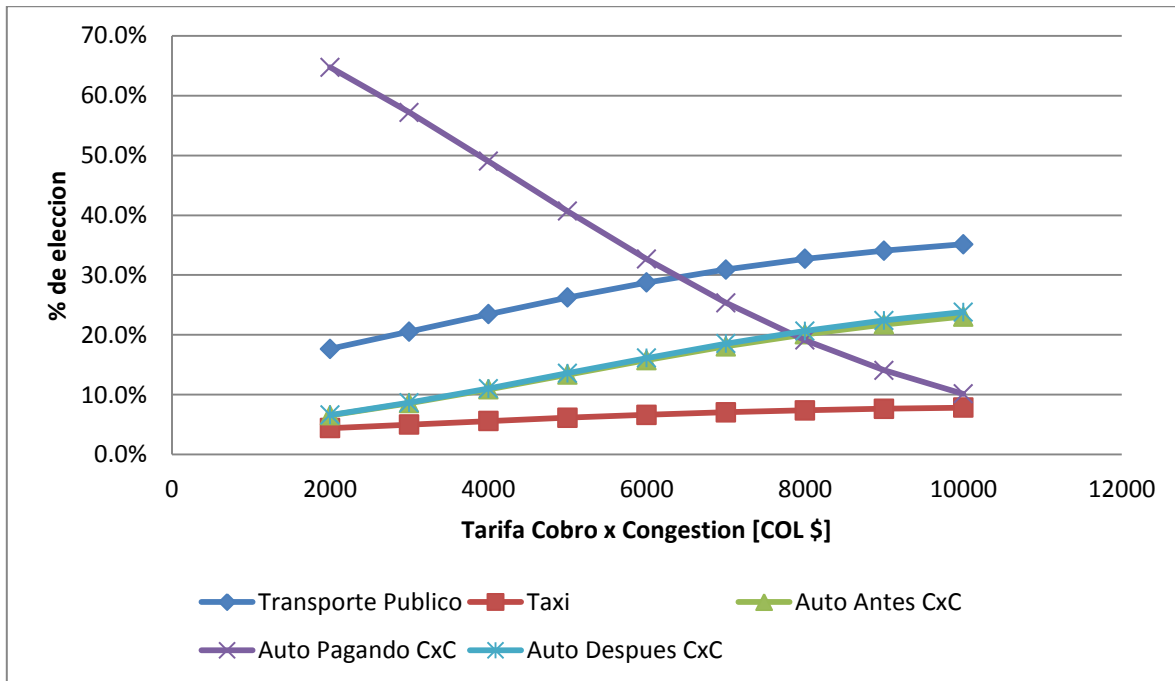
Inicialmente se evaluó la probabilidad de elección de cada alternativa para un rango de cobro por congestión de entre COL \$2000 y COL \$10,000 en tres escenarios de horarios de aplicación de la medida: (1) de 7:00 am a 8:30 am, (2) de 6:00 am a 8:30 am y (3) de 6:00 am a 9:00 am. Los resultados obtenidos para cada escenario se presentan de la Figura 23 a la Figura 25.

Figura 23 Probabilidad de elección para el Escenario (1): 7:00 am a 8:30 am



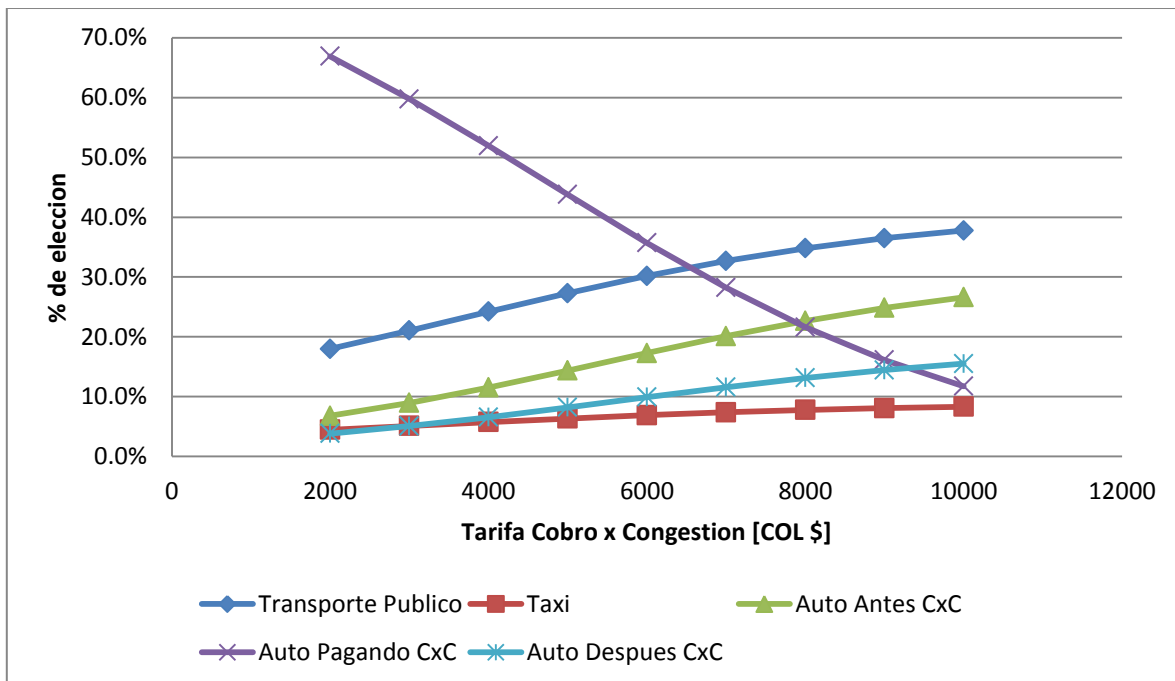
Fuente: Elaboración propia

Figura 24 Probabilidad de elección para el Escenario (3): 6:00 am a 8:30 am



Fuente: Elaboración propia

Figura 25 Probabilidad de elección para el Escenario (3): 6:00 am a 9:00 am



Fuente: Elaboración propia

El escenario (1) corresponde al horario actual del pico y placa en Medellín¹⁰, el cobro de una tarifa por congestión traslada los viajes del periodo pico principalmente hacia antes de las 7:00 am y en menor medida al transporte público. De hecho para un rango de tarifas como el propuesto para Bogotá (entre COL \$5.500 y COL \$7.500) el número de viajes antes de la hora pico sería superior a los viajes realizados en el periodo tarifado y estos se concentrarían justo antes del inicio del cobro (debido a que el valor del tiempo de salida antes de las 8:00 am es mayor que el valor del tiempo de viaje) y como consecuencia se estaría trasladando el periodo de máxima demanda hacia antes de las 7:00 am.

En el escenario (2) se extiende el horario de la medida hasta la 6:00 am, con esto se logra que la proporción de viajes realizados antes del horario de cobro se reduzca de forma significativa trasladándose principalmente a los modos de transporte público. Un problema de este escenario es que el número de viajes realizados después de las 8:00 am se incrementa con respecto al escenario 1, si bien estos viajes no superan el 20% se debe tener en cuenta que el modelo solo considera los viajes con motivo trabajo o estudio, por lo que la proporción de viajes realizados después de las 8:30 es mayor.

Si se amplía el horario de aplicación de la medida hasta la 9:00 am como se plantea en el escenario (3), se reducen los viajes realizados después del horario de cobro y se incrementa aún más los viajes trasladados hacia el transporte público. Extender la medida antes de las 6:00 am y después de las 9:00 am tiene pocos efectos en la demanda como se demostró en el análisis de elasticidades.

Para los escenarios (2) y (3) se tienen dos condiciones de demanda diferentes durante el horario de aplicación de la medida, una durante el periodo pico (de 7:00 am a 8:30 am) y otra durante los periodos fuera de pico (de 6:00 am a 7:00 am y de 8:30 am a 9:00), la teoría indica que se debería calcular una tarifa por congestión diferente para cada condición y a su vez esta tarifa diferencial modificaría las funciones de demanda para el periodo traficado (para el escenario 3 el conductor tendrían dos alternativas adicionales: Salir entre las 6:00 am y las 7:00 am y salir entre las 8:30 am y las 9:00 am, pagando una tarifa inferior que la del horario pico).

Como se explicó en el capítulo 2, en la práctica no siempre se puede alcanzar el equilibrio óptimo social cuando se implementa una política de cobro por congestión, en este caso debido a la alta disposición de los conductores a cambiar de horario y con el fin de conservar cierto nivel de simplicidad en el esquema de tarificación, se recomienda adoptar el horario propuesto en el escenario 3, con una tarifa única durante todo el periodo de aplicación de la medida, recordando que se deben incluir en la evaluación de la política los viajes con motivos diferentes al trabajo y al estudio.

¹⁰ El horario de pico y placa coincide con los periodos pico de los viajes en auto en la ciudad de Medellín encontrado en la encuesta de hogares 2012 (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2012)

Si bien la tarifa se debe calcular a partir del principio del segundo mejor óptimo, también se deben considerar otros factores relacionados con la gestión de la demanda como la reducción en el uso de vehículos particulares y el incremento de los viajes en modos de transporte público. Con el rango de tarifas calculado para la ciudad de Bogotá se logra que en promedio un 30% de los usuarios de auto realicen su viaje en alguno de los modos de tres modos de transporte público disponibles en la ciudad, por lo que es deseable que la tarifa por congestión para Medellín se encuentre en ese orden de magnitud.

Debido a la limitación de la encuesta de preferencias declaradas, en este trabajo solo se plantearon escenarios de cobro para la hora pico de la mañana, demostrando que es conveniente extender la aplicación de la medida unas horas antes y después del periodo de máxima demanda. Sin embargo se espera que el proceso de elección de los usuarios de autos varíe dependiendo de la hora del día y del sentido del viaje, por lo que se recomienda desarrollar un estudio similar para los periodos pico del medio día y de la tarde.

Un análisis similar para los periodos valle, requiere considerar los viajes con motivos diferentes a estudio y trabajo, como en general las personas tienen total flexibilidad para elegir el horario en que se realizan estos viajes el diseño de la encuesta y la especificación del modelo de elección debe ser diferente al planteado en este estudio.

3.6.2 Zona de cobro

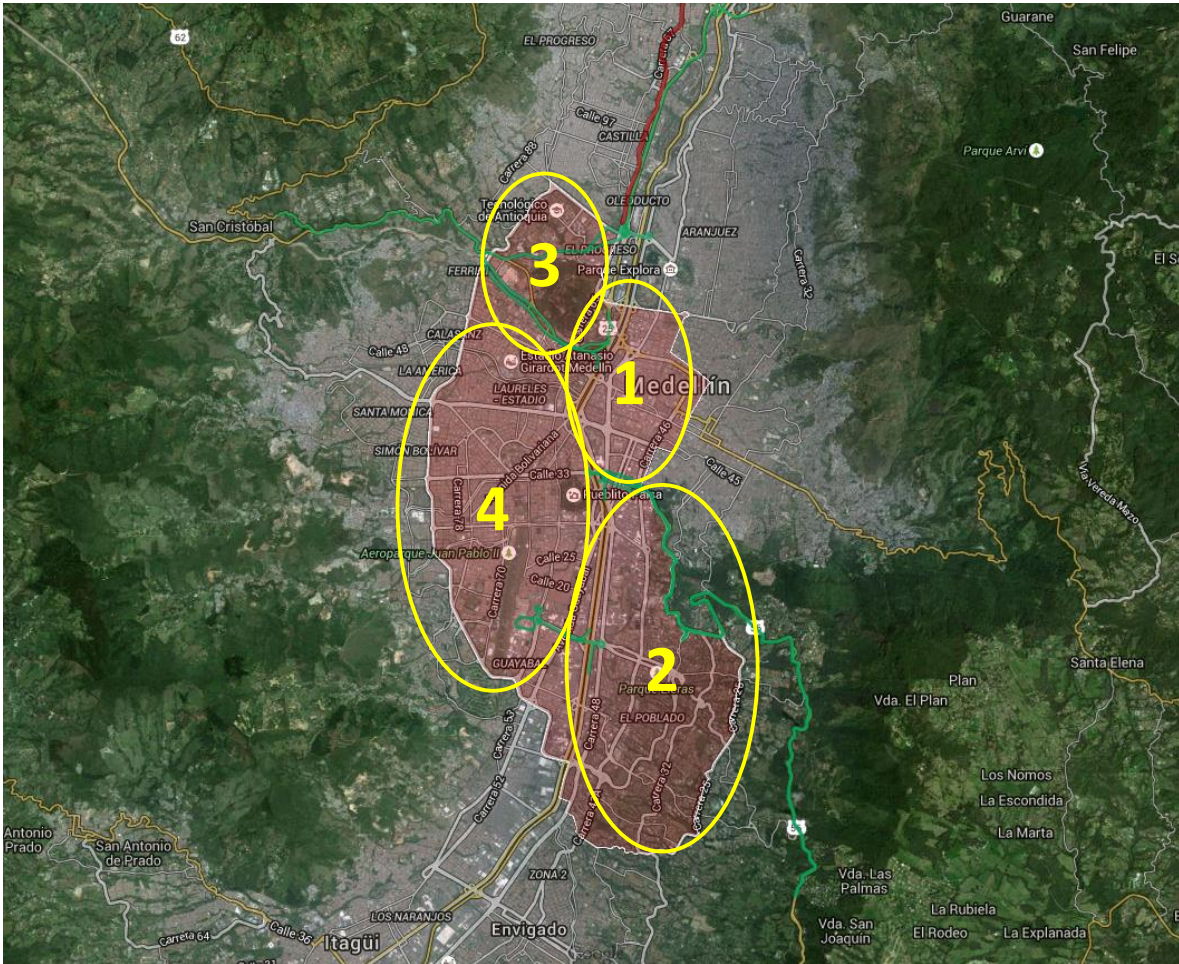
Como se indicó en el capítulo 2, los esquemas de cobro zonales tienen la ventaja de interceptar una mayor cantidad de viajes y en general son menos susceptibles a tener cambios en los flujos no deseados. También captan los viajes realizados dentro del área tarifada por lo que funcionan mejor que los esquemas de cobros basados en infraestructura y de tipo cordón.

En la Figura 26 se presenta la actual la zona actual de aplicación de la medida de pico y placa en Medellín (Área sombreada en Rojo), el área con restricción es de 36,8 Km² correspondientes al 36% del casco urbano de la ciudad y está limitada al norte por las calles 67 y 80, al sur por el municipio de Itagüi, al este por la carrera 25, la Avenida las palmas y las carreras 45, 43 y 51; y al oeste por las carreras 81 y 80. Las vías marcadas en verde están exentas de la restricción.

El área con pico y placa incluye la zona del centro (1) donde se concentra la mayoría de oferta institucional, de servicios y cultural de la ciudad, combinada con usos de suelo comerciales y una alta presencia de instituciones educativas; la zona del poblado (2) que está conformada por las zonas residenciales de ingresos más altos de la ciudad, combinada con zonas comerciales y que posee una topografía que hace que la red vial sea sinuosa y discontinua lo que genera graves problemas de congestión; la zona aldeaña al cerro el volador (3), ubicado al noroccidente de la zona de restricción que contiene principalmente oferta educativa y de servicios de salud; y la zona (4) que comprende entre otros el aeropuerto Olaya Herrera, Laureles y San Joaquín y está conformado principalmente por

zonas residenciales de ingresos altos y medios con la presencia de algunas instituciones educativas y áreas comerciales.

Figura 26 Zona de pico y placa de Medellín



Fuente: Elaboración propia a partir de imagen de la Secretaria de movilidad de Medellín (2015) y Google Earth©

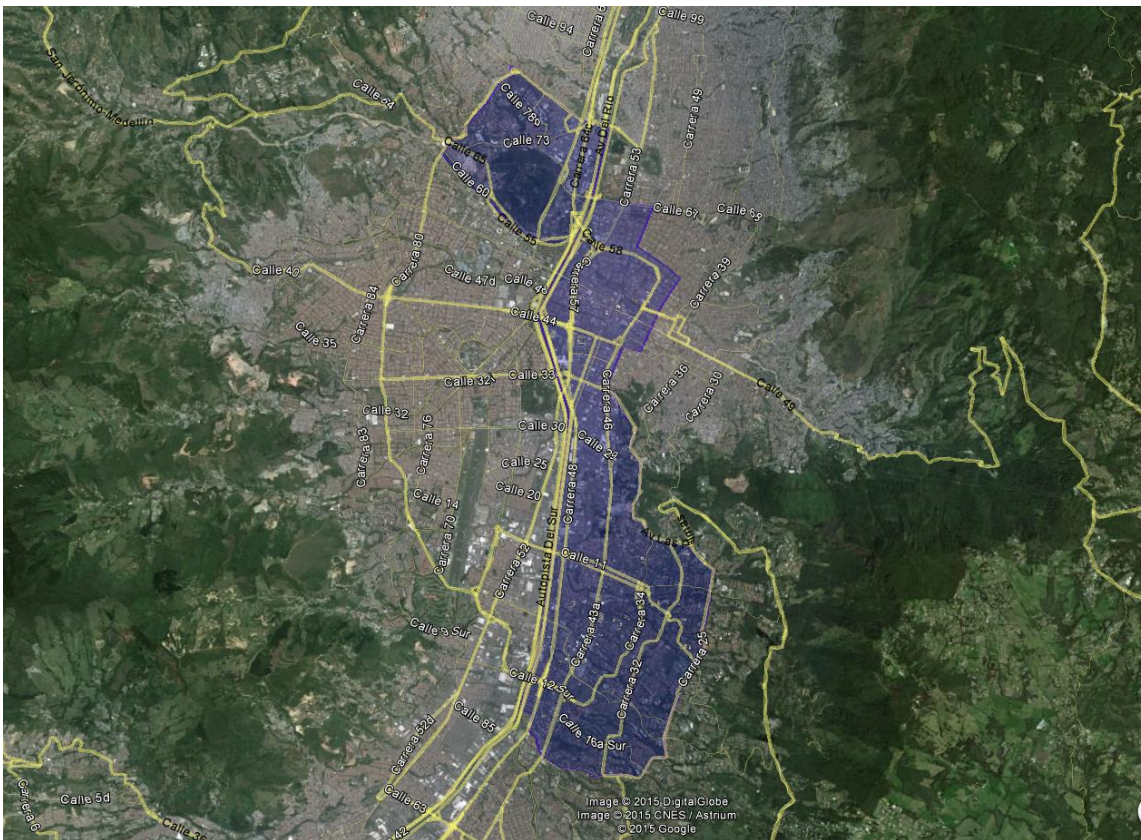
Inicialmente se propone conservar las zonas 1, 2 y 3 del pico y placa por ser las más congestionadas de la ciudad, en este caso se aprovecharía la frontera natural que constituye el río Medellín (y adyacente a este la línea de metro) para establecer el limite occidental del área de cobro para las zonas 1 y 2 y la quebrada iguana para delimitar la zona 3. Las condiciones de oferta y demanda de estas son diferentes, por lo que en principio la tarifa por congestión no debería ser igual para los tres sectores, sin embargo la implementación de un cobro diferencial dependerá principalmente de las limitaciones técnicas y tecnológicas de su aplicación.

Se espera que los niveles de congestión de las áreas residenciales, como la zona 4 y las zonas no restringidas por el pico y placa, disminuyan con la implementación del cobro por congestión en las zonas atractoras de viajes debido a la reducción proyectada en el uso del

auto. Sin embargo se podrían instalar peajes urbanos electrónicos en algunas vías principales por fuera de la zona de cobro como la autopista regional, la carrera 64 C, la calle 50, la avenida San Juan, la calle 33, o la avenida Universidad de Medellín; bajo el principio del segundo mejor óptimo (en este caso cobrando un valor menor a la tarifa del óptimo social, para evitar congestionar las posibles vías alternas).

En la Figura 27 se presenta la zona de cobro por congestión propuesta, esta tiene un área de 21.3 km² correspondiente al 21% del casco urbano de Medellín. Se propone un mecanismo de cobro que combine dispositivos a bordo y cámaras como el que se plantea para el cobro por congestión de Bogotá. En este esquema cuando el usuario atraviesa un punto de detección el sistema genera el cobro asignando la tarifa aplicable según la estructura tarifaria y exenciones definidas. Los usuarios que no paguen están sujetos a multas de tránsito de forma automática.

Figura 27 Zona de cobro por congestión propuesta



Fuente: Elaboración propia a partir de imagen de Google Earth©

3.6.3 Políticas complementarias al cobro por congestión

Los resultados del modelo híbrido también brindan información valiosa para la aplicación de algunas políticas de transporte complementarios a la implementación de un esquema de cobros por congestión en la ciudad de Medellín.

Dada la importancia de las variables latentes para la elección del modo de transporte, la implementación de un esquema de cargos por congestión debe ser acompañada con una política que busque mejorar la percepción de nivel de servicio del transporte público. En este orden de ideas los esfuerzos se deben concentrar en mejorar como los usuarios de autos evalúan la comodidad, seguridad y confiabilidad del bus, por ser el modo de transporte más disponible en la ciudad y el peor calificado.

Para esto los recursos provenientes de la aplicación de la política de tarificación vial juegan un papel clave, estos se pueden usar para hacer inversiones en infraestructura para el transporte público, para mejorar las condiciones de la flota de buses y vagones del metro, para mejorar el nivel de servicio de la operación o para subsidiar directamente la tarifa cobrada a los usuarios.

Por otro lado es importante informar adecuadamente acerca de las mejoras y bondades del transporte público, especialmente entre la población con peor percepción de estos modos (ingresos altos y medios, formación educativa universitaria y personas que ocupan cargos directivos). También se debe comunicar adecuadamente los problemas originados por la congestión y los beneficios generados por la implementación de la medida; haciendo énfasis en los sectores de la población que son menos susceptibles a aceptar el cobro.

Los resultados también indican la importancia del pago o no del parqueo del auto en el destino del viaje. Por lo tanto es deseable que la medida este acompañada por una adecuada planeación y control de las tarifas de estacionamiento sobre y por fuera de la vía. De igual forma se debe desincentivar la sobreoferta de cajones de estacionamiento en las edificaciones nuevas dentro de las zonas de cobro por congestión.

4 CONCLUSIONES

Ante la problemática de la congestión vehicular las ciudades colombianas han optado por implementar una política de gestión de la demanda basada en la restricción de la circulación vehicular conocida como pico y placa.

La medida se implantó en las ciudades de Bogotá y Medellín en los años 1998 y 2005 respectivamente y desde su inicio los horarios y porcentajes de vehículos con restricción se han incrementado ininterrumpidamente. Sin embargo una revisión de la evolución de las tasas de motorización y del porcentaje de participación del vehículo particular en la partición modal de viajes, demuestra que la medida solo fue efectiva en el corto plazo y que en el mediano y largo plazo incentiva la adquisición de un segundo vehículo.

Por otro lado al realizar un análisis económico de la política de “pico y placa” se encuentra que esta genera una disposición insatisfecha entre los conductores a pagar por usar sus autos que origina una perdida social y que un número alto de personas expresan esta disposición comprando un segundo o tercer vehículo con número de placa que no esté restringido en el mismo día del que ya posee.

Un análisis similar demuestra que el óptimo social solo se logra si se cobra a cada conductor por el incremento en el tiempo de viaje que genera a los otros usuarios de la vía, en otras palabras si se cobra a los conductores una tarifa por la externalidad relacionada con la congestión que generan.

La necesidad de realizar la transición del pico y placa a esquemas de cobros por congestión en las ciudades colombianas resulta evidente, sin embargo la experiencia a nivel internacional indica que a pesar del consenso entre los especialistas acerca de las bondades de los cargos por congestión la aplicación de este tipo de medidas de gestión de la demanda no es sencilla, razón por la cual se encuentra poco extendida incluso en los países del primer mundo.

Si bien parte del problema es que la teoría convencional de cargos por congestión pasa por alto algunas dificultades que hacen que su implementación sea más complicada de lo que aparenta y de que la elección del mejor esquema de cobro a veces resulta ser complicado por restricciones técnicas y tecnológicas; la razón principal que ha frenado varias iniciativas de aplicación de esquemas de tarificación vial es la poca aceptación entre el público en general y los tomadores de decisiones.

El caso de la ciudad de Bogotá ilustra claramente la importancia de contar con el apoyo de los ciudadanos y políticos para poder cambiar la política de pico y placa por un esquema de cobros por congestión. A pesar de contar con una estructuración técnica, legal y financiera a detalle de un esquema zonal y del apoyo del gobierno nacional, el proyecto ha sido rechazado en dos ocasiones por el concejo municipal y en la actualidad la alcaldía de la ciudad no tiene intenciones intentar su aprobación nuevamente.

Para abordar este problema, en primer lugar se debe explicar a los tomadores de decisiones de forma clara las bondades de la medida, no solamente como una forma de reducir la congestión, sino como una nueva fuente de financiación para proyectos como la construcción de infraestructura para: el transporte público, ciclorutas y senderos peatonales; para subsidiar la tarifa del transporte público, u obras que contribuyan a una equitativa repartición de la riqueza al brindar mayores beneficios a las personas de menores ingresos.

Se debe tratar el problema de la aceptación por parte de público desde las etapas de estructuración técnica de la medida. El esquema de cobro, los horarios y tarifas a cobrar además de las zonas donde se implementara la medida deben ser establecidos de forma tal que se maximice la posibilidad de aceptación por parte de los ciudadanos. Una vez definidos las características del esquema de cobro, es necesario comunicar adecuadamente al público en general los problemas originados por la congestión y los beneficios generados por la implementación de la medida; haciendo énfasis en los sectores de la población que son menos susceptibles a aceptar el cobro.

Por último es necesario contar con una red de monitoreo que permita medir las condiciones del tráfico antes de la medida y de esta forma contar con datos que permitan cuantificar y comunicar al público en general los beneficios del esquema de cobro en la reducción de la congestión y de las otras externalidades del transporte.

Medellín es la otra ciudad de Colombia que ha realizado algún avance para remplazar el pico y placa por un esquema de cobros por congestión. La ciudad contrato un estudio de viabilidad de un sistema de cobros por congestión, donde se llevó a cabo una encuesta de preferencias declaradas y se calibro un modelo de elección discreta con variación de gustos, pero a la fecha no se reportan avances adicionales que hagan pensar que se intentara implementar la medida en el mediano plazo.

Usando esta base de datos se estimó un modelo de elección discreta para la elección de modo en un escenario de cobro por congestión en Medellín incorporando las variables latentes comodidad, seguridad y confiabilidad. A partir de los valores de log-verosimilitud y los estadísticos ρ^2 se demostró que el modelo con variables latentes es superior al modelo logit multinomial lo que refleja la importancia de los atributos intangibles en el proceso de elección de modo para el escenario planteado.

El valor del tiempo de viaje para los individuos de ingresos medios y altos es un 5 y 15 % superior al de los individuos con ingresos bajos, mientras que el valor del tiempo de salida antes y después del cobro por congestión es un 70 y 60% superior al valor del tiempo de viaje. La flexibilidad de horario de llegada al trabajo aumenta la utilidad de las alternativas salir antes y después del cobro por congestión, especialmente entre los individuos con cargos directivos. Por otro lado la utilidad de las alternativas que usan el auto como modo de transporte se reduce cuando el individuo debe pagar por el parqueadero en su lugar de destino.

De las ecuaciones estructurales del modelo se pudo comprobar que en general la percepción de los indicadores de nivel de servicio de los modos de transporte público decrece con el nivel de ingresos, la formación académica y para los individuos que no ocupan cargos directivos, mientras que la percepción de los indicadores del auto presenta poca variabilidad entre las categorías de individuos considerados en el modelo.

El análisis de elasticidad comprobó la importancia del costo y el horario de salida en el proceso de elección y se evidenció que ante un cambio en el valor de estas variables los usuarios de autos prefieren cambiar el horario de inicio de su viaje para evitar el pago de la tarifa por congestión antes que usar alguno de los modos de transporte público disponibles en la ciudad.

A partir de los resultados obtenidos se evalúan varios escenarios de horas de aplicación de un esquema de cobros por congestión zonal para la ciudad de Medellín. Se encontró que para evitar que el periodo pico se traslade temporalmente, el horario de aplicación de la medida para la mañana debe ser entre las 6:00 am y las 9:00 am, con una tarifa similar a la establecida para Bogotá. La determinación de los horarios más convenientes para los periodos pico del medio día y de la tarde, requiere de la calibración de modelos de elección de modo específicos para estas condiciones de demanda.

Se propone como zona de cobro un área de 21,3 Km² que incluye el centro de la ciudad de Medellín, el Poblado y la zona adyacente al cerro el volador. Se tuvo en cuenta para la selección de la zona las áreas que actualmente cuentan con restricción vehicular, los usos de suelo predominantes en cada sector y el aprovechamiento del río Medellín y la quebrada iguana como fronteras naturales de la zona cobro.

Adicional al horario y zonas de cobro se resalta, a partir de los resultados del modelo, la importancia de la implementación de políticas complementarias al cobro por congestión que busquen mejorar la percepción del nivel de servicio de los modos de transporte público, en especial del bus por ser el servicio con mayor disponibilidad y uso en la ciudad. También se remarca la importancia de la regulación y control del parqueadero en y por fuera de la vía como una forma de desincentivar el uso del auto.

Futuras investigaciones pueden transferir los resultados propuestos hacia otras ciudades colombianas o de América Latina. También considerar incluir a las motocicletas en el análisis, teniendo en cuenta el alto crecimiento en el uso de este tipo de vehículo. No menos importante es realizar estudios específicos sobre aceptación de la medida en el caso de las ciudades colombianas.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia metropolitana de tránsito de Quito. (2015). *Pico y Placa*. Recuperado el 03 de 06 de 2015, de sitio web de la Agencia metropolitana de tránsito de Quito: <http://www.agenciatransito.quito.gob.ec/index.php/servicios/pico-y-placa.html>
- Albalade, D., & Bel, G. (Septiembre-Octubre de 2009). What Local Policy Makers Should Know about Urban Road Charging: Lessons from Worldwide Experience. *Public Administration Review*, 69(5), 962-975.
- Ardıç, Ö., Annema, J. A., & van Wee, B. (2013). Has the Dutch news media acted as a policy actor in the road pricing policy debate? *Transportation Research Part A Policy and Practice*, 57(C), 47-63.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (7 de Septiembre de 2012). *Encuesta Origen y Destino de Hogares 2012*. Recuperado el 02 de 05 de 2015, de <http://www.metropol.gov.co/Movilidad/Documents/Encuesta%20origen%20y%20destino%20de%20hogares%202012.pdf>
- Bartley, B. (1995). Mobility impacts, reactions and opinions : traffic demand management options in Europe : the MIRO Project. (L. R.-U. Hemming, Ed.) *Traffic engineering & control*, 36(11), 596-602.
- Ben-Akiva, M. E., Walker, J. L., Bernardino, A. T., Gopinath, D. A., Morikawa, T., & Polydoropoulou, A. (2002). Integration of choice and latent variable models. En H. S. Mahmassani, *In Perpetual Motion: Travel Behaviour Research Opportunities and Challenges*. Amsterdam: Pergamon.
- Bocarejo, J. P. (2008). *Évaluation économique de l'impact des politiques publiques liées à la mobilité, les cas de Paris, Londres, Bogotá et Santiago*. Paris, France: Dr. Thesis,.
- Bogotá cómo vamos. (2014). *Informe de calidad de vida 2013*. Bogotá DC: Fundación Corona, El Tiempo Casa Editorial, Pontificia Universidad Javeriana y Cámara de Comercio de Bogotá.
- Bolduc, D., & Alvarez-Daziano, R. (2009). On estimation of hybrid choice models. *International Choice Modelling*. Harrogate.
- Bolduc, D., & Alvarez-Daziano, R. (2010). On estimation of hybrid choice models. En S. Hess, & A. Daly, *Choice Modelling: The State-of-the-Art and the State-of-Practice*. Bingley: Emerald Group Publishing,.
- Bolduc, D., & Giroux, A. (2005). *The integrated choice and latent variable (ICLV) model: handbook to accompany the*. D'épartement d'économique, Université Laval.
- Bull, A. (2003). *Congestión de tránsito: El problema y cómo enfrentarlo*. Santiago, Chile: Naciones Unidas.
- Cain, A. (2005). Achieving Majority Public Support for Urban Road Pricing: Preserving the Driver's Right to Choose. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1932, 119-128.
- Calfee, J., & Winston, C. (Julio de 1998). The value of automobile travel time: implications for congestion policy. *Journal of Public Economics*, 69(1), 83-102.
- Cantillo, V., & Ortúzar, J. d. (2012). Restricción Vehicular Según Número de Patente: Requiem para una Política Errónea. *Revista Ingeniería de Sistemas*, XXVI, 7-22.

- Cantillo, V., & Ortúzar, J. d. (Diciembre de 2014). Restricting the use of cars by license plate numbers: A misguided urban transport policy. *DYNA*, 81(188), 75-82.
- Caracol Radio. (2015). *Nación sugiere a Bogotá insistir para implementar cobros por congestión*. Recuperado el 03 de 06 de 2015, de Web Caracol Radio: <http://www.caracol.com.co/noticias/bogota/nacion-sugiere-a-bogota-insistir-para-implementar-cobros-por-congestion/20150112/nota/2584299.aspx>
- Chew, V. (2008). *Electronic Road Pricing: Developments After Phase I. National Library Singapore*. Recuperado el 25 de 07 de 09, de Singapore Infopedia: http://infopedia.nl.sg/articles/SIP_1386_2009-01-05.html
- Concesion Autopista Central. (2015). *Autopista Central Tarifas 2015*. Recuperado el 03 de 06 de 2015, de Web Autopista Central: https://www.autopistacentral.cl/tarifas/pop_up.html
- Concesión Internacional Sistema Oriente-Poniente. (2015). *Costanera Norte - Tarifas 2015*. Recuperado el 03 de 06 de 2015, de Web Costanera Norte: http://web.costaneranorte.cl/wp-content/uploads/2013/09/CN_Tarifas_2015.pdf
- Cools, M., Brijs, K., Tormans, H., Moons, E., Janssens, D., & Wets, G. (Octubre de 2011). The socio-cognitive links between road pricing acceptability and changes in travel behavior. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45(8), 779-788.
- Daniel, J. I., & Bekka, K. (Marzo de 2000). The Environmental Impact of Highway Congestion Pricing. *Journal of Urban Economics*, 47(2), 180-215.
- Davis, L. W. (2008). The Effect of Driving Restrictions on Air Quality in Mexico City. *Journal of Political Economy*, 116(1), 38-81.
- De Grange, L., & Troncoso, R. (Noviembre de 2011). Impacts of vehicle restrictions on urban transport flows: The case of Santiago, Chile. *Transport Policy*, 18, 862-869.
- de Palma, A., & Lindsey, R. (Diciembre de 2011). Traffic congestion pricing methodologies and technologies. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(6), 1377-1399.
- de Palma, A., Lindsey, R., & Proost, S. (Junio de 2007). Synthesis of case study result sand future prospects in investment and the use of tax and toll revenues in the transport sector. *Research in Transportation Economics*, 19, 269-297.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2015). *ESTRATIFICACIÓN SOCIOECONÓMICA PARA SERVICIOS PÚBLICOS*. Recuperado el 03 de 06 de 2015, de sitio Web DANE: <https://www.dane.gov.co/index.php/estratificacion-socioeconomica/generalidades>
- Departamento Nacional de Planeacion. (2011). *Bases del plan nacional de desarrollo 2010 - 2014*.
- Departamento Nacional de Planeacion. (2015). *Bases del plan Nacinoal de Desarrollo 2014 - 2018*.
- El Espectador. (2015). *Ministra de Transporte sugiere a Bogotá insistir en cobros por congestión*. Recuperado el 04 de 06 de 2015, de Web El Espectador: <http://www.elespectador.com/noticias/bogota/ministra-de-transporte-sugiere-bogota-insistir-cobros-c-articulo-537638>
- El Universal. (2007). *10 acciones previas al día de parada*. Recuperado el 02 de 06 de 2015, de sitio web El Universal: http://www.eluniversal.com/2007/02/12/ccs_art_175558

- Eliasson, J. (2009). A cost–benefit analysis of the Stockholm congestion charging system. *Transportation Research Part A*, 43(4), 468-480.
- Eliasson, J., & Jonsson, L. (Agosto de 2011). The unexpected “yes”: Explanatory factors behind the positive attitudes to congestion charges in Stockholm. *Transport Policy*, 18(4), 636-647.
- Fresard, F. (1998). Efecto real de la restricción vehicular en Santiago de Chile. *Ingeniería de Tránsito y Transporte : actas del X Congreso Panamericano* (págs. 299-308). Santander, España: Madrid : Ministerio de Fomento, 1998.
- Gallego, F., Montero, J. P., & Salas, C. (Diciembre de 2013). The effect of transport policies on car use: A bundling model with applications. *Energy Economics*, 40, S85 - S97.
- Gallego, F., Montero, J. P., & Salas, C. (Noviembre de 2013). The effect of transport policies on car use: Evidence from Latin American cities. *Journal of Public Economics*, 107, 47-62.
- Gehlert, T., Kramer, C., Nielsen, O. A., & Schlag, B. (Septiembre de 2011). Socioeconomic differences in public acceptability and car use adaptation toward surban road pricing. *Transport Policy*, 18(5), 685-694.
- Glaister, S., & Graham, D. J. (2005). An evaluation of national road user charging in England. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 39(7-9), 632–650.
- González, C. A., Posada, J. J., & Sánchez, I. D. (Febrero de 2012). THE NEED FOR CONGESTION PRICING IN MEDELLIN: AN ECONOMIC PERSPECTIVE. *Dyna*, 79(171), 123-131.
- Grisolía, J. M., López, F., & Ortúzar, J. d. (Abril de 2015). Increasing the acceptability of a congestion charging scheme. *Transport Policy*, 39, 37-47.
- Hensher, D. A. (Julio de 2006). Integrating accident and travel delay externalities in an urban speed reduction context. *Journal of Urban Economics*, 26(4), 521-534.
- Hensher, D. A. (Septiembre de 2013). Exploring the relationship between perceived acceptability and referendum voting support for alternative road pricing schemes. *Transportation*, 40(5), 935-959.
- Hensher, D. A., & Li, Z. (Enero de 2013). Referendum voting in road pricing reform: A review of the evidence. *Transport Policy*, 25, 186-197.
- Hidalgo, D. (2014). Apoyo en la transversalización del enfoque de crecimiento verde para el sector de transporte en el Plan Nacional de Desarrollo 2014 - 2018. *Ponencia presentada en el panel de expertos de crecimiento para el sector de transporte*. Bogota D.C.
- Hochstetler, K., & Keck, M. (2004). From pollution control to sustainable cities: Urban environmental politics in Brazil. *CENTRE FOR BRAZILIAN STUDIES*, Working paper no. CBS-55-04.
- Ipsos Napoleón Franco. (2012). *Encuesta Percepción de la Red Cómo Vamos, para las ciudades de Cali, Bogotá, Cartagena, Medellín, Barranquilla, Ibagué, Bucaramanga, Valledupar, Pereira y Manizales*. Bogotá: Fundación Corona, El Tiempo Casa Editorial, Pontificia Universidad Javeriana y Cámara de Comercio de Bogotá.

- Ittner, H., Becker, R., & Kals, E. (2003). Willingness to support traffic policy measures: the role of justice. En J. Schade, & B. Schlag, *Acceptability of Transport Pricing Strategies* (págs. 249-266). Oxford: Elsevier.
- Jaensirisak, S., Wardman, M. R., & May, A. D. (Mayo de 2005). Explaining Variations in Public Acceptability of Road Pricing Schemes. *Journal of Transport Economics and Policy*, 39(12), 127-153.
- Jakobsson, C., Fujii, S., & Gärling, T. (Abril de 2000). Determinants of private car users' acceptance of road pricing. *Transport Policy*, 7(2), 153-158.
- Janssens, D., Cools, M., Moons, E., Wets, G., Arentze, T. A., & Timmermans, H. (Marzo de 2009). Road Pricing as Impetus for Environment-Friendly Travel Behavior: Results from a Stated Adaptation Experiment. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2115, 50-59.
- Jones, P. M. (2003). Acceptability of road user charging: meeting the challenge. En J. Schade, & B. Schlag, *Acceptability of Transport Pricing Strategies* (Primera ed., págs. 27-62). Oxford: Elsevier.
- Kim, J., Schmöcker, J.-D., & Noland, R. B. (Febrero de 2013). Attitudes towards road pricing and environmental taxation among US and UK students. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 48, 50-62.
- King, D., Manville, M., & Shoup, D. (Marzo de 2007). The political calculus of congestion pricing. *Transport Policy*, 14(2), 111 - 123.
- Knight, F. H. (Agosto de 1924). Some Fallacies in the Interpretation of Social Cost. *The Quarterly Journal of Economics*, 38(4), 582-606.
- Kockelman, K. M., & Kalmanje, S. (Agosto de 2005). Credit-based congestion pricing: a policy proposal and the public's response. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 39(7-9), 671-690.
- Kottenhoff, K., & Brundell-Freij, K. (Marzo de 2009). The role of public transport for feasibility and acceptability of congestion charging – The case of Stockholm. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(3), 297-305.
- La Ciudad. (2006). *Parque vehicular sube 28% y deja sin efecto restricción vial*. Recuperado el 03 de 06 de 2015, de Sitio Web de La Ciudad: <https://archive.is/KNFVf#selection-833.0-833.60>
- Levinson, D. (2010). Equity Effects of Road Pricing: A Review. *Transport Reviews*, 30(1), 33-57.
- Lindsey, R. C., & Verhoef, E. T. (2001). Traffic Congestion and Congestion Pricing. En K. Button, & D. Hensher (Edits.), *Handbook of Transport Systems and Traffic Control* (Vol. 3, págs. 77-105). Oxford: Pergamon.
- Loukopoulos, P., Jakobsson, C., Gärling, T., Schneider, C. M., & Fujii, S. (Febrero de 2005). Public attitudes towards policy measures for reducing private car use: evidence from a study in Sweden. *Environmental Science & Policy*, 8(1), 57-65.
- Mahendra, A. (2008). Vehicle restrictions in four Latin American cities: Is congestion pricing possible? *Transport reviews*, 28(1), 105-133.
- Mahendra, A. (2011). Options for travel demand management: traffic bans vs. pricing. En H. Dimitriou, & R. Gakenheimer, *Urban transport in the developing world* (págs. 519-547). Cheltenham, U.K: Edward Elgar Publishing Ltda.

- Nacion. (2005). *Hoy empieza restricción para autos en centro de San José*. Recuperado el 03 de 06 de 2015, de Sitio Web de Nacion: http://www.nacion.com/ln_ee/2005/agosto/03/pais0.html
- Ortúzar, J. d., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling Transport*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Parry, I. (Octubre de 2009). Pricing urban congestion. *Annual Review of Resource Economics*, 1(1), 461-484.
- Pigou, A. C. (1920). *The Economics of Welfare*. London: MacMillan and Co.
- Posada Henao, J. J., Farbiarz Castro, V., & González Calderón, C. A. (Febrero de 2011). Análisis del "Pico y Placa" como restricción a la circulación vehicular en Medellín - Basado en Volúmenes vehiculares. *DYNA*, 78(165), 112-121.
- Raveau, S., Alvarez-Daziano, R., Yáñez, M. F., Bolduc, D., & Ortúzar, J. d. (2010). Sequential and simultaneous estimation of hybrid discrete choice models: some new findings. *Transportation Research Record*, 2156, 131-139.
- Raveau, S., Yáñez, M. F., & Ortúzar, J. d. (2011). Practical and empirical identifiability of hybrid discrete choice models. *Transportation Research Part B*, 1374-1383.
- Raveu, S. (2009). *Estimación simultánea de modelos de elección discreta con variables latentes*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Industrias, con Diploma en Ingeniería de Transporte, Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Santiago de Chile.
- Revista Semana. (2014). *¿Por qué se hundió el proyecto de cobros por congestión?* Recuperado el 06 de 06 de 2015, de Web Revista Semana: <http://www.semana.com/nacion/articulo/concejo-de-bogota-hundio-proyectos-de-cobros-por-congestion/385447-3>
- Rivasplata, C. R. (2013). Congestion pricing for Latin America: Prospects and constraints. *Research in Transportation Economics*, 40, 56 - 65.
- Rouwendal, J., & Venhoef, E. T. (Marzo de 2006). Basic economic principles of road pricing: From theory to applications. *Transport Policy*, 13(2), 106 - 114.
- Sarmiento Ordosgoitia, I. R., & Zuleta Candimil, N. T. (2009). Análisis de la evolución del pico y placa en Medellín. *Memorias IX Simposio de Ingeniería de Tránsito y Transporte*. Villa de Leiva, Colombia.
- Schade, J., & Schlag, B. (2000). *Acceptability of Urban Transport Pricing*. Helsinki: Government Institute for Economic Research.
- Schade, J., & Schlag, B. (2003). Acceptability of transport strategies: an introduction. En *Acceptability of Transport Pricing Strategies* (págs. 1-9). Oxford: Elsevier.
- Secretaría de Movilidad de Medellín. (2015). *Pico y placa*. Recuperado el 03 de 06 de 2015, de sitio web de la Secretaría de Movilidad de Medellín: <https://www.medellin.gov.co/movilidad/temas-de-interes/pico-placa>
- Secretaria Distrital de Movilidad de Bogotá. (2014). *Movilidad en cifras 2012*. Bogotá DC.
- Secretaria Distrital de Movilidad de Bogotá. (2014). *Proyecto Cobros por Congestión para la Ciudad de Bogotá*. Recuperado el 03 de 06 de 2015, de Secretaria Distrital de Movilidad: http://www.movilidadbogota.gov.co/hiwebx_archivos/ideofolio/presentacin-cxc-pagina-web-sdm_21843.pdf

- Skrondal, A., & Rabe-Hesketh, S. (2007). Latent variable modelling: a survey. *Scandinavian Journal of Statistics*, 34, 712–745.
- Stapleton, D. (1978). Analyzing political participation data with a MIMIC model. *Sociological Methodology*, 9(1), 52–74.
- Steg, L. (2003). Factors influencing the acceptability and effectiveness of transport pricing. En *Acceptability of Transport Pricing Strategies* (págs. 187-202). Oxford: Elsevier.
- Steimetz, S. S. (Noviembre de 2008). Defensive driving and the external costs of accidents and travel delays. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(9), 703-724.
- Sun, C., Zheng, S., & Wang, R. (Marzo de 2014). Restricting driving for better traffic and clearer skies: Did it work in Beijing? *Transport Policy*, 32, 34-41.
- Teubel, U. (Junio de 2000). The welfare effects and distributional impacts of road user charges on commuters: An empirical analysis of Dresden. *International Journal of Transport Economics*, 27(2), 231-255.
- Thomson, J. M. (Enero de 1988). Reflections on the Economics of Traffic Congestion. *Journal of Transport Economics and Policy*, 32(1), 93-112.
- Transport for London. (2009). *Central London Congestion Charging: Impacts Monitoring. Fifth Annual Report, July*. Recuperado el 24 de 08 de 2009, de www.tfl.gov.uk/assets/downloads/fifthfifthannual-impacts-monitoring-report-2007-07-07.pdf
- Universidad Nacional de Colombia, S. (2012). *Estudio de viabilización para la implementación del sistema de cobro por congestión de la ciudad de Medellín*. Medellín.
- University College London-Universidad de los Andes. (2013). *Cobros de congestión en ciudades Colombianas*.
- Verhoef, E. T., & Small, K. A. (2007). *The Economics of Urban Transportation* (Segunda ed.). Londres: Routledge.
- Verhoef, E. T., Nijkamp, P., & Rietveld, P. (Noviembre de 1996). Second-Best Congestion Pricing: The Case of an Untolled Alternative. *Journal of Urban Economics*, 40(3), 279-302.
- Vredin Johansson, M., Heldt, T., & Johansson, P. (2006). The effects of attitudes and personality traits on mode choice. *Transportation Research Part A*, 507–552.
- Walker, J. L. (2001). Extended Discrete Choice Models: Integrated Framework, Flexible Error Structures and Latent Variables. *Massachusetts Institute of Technology*, 208.
- Walters, A. (Octubre de 1961). The Theory and Measurement of Private and Social Cost of Highway Congestion. (D. Acemoglu, Ed.) *Econometrica*, 29(4), 676-699.
- Wardman, M. (Abril-Julio de 2001). A review of British evidence on time and service quality valuations. *Transportation Research Part E*, 37E(2-3), 107-128.
- Yáñez, M., Raveau, S., & Ortúzar, J. d. (2010). Inclusion of latent variables in Mixed Logit models: Modelling and forecasting. *Transportation Research Part A*, 744-753.