

An illustration of a busy city street scene. The street is filled with various vehicles including cars, trucks, and buses. The background is a light green color. On the left side, there are several buildings and trees. The street curves to the right, and the background transitions to a light blue color. The overall style is a top-down, isometric view.

Políticas de tarificación por congestión

Efectos potenciales y
consideraciones para su
implementación en Bogotá,
Ciudad de México y Santiago

Juan Pablo Bocarejo
Ramiro López Ghio
Andrés Blanco

Políticas de tarificación por congestión

Efectos potenciales y consideraciones
para su implementación en Bogotá,
Ciudad de México y Santiago

Editores

Juan Pablo Bocarejo
Ramiro López Ghio
Andrés Blanco



Banco Interamericano de Desarrollo

**Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo**

López Ghio, Ramiro.

Políticas de tarificación por congestión: efectos potenciales y consideraciones para su implementación en Bogotá, Ciudad de México y Santiago / Ramiro López Ghio, Juan Pablo Bocarejo, Andrés Blanco Blanco.

p. cm. — (Monografía del BID ; 603)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Congestion pricing-Colombia. 2. Congestion pricing-Mexico. 3. Congestion pricing-Chile. 4. Traffic congestion-Colombia-Management. 5. Traffic congestion-Mexico-Management. 6. Traffic congestion-Chile-Management. 7. Urban transportation policy-Colombia. 8. Urban transportation policy-Mexico. 9. Urban transportation policy-Chile. I. Bocarejo, Juan Pablo. II. Blanco Blanco, Andrés Guillermo. III. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Gestión Fiscal. IV. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Vivienda y Desarrollo Urbano. V. Título. VI. Serie.

IDB-MG-603

Palabras clave: ciudades sostenibles, desarrollo urbano, impuestos ambientales, infraestructura y transporte, transporte urbano

Clasificación JEL: H23, R41, R48

Copyright © 2018 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Banco Interamericano de Desarrollo
1300 New York Avenue, N.W.
Washington, D.C. 20577
www.iadb.org

El Sector de Instituciones para el Desarrollo fue responsable de la producción de la publicación.

Colaboradores externos:

Coordinación de la producción editorial: Sarah Schineller (A&S Information Specialists, LLC)

Revisión editorial: Julia Gomila

Diagramación: The Word Express, Inc.

Índice

Agradecimientos.....	ix
Resumen ejecutivo.....	xi
Introducción.....	xvii
Capítulo 1: Revisión de literatura	1
Capítulo 2: Efectos potenciales de la tarificación por congestión	5
2.1 Metodología general.....	6
2.2 Modelación del impacto del costo en el uso del automóvil.....	7
2.3 Área de aplicación del esquema de tarificación por congestión.....	11
2.3.1 Bogotá.....	12
2.3.2 Ciudad de México.....	16
2.3.3 Santiago.....	23
2.4 Modelo de determinación de la tarifa óptima.....	28
Capítulo 3: Otras estrategias económicas de reducción de la congestión	37
3.1 Las experiencias de gestión de la demanda.....	37
3.1.1 Bogotá.....	37
3.1.2 Ciudad de México.....	38
3.1.3 Santiago.....	38
3.2 Alternativas a la tarificación por congestión - Políticas de estacionamiento.....	40
Capítulo 4: Desafíos de implementación	45
4.1 Equidad y aceptabilidad.....	45
4.2 Tecnologías y costos de implementación.....	47
4.2.1 Sistemas de cobro no electrónico.....	49
4.2.2 Sistemas de cobro electrónico.....	49
Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones	53
5.1 Sobre la metodología propuesta.....	53
5.2 Sobre los resultados en las ciudades analizadas.....	53
5.3 Sobre los desafíos de implementación.....	54

Bibliografía	55
Anexo 1: Estadísticas descriptivas variables que se emplean en modelos de uso del automóvil.....	59
Anexo 2: Otros modelos de uso del automóvil.....	63
Anexo 3: Definición de curvas para la determinación de la tarificación por congestión	69
Anexo 4: Estimación de curvas para la determinación de la tarificación por congestión	71
Anexo 5: Análisis de sensibilidad: caso de Bogotá	73
Anexo 6: Análisis de sensibilidad: caso de Santiago.....	79
Anexo 7: Análisis de sensibilidad: caso de Ciudad de México	85

Índice de cuadros

Cuadro 1: Cifras sobre la congestión vehicular en Bogotá, Ciudad de México y Santiago	xii
Cuadro 2: Características e impactos de un esquema de tarificación por congestión - Bogotá, Ciudad de México y Santiago.....	xiii
Cuadro 3: Opciones equivalentes susceptibles de implementación - Bogotá, Ciudad de México y Santiago.....	xiii
Cuadro 4: Estimación del aumento equivalente de la tarifa por congestión en estacionamiento y en combustible.....	xiv
Cuadro 5: Elementos a tener en cuenta para la implementación de la tarificación por congestión	xv
Cuadro 6: Mecanismos económicos asociados al uso del automóvil	2
Cuadro 7: Características de casos exitosos de cobros por congestión.....	4
Cuadro 8: Factores que explican el uso del automóvil.....	7
Cuadro 9: Descripción de modelos para la determinación de la elasticidad precio-demanda del uso del automóvil	9
Cuadro 10: Supuestos y datos adicionales empleados en los modelos de uso del automóvil	10
Cuadro 11: Modelos estimados de uso del automóvil.....	10
Cuadro 12: Comparación de las zonas de tarificación en las tres ciudades.....	29
Cuadro 13: Parámetros base para el modelo de determinación de la tarifa por congestión	30
Cuadro 14: Resultados de los modelos de congestión.....	31
Cuadro 15: Análisis de sensibilidad frente a la velocidad, el valor del tiempo y la elasticidad - Bogotá	33
Cuadro 16: Análisis de sensibilidad frente a la velocidad, el valor del tiempo y la elasticidad - Santiago	33
Cuadro 17: Análisis de sensibilidad frente a la velocidad, el valor del tiempo y la elasticidad - Ciudad de México.....	33
Cuadro 18: Estimación del aumento equivalente de la tarifa por congestión en estacionamiento y combustible.....	34

Cuadro 19:	Comparación de la recaudación por tarificación con otras fuentes de recursos y posibles usos en las ciudades.....	34
Cuadro 20:	Descripción de los mecanismos económicos.....	38
Cuadro 21:	Medidas vigentes de gestión de la demanda - Bogotá	39
Cuadro 22:	Medidas vigentes de gestión de la demanda - Ciudad de México	41
Cuadro 23:	Medidas vigentes de gestión de la demanda - Santiago	41
Cuadro 24:	Tiempo de estacionamiento por localidad - Bogotá.....	43
Cuadro 25:	Elementos para la construcción de aceptabilidad	48
Cuadro A1:	Estadísticas descriptivas variables en el modelo de uso diario del automóvil por hogar - Bogotá.	59
Cuadro A2:	Estadísticas descriptivas variables en el modelo de uso diario del automóvil por hogar - Santiago.....	60
Cuadro A3:	Estadísticas descriptivas variables en el modelo de uso diario del automóvil por hogar - Ciudad de México	61

Índice de gráficos

Gráfico 1:	Metodología general.....	7
Gráfico 2:	Metodología para la definición de la zona de congestión.....	11
Gráfico 3:	Distribución total de viajes - Bogotá y Soacha (valores por hora)	14
Gráfico 4:	Viajes en vehículo privado en la zona de tarificación por congestión - Bogotá	15
Gráfico 5:	Distribución de viajes - Ciudad de México	20
Gráfico 6:	Distribución de viajes - Santiago.....	25
Gráfico 7:	Diagrama de determinación de la tarifa óptima.....	29
Gráfico 8:	Modelo de congestión - Bogotá.....	31
Gráfico 9:	Modelo de congestión - Santiago.....	32
Gráfico 10:	Modelo de congestión - Ciudad de México	32
Gráfico A1:	Sensibilidad de la tarifa frente a la velocidad promedio de circulación.....	73
Gráfico A2:	Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente a la velocidad promedio de circulación.....	73
Gráfico A3:	Sensibilidad del costo de congestión frente a la velocidad promedio de circulación.....	74
Gráfico A4:	Sensibilidad de la recaudación frente a la velocidad promedio de circulación.....	74
Gráfico A5:	Sensibilidad de la reducción de emisiones CO ₂ de frente a la velocidad promedio de circulación.....	74
Gráfico A6:	Sensibilidad de la tarifa frente al valor del tiempo.....	75
Gráfico A7:	Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente al valor del tiempo	75
Gráfico A8:	Sensibilidad del cambio en la velocidad frente al valor del tiempo.....	75
Gráfico A9:	Sensibilidad del costo de congestión frente al valor del tiempo	76
Gráfico A10:	Sensibilidad de la recaudación frente al valor del tiempo	76
Gráfico A11:	Sensibilidad del cambio en emisiones de CO ₂ frente al valor del tiempo ..	76
Gráfico A12:	Sensibilidad de la tarifa frente a la elasticidad	77
Gráfico A13:	Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente a la elasticidad ..	77

Gráfico A14: Sensibilidad del cambio en la velocidad frente a la elasticidad.....	77
Gráfico A15: Sensibilidad del costo de la congestión frente a la elasticidad	78
Gráfico A16: Sensibilidad de la recaudación frente a la elasticidad	78
Gráfico A17: Sensibilidad del cambio en emisiones de CO ₂ frente a la elasticidad	78
Gráfico A18: Sensibilidad de la tarifa frente a la velocidad promedio de circulación.....	79
Gráfico A19: Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente a la velocidad promedio de circulación.....	79
Gráfico A20: Sensibilidad del costo de congestión frente a la velocidad promedio de circulación.....	80
Gráfico A21: Sensibilidad de la recaudación frente a la velocidad promedio de circulación.....	80
Gráfico A22: Sensibilidad de la reducción de emisiones de CO ₂ frente a la velocidad promedio de circulación.....	80
Gráfico A23: Sensibilidad de la tarifa frente al valor del tiempo.....	81
Gráfico A24: Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente al valor del tiempo	81
Gráfico A25: Sensibilidad del cambio en la velocidad frente al valor del tiempo.....	81
Gráfico A26: Sensibilidad del costo de congestión frente al valor del tiempo	82
Gráfico A27: Sensibilidad de la recaudación frente al valor del tiempo	82
Gráfico A28: Sensibilidad del cambio en emisiones de CO ₂ frente al valor del tiempo ..	82
Gráfico A29: Sensibilidad de la tarifa frente a la elasticidad	83
Gráfico A30: Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente a la elasticidad ..	83
Gráfico A31: Sensibilidad del cambio en la velocidad frente a la elasticidad.....	83
Gráfico A32: Sensibilidad del costo de congestión frente a la elasticidad	84
Gráfico A33: Sensibilidad de la recaudación frente a la elasticidad.....	84
Gráfico A34: Sensibilidad del cambio en emisiones CO ₂ de frente a la elasticidad	84
Gráfico A35: Sensibilidad de la tarifa frente a la velocidad promedio de circulación.....	85
Gráfico A36: Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente a la velocidad promedio de circulación.....	85
Gráfico A37: Sensibilidad del costo de congestión frente a la velocidad promedio de circulación.....	86
Gráfico A38: Sensibilidad de la recaudación frente a la velocidad promedio de circulación.....	86
Gráfico A39: Sensibilidad de la reducción de emisiones de CO ₂ frente a la velocidad promedio de circulación.....	86
Gráfico A40: Sensibilidad de la tarifa frente al valor del tiempo.....	87
Gráfico A41: Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente al valor del tiempo	87
Gráfico A42: Sensibilidad del cambio en la velocidad de circulación frente al valor del tiempo	87
Gráfico A43: Sensibilidad del costo de congestión frente al valor del tiempo	88
Gráfico A44: Sensibilidad de la recaudación frente al valor del tiempo	88
Gráfico A45: Sensibilidad de la reducción de emisiones de CO ₂ frente al valor del tiempo	88
Gráfico A46: Sensibilidad de la tarifa frente a la elasticidad	89
Gráfico A47: Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente a la elasticidad ..	89

Gráfico A48: Sensibilidad del cambio en la velocidad frente a la elasticidad.....	89
Gráfico A49: Sensibilidad del costo de la congestión frente a la elasticidad	90
Gráfico A50: Sensibilidad de la recaudación frente a la elasticidad.....	90
Gráfico A51: Sensibilidad del cambio en emisiones de frente a la elasticidad	90

Índice de mapas

Mapa 1: Cargas de vehículos privados en la red vial en hora pico de la mañana - Bogotá.....	12
Mapa 2: Relación volumen-capacidad para la red vial en hora pico de la mañana - Bogotá.....	12
Mapa 3: Principales destinos de viaje en vehículo privado - Bogotá.....	13
Mapa 4: Principales orígenes de viaje en vehículo privado - Bogotá.....	13
Mapa 5: Ubicación de la zona de tarificación por congestión - Bogotá.....	14
Mapa 6: Velocidades en zona de tarificación por congestión - Bogotá, 6:45.....	15
Mapa 7: Velocidades en zona de tarificación por congestión - Bogotá, 12:00.....	16
Mapa 8: Velocidades en zona de tarificación por congestión - Bogotá, 18:40.....	17
Mapa 9: Viajes de un solo tramo realizados en vehículo particular por distrito - Ciudad de México.....	18
Mapa 10: Principales pares de distritos de origen y destino con más viajes de un solo tramo en vehículo particular - Ciudad de México.....	18
Mapa 11: Ubicación de la zona de tarificación por congestión - Ciudad de México.....	19
Mapa 12: Viajes en vehículo privado - Ciudad de México	20
Mapa 13: Viajes en vehículo privado en la zona de tarificación por congestión - Ciudad de México.....	21
Mapa 14: Velocidades en zona de tarificación por congestión - Ciudad de México, 7:15.....	21
Mapa 15: Velocidades en zona de tarificación por congestión - Ciudad de México, 12:35.....	22
Mapa 16: Velocidades en zona de tarificación por congestión - Ciudad de México, 18:40.....	22
Mapa 17: Tiempos de viaje en Santiago de Chile.....	23
Mapa 18: Indicador de saturación en hora pico de la mañana para el sector céntrico de la ciudad.....	24
Mapa 19: Ubicación de la zona de tarificación por congestión - Santiago.....	24
Mapa 20: Viajes en vehículo privado - Santiago.....	25
Mapa 21: Viajes en vehículo privado en la zona de tarificación por congestión - Santiago.....	26
Mapa 22: Velocidades en la zona de tarificación por congestión - Santiago, 8:00...	26
Mapa 23: Velocidades en la zona de tarificación por congestión - Santiago, 12:00..	27
Mapa 24: Velocidades en la zona de tarificación por congestión - Santiago, 7:30....	28

Índice de recuadros

Recuadro 1: Oposición a los cargos por congestión	3
---	---

Agradecimientos

La presente publicación es el resultado de un trabajo económico y sectorial del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) elaborado en 2015. Los autores agradecen enormemente la orientación, las ideas y el apoyo recibido de parte de Rafael de la Cruz, Gerente General del Departamento de Países del Grupo Andino del BID, de Vicente Fretes Cibils, Jefe de la División de Gestión Fiscal del BID y de Tatiana Gallego, Jefe de la División de Vivienda y Desarrollo Urbano. Carlos

Mojica y Amado Crotte realizaron aportes significativos durante las reuniones técnicas del proceso de preparación de insumos que hizo posible esta publicación. Ingrid Portilla y Álvaro Caviedes contribuyeron de manera determinante en los enfoques conceptuales y metodológicos y en el resultado del estudio. Asimismo, los autores reconocen la labor de Johanna López Velandia y Carlos Salazar por las valiosas contribuciones en las etapas finales y de edición.

Resumen ejecutivo




La rápida urbanización en América Latina ha traído consigo considerables problemas de tránsito y contaminación ambiental. La movilidad de los centros de las ciudades se ha visto particularmente limitada, causando fuertes externalidades negativas que afectan el bienestar de la población. Las medidas tradicionales para gestionar la demanda de transporte privado, como los impuestos a la circulación y a los combustibles, han resultado insuficientes para reducir la congestión vehicular y sus efectos adversos sobre la salud y la economía. Simultáneamente, las ciudades enfrentan problemas para financiar el mantenimiento de la infraestructura vial y la construcción y ampliación de los sistemas de transporte.

Varias medidas se discuten hoy como estrategias alternativas para enfrentar la congestión: el cobro de estacionamiento en la vía pública, gravámenes adicionales a estacionamientos públicos y privados, y la tarificación por congestión, entre otras. Esta última ha probado ser efectiva para reducir la congestión y la contaminación, a la vez que permite recaudar los recursos para hacerla financieramente sostenible, a pesar de que requiere inversiones importantes en tecnología de control e infraestructura de transporte. Desde el punto de vista teórico, se considera que este instrumento resulta ser el más efectivo en tanto que apunta a que cada usuario internalice los costos que le genera a la sociedad por producir congestión. Comparadas con la tarificación, medidas como los

cobros de estacionamiento son menos efectivas, debido a que solo logran internalizar los costos de las externalidades para aquellos que utilizan el estacionamiento.

Los casos exitosos de implementación de cobros por congestión se han presentado principalmente en países desarrollados y, salvo un intento fallido en Bogotá, no se han impulsado proyectos concretos de este instrumento en ciudades de América Latina. La polémica y poca aceptación de este tipo de medidas exige que las ciudades hagan un análisis detallado de los posibles efectos de las tasas por congestión, con el fin de determinar su viabilidad y efectividad en cada caso. Del mismo modo, es necesario considerar los efectos diferenciales de la medida sobre hogares con diferentes niveles de ingreso, y en caso de ser necesario, compensar u ofrecer alternativas de transporte. Por ello, en el presente documento se analizan los efectos que este tributo puede tener en tres ciudades de la región —Bogotá, Ciudad de México y Santiago— en términos de reducción de la congestión y la contaminación, y de la posible generación de recursos fiscales. También se discuten los aspectos fundamentales para la implementación de la medida, así como el contexto de otras medidas para controlar la congestión que las ciudades estudiadas han implementado hasta el momento. Los principales hallazgos del estudio se resumen a continuación en cuatro preguntas principales.

CUADRO 1. Cifras sobre la congestión vehicular en Bogotá, Ciudad de México y Santiago

	Bogotá	Ciudad de México	Santiago
Zona	 Área: 8,7 km ²	 Área: 27,02 km ²	 Área: 15,7 km ²
Viajes en automóvil (miles)	348,7	507,3	629,5
Velocidad promedio al día (km/h)	17	11	21
Km recorridos (miles)	641,27	2.050	2.478
Costo de la congestión (US\$/día)	70.571	401.064	137.878
Costo de la congestión (millones US\$/año)	22,6	128,3	44,1
Elasticidad al precio	-0,58	-0,52	-0,76

Fuente: Elaboración y cálculos propios sobre la base de las encuestas de movilidad.

¿Qué tan fuerte es la congestión en Bogotá, Ciudad de México y Santiago?

Pese a las diferencias en las características de movilidad, la propia estructura de las ciudades y sus condiciones económicas, se identificaron las áreas donde tendría sentido la implementación de un esquema de tarificación por congestión sobre la base de la cantidad de viajes generados y atraídos en automóvil, las bajas velocidades promedio de circulación y la cantidad de empleos allí localizados. Se destaca que la extensión de las áreas propuestas varía de manera importante, siendo la de Bogotá la más pequeña (8,7 km²) y la de la Ciudad de México la más extensa (27,02 km²) (cuadro 1). De igual modo, de acuerdo con los análisis desarrollados y explicados a lo largo de este documento, se estima que en las zonas propuestas se hacen entre

348.700 y 629.500 viajes en un periodo de aproximadamente 12 horas. Los kilómetros recorridos en la zona oscilan entre 641.270 y 2,5 millones en el mismo periodo. En estas condiciones de movilidad se estimó que el costo económico de la congestión registrada se ubicaría en un rango de US\$70.571 a US\$401.064 al día.

¿Qué características e impactos tendría un esquema de tarificación por congestión?

Los análisis desarrollados y explicados en el capítulo 2 muestran que si se implementara en las zonas propuestas el esquema de tarificación por congestión, durante un periodo de 12 horas aproximadamente, las tarifas óptimas promedio por kilómetro recorrido en la zona, sin discriminar por tipo

CUADRO 2. Características e impactos de un esquema de tarificación por congestión – Bogotá, Ciudad de México y Santiago

	Bogotá	Ciudad de México	Santiago
Periodo del cobro ^a	6:00 a 19:00	7:00 a 19:00	7:30 a 20:00
Tarifa óptima (US\$/km)	0,33	0,42	0,24
Peaje promedio al día (US\$)	2	3,33	1,91
Mejora de velocidad (km/h)	6,5	8,4	4,7
Recaudación esperada (miles de US\$/día)	154	611	447
Reducción de emisiones CO ₂ (Ton./día)	59,78	101,57	130,16
Reducción en tiempos de viaje promedio (min.)	2,5	10,2	2,2

Fuente: Elaboración y cálculos propios.

^a Horario propuesto considerando el perfil horario de viajes a lo largo del día para cada una de las ciudades.

de vehículo, serían US\$0,24, US\$0,33 y US\$0,42 para Santiago, Bogotá y Ciudad de México, respectivamente (cuadro 2). Esto conllevaría un peaje promedio al día por transitar en la zona sin discriminar por tipo de vehículo que oscila entre US\$1,91 y US\$3,33. Por otra parte, se obtendrían importantes beneficios en el aumento de la velocidad promedio de circulación en la zona, que rondaría los 6 km/h en las tres ciudades. La medida generaría una reducción de la congestión cercana a 28%, la cual estaría en línea con la observada en países desarrollados que han implementado este instrumento.

Tras su implementación, el cobro por congestión permitiría obtener importantes recursos, que oscilan entre US\$154.000 y US\$611.000 al día en promedio según la ciudad, y que podrían reinvertirse en el mismo sistema de transporte de la ciudad. Como se muestra en el capítulo 2, la recaudación anual de esta tarifa es más significativa para

Ciudad de México y Santiago, donde equivaldría a 97% y 40% del impuesto de circulación de vehículos, o permitiría financiar 53 km y 19,5 km de infraestructura de sistemas de transporte. Bogotá, al tener la menor recaudación estimada (US\$154.000 al día) y, a su vez, los mayores costos de infraestructura, podría financiar una pequeña porción de su sistema de transporte.

¿Qué opciones equivalentes de gestión de la demanda podrían considerarse?

De manera general, para aliviar las condiciones de congestión urbana y sus externalidades negativas en las ciudades analizadas, se revisan las medidas equivalentes a la tarificación vial que han sido implementadas en las ciudades estudiadas (cuadro 3). Estas incluyen medidas de tipo económico orientadas a cobrar por la propiedad, el uso y

CUADRO 3. Opciones equivalentes susceptibles de implementación – Bogotá, Ciudad de México y Santiago

	Impuestos a vehículos	Impuestos a combustibles	Política de estacionamiento
Cobro indiscriminado por la propiedad del automóvil	X		
Cobro indiscriminado por uso del automóvil	X	X	
Impacto a viajes que generan congestión	X	X	X

Fuente: Elaboración propia sobre la base de Clean Air Institute (2012).

CUADRO 4. Estimación del aumento equivalente de la tarifa por congestión en estacionamiento y en combustible

Ítem	Bogotá	Santiago	Ciudad de México
Estacionamiento (US\$/día)	1,65	0,42	0,59
Combustible (US\$/día)	4,81	2,06	2,45
Aumento del costo de estacionamiento (%)	121%	793%	324%
Aumento del costo de combustible (%)	42%	162%	78%

Fuente: Elaboración y cálculos propios sobre la base de las encuestas de movilidad.

las externalidades generadas por el automóvil y los combustibles empleados, y medidas de tipo regulatorio, algunas de las cuales ya experimentan desgaste y limitada efectividad para reducir la congestión.

A partir de los resultados de la tarifa por congestión óptima, se realiza un análisis comparativo que muestra que aumentar el costo del estacionamiento y el del combustible en un monto equivalente a la tarifa estimada implicaría incrementos porcentuales que oscilan entre 121%-793% y 42%-162% según la ciudad (cuadro 4). Incrementos de este nivel serían difíciles de implementar; en el caso del estacionamiento, se requeriría un incremento muy elevado en un instrumento que tiene menor efectividad para

reducir la congestión, como así lo exponen Miller y Wilson (2015), mientras que en el caso de los combustibles, la discrecionalidad del ajuste tiende a recaer en niveles de gobierno superiores al local.

¿Qué elementos deben considerarse para la implementación de los esquemas de tarificación por congestión?

Teniendo en cuenta las experiencias internacionales y los estudios al respecto, surge que para el proceso de definición, planificación e implementación de un esquema de tarificación por congestión, es preciso considerar los elementos que se incluyen en el cuadro 5.

CUADRO 5. Elementos a tener en cuenta para la implementación de la tarificación por congestión

Elemento	Descripción
¿Qué es lo principal a la hora de pensar, planear y diseñar un esquema de tarificación por congestión?	<ul style="list-style-type: none"> Definir claramente sus objetivos.
¿Cuáles son los objetivos a explorar?	<p>Objetivos de movilidad:</p> <ul style="list-style-type: none"> Disminución de tiempos de viaje para lograr una mayor productividad de la economía, reducción de congestión, reducción de volumen vehicular en hora pico, aumento de velocidad, aumento de confiabilidad, promoción de uso de modos alternativos más sostenibles (transporte público y no motorizado). <p>Objetivos ambientales:</p> <ul style="list-style-type: none"> Reducción de emisiones de gases efecto invernadero y de contaminantes, y reducción de ruido. <p>Objetivos financieros:</p> <ul style="list-style-type: none"> Obtención de recursos para la ciudad. <p>Objetivos sociales:</p> <ul style="list-style-type: none"> Aumento de la equidad al invertir los recursos obtenidos tanto en modos alternativos como en transporte público.
¿Cómo se define la viabilidad del esquema de tarificación por congestión?	<p>Un cobro por congestión viable es aquel:</p> <ul style="list-style-type: none"> Cuyos beneficios generados a la sociedad superan el conjunto de costos asociados al esquema. Que es de fácil comprensión para la población y es aceptado por esta. Que goza de apoyo político. Que es funcional dentro del contexto interinstitucional de la ciudad. Que transfiere los recursos obtenidos reinvirtiéndolos en la ciudad, principalmente en modos no motorizados y transporte público. En el que las medidas de fortalecimiento del transporte público y no motorizado se han implementado previamente y durante la instalación y operación del cobro.
¿Cómo se define la zona de cobro?	<p>La zona o corredor de cobro debe ser aquella/aquel con:</p> <ul style="list-style-type: none"> Problemas de congestión. Bajas velocidades de circulación. Alta densidad de empleos y comercio. Usuarios con capacidad de pago media-alta en relación con la media poblacional.
¿Qué se debe considerar para definir la tarifa al usuario?	<ul style="list-style-type: none"> Cantidad de vehículos y personas afectados. Capacidad de pago de los usuarios de la zona o corredor. Grado de congestión presente en la zona. Elasticidad de la demanda de transporte privado ante el precio. Expectativas de recaudación. Costos de implementación, operación y mantenimiento. Beneficios esperados.
¿Quiénes deben tener tarifas especiales?	<ul style="list-style-type: none"> Población residente en la zona. Vehículos de atención médica y emergencias. Vehículos de fuerzas policiales y armadas. Vehículos de tecnologías más limpias (bajas emisiones). Vehículos de otros entes importantes, con previo acuerdo. Vehículos de transporte público. Vehículos de/para personas con discapacidad. Eventualmente vehículos con más de tres ocupantes. Cabe advertir, sin embargo, que el control de cumplimiento de esta medida resultaría complejo.

(continúa en la página siguiente)

CUADRO 5. Elementos a tener en cuenta para la implementación de la tarificación por congestión (continuación)

Elemento	Descripción
¿Qué se tiene en cuenta para definir la tecnología a utilizar?	<ul style="list-style-type: none"> • Esquema de cobro a implementar (por área, por distancia recorrida, por cordón, etc.). • Extensión del área de la zona de congestión (número de puntos de control necesarios). • Aceptabilidad (por ejemplo, preocupación por invasión a la privacidad). • Procedimientos de fiscalización (bases de datos confiables y actualizadas, cuentas bancarias, etc.). • Contexto institucional (quién lo opera, cómo se maneja la recaudación, etc.). • Contexto cultural (cultura de evasión, modificación ilegal de placas, vandalismo, etc.). • Restricciones presupuestarias existentes. • Visión a largo plazo de la región (¿se expandirá el cobro?, ¿se implantarán cobros en zonas cercanas que requerirán interoperabilidad y compatibilidad?, ¿se utilizará la tecnología del cobro para otros propósitos como seguridad, cobros ambientales?, etc.).
¿Qué inversiones adicionales se requieren?	<ul style="list-style-type: none"> • Inversiones previas para aumentar la atracción de viaje y la capacidad del transporte público, bicicleta y caminata. • Inversiones en procesos de participación y consulta pública. • Inversiones en divulgación de información a la población. • Inversiones en tecnologías complementarias al cobro (tecnologías de información y gestión de tránsito en tiempo real; tecnologías para el control de infractores y fiscalización). • Mejoramiento de la gestión de tránsito.
¿Quién debe estar a cargo?	<ul style="list-style-type: none"> • Una única autoridad de transporte con capacidad ejecutora sobre los distintos componentes del sistema de transporte de la ciudad (infraestructura vial, manejo de tránsito, administración de la demanda, buses, taxis, trenes, etc.).
¿Cómo mejorar la aceptabilidad?	<ul style="list-style-type: none"> • Reinvertiendo recursos obtenidos en la ciudad y en el transporte público y no motorizado. • Haciendo visible la transferencia de beneficios. • Comunicando con claridad que el motivo del esquema de tarificación es disminuir la congestión vial generada, lo que provoca un aumento en los tiempos de viaje, pérdidas de productividad para la economía, reducción de la calidad de vida de los ciudadanos y contaminación ambiental, entre otros. • Definiendo y presentando el cobro como parte de una estrategia más amplia, compuesta por un conjunto de medidas complementarias de fortalecimiento de modos alternativos al automóvil (transporte público, bicicleta y caminata), gestión de la demanda de transporte, control de tránsito, sistemas de información de tránsito, etc. Asimismo, como parte de una estrategia direccionada por objetivos generales de reducción de emisiones, aumento de equidad, reducción de ruido, etc.
¿Por qué hacer seguimiento y evaluación?	<p>La obtención de información para seguimiento y evaluación debería, en teoría, recabarse en tiempo real, ya que permite:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conocer y cuantificar los beneficios de la implementación del cobro. • Priorizar la inversión de capital en mejoras y mantenimiento. • Obtener información que potencie el desempeño del esquema en el futuro y aplicar procedimientos de mejora continua. • Adaptar el sistema ante cambios estructurales, económicos y políticos de la ciudad. • Brindar al usuario información en tiempo real para influenciar sus procesos de decisión y mejorar la confiabilidad del viaje. • Mantener la confianza pública en el esquema de tarificación por congestión. • Administrar imprevistos para mitigar sus impactos en la movilidad de la ciudad.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de Tyler *et al.* (2013).

Introducción

Los problemas provenientes de la calidad precaria del aire y la congestión de tránsito son particularmente considerables en los centros urbanos de las ciudades latinoamericanas. La región se caracteriza por tener ciudades con una amplia infraestructura vial pero cuya calidad es baja, dadas las limitaciones presupuestarias para financiar su mantenimiento. Aunque la mayor parte de los desplazamientos se realizan en transporte público, pocas vías tienen prioridad para este modo de transporte, mientras que el transporte en vehículos privados ha intensificado el uso de la infraestructura vial y es responsable de la mayor parte de las emisiones contaminantes (Banco de Desarrollo de América Latina - CAF, 2011).

La contaminación y la congestión urbana pueden obstaculizar el crecimiento económico por los efectos negativos que tienen sobre la salud humana y la productividad, a la vez que aceleran el cambio climático, dificultando el desarrollo futuro en países vulnerables. Estos problemas urbanos representan las clásicas externalidades negativas que requieren acciones correctivas por parte de los gobiernos locales. Tradicionalmente se han utilizado impuestos a los combustibles y a la circulación como medidas para incrementar el precio del uso del automóvil privado; sin embargo, estos impuestos no varían en función de la localidad, el momento del día, o las vías donde ocurre la congestión, por lo cual su capacidad para corregir la externalidad se ve disminuida. Se han puesto en marcha otros esfuerzos, como las restricciones de circulación según el número de

patente o placa, pero su efectividad también ha sido cuestionada.

Además de la necesidad de combatir los efectos adversos de la congestión, los gobiernos locales de la región enfrentan problemas para financiar bienes y servicios, particularmente la infraestructura vial y los sistemas de transporte público, los cuales son parte fundamental del desarrollo urbano. Varios sistemas de transporte masivo enfrentan problemas financieros que presionan al alza las tarifas, y el debate sobre los subsidios a estos sistemas son recurrentes en el debate público (Crotte *et al.*, 2017). Las ciudades enfrentan el reto de identificar impuestos alternativos que generen recursos para atender las necesidades de infraestructura y que cuenten con apoyo político y ciudadano.

Ante la necesidad de implementar nuevas medidas para gestionar la congestión, varios estudios han venido analizando instrumentos y enfoques alternativos. Uno de ellos es la tarificación por congestión, reconocida como una poderosa herramienta de política que incide en el comportamiento, estimulando lo que es visto como beneficioso y desestimulando aquello que es considerado como destructivo. Como resultado de su aplicación se destacan los efectos positivos en la reducción de la congestión y de las emisiones contaminantes, así como el incremento en el uso de medios alternativos de desplazamiento, como el transporte público y la bicicleta.

A pesar del creciente interés por la tarificación por congestión, su adopción se ha limitado a algunas ciudades de países desarrollados como

el Reino Unido, Singapur y Suecia. Por ello, la literatura que analiza los impactos distributivos y los desafíos de la implementación de esta política se concentra en países desarrollados (Timilsina y Dulal, 2008). La viabilidad de su implementación en las desafiantes mega ciudades latinoamericanas es esencialmente un área poco explorada. El objetivo del presente trabajo es contribuir a ampliar el conocimiento sobre la aplicabilidad de impuestos ecológicos, en particular de las tarifas por congestión, en una región que hasta el momento únicamente ha considerado la implementación de restricciones vehiculares para el control, ya sea de la congestión como de la contaminación ambiental (Mahendra, 2008; Rivasplata, 2013).

Este estudio resulta particularmente oportuno, pues las recientes iniciativas para adoptar la tarificación por congestión en la región han enfrentado gran oposición política y ciudadana, como en el caso de Bogotá. En este sentido, si bien se construye sobre la base de estudios de congestión ya realizados en Bogotá, Ciudad de México y Santiago, se realiza un análisis comparado de los efectos de la tarificación por congestión en términos de reducción de la congestión, contaminación y potencial de generación de recaudación. Además, se ahonda en el análisis de las implicaciones de esta medida

en términos de eficiencia y equidad porque, más allá de mejorar la movilidad, es importante alcanzar el máximo beneficio social en el uso de los recursos recaudados y no afectar desproporcionadamente a grupos de menores ingresos (Litman, 1996). Por lo tanto, se aborda la cuestión del uso de los recursos recaudados —vías frente a transporte público— como parte de las consideraciones para implementar la medida.

Este documento tiene cinco capítulos. El primero presenta una breve revisión de la literatura sobre los instrumentos de gestión de la demanda para manejar la congestión, resaltando los casos exitosos de tarificación por congestión. En el capítulo 2 se calcula el efecto potencial del esquema de cobro en términos de reducción de la congestión, de beneficios económicos esperados y de recaudación de ingresos en Bogotá, Ciudad de México y Santiago. El capítulo 3 presenta un análisis de otras opciones económicas para reducir el uso del automóvil, tales como impuestos al combustible y cobros de estacionamiento, y de cómo se han aplicado en las tres ciudades estudiadas. En el capítulo 4 se analizan los principales desafíos de implementación y, por último, en el capítulo 5 se exponen las principales conclusiones y recomendaciones del estudio.

Revisión de literatura

Existen múltiples medidas de política que intentan utilizar mecanismos de mercado y los precios para corregir las externalidades negativas generadas por el transporte, como la contaminación y la congestión. Dichos instrumentos incluyen impuestos a la propiedad de los vehículos y su circulación, cargos por congestión o contaminación, impuestos a los combustibles (o subsidios a los combustibles menos contaminantes) e impuestos a los estacionamientos (Timilsina y Dulal, 2008). Los objetivos de estas medidas son reducir la demanda o el número de viajes, inducir cambios del transporte privado al transporte público o incentivar la sustitución de combustibles, logrando así reducir el tránsito y las emisiones contaminantes. La literatura que analiza estos mecanismos sugiere que su efectividad depende del objetivo de política (congestión, contaminación, o recaudación fiscal) y de las condiciones particulares de los lugares donde se apliquen. El cuadro 6 resume los principales impuestos asociados al uso del automóvil que se discutirán también en el capítulo 3, en el contexto de cada ciudad estudiada.

El trabajo de Miller y Vela (2013) indica que los países con altos ingresos por concepto de impuestos relacionados con el medio ambiente parecerían desempeñarse mejor en el campo ambiental. Sin embargo, también se han identificado las limitaciones que tienen estos impuestos para contrarrestar las externalidades negativas de tipo ambiental y

urbano. Los impuestos a vehículos y combustibles son instrumentos de política de baja efectividad para reducir la congestión de tránsito, aunque generan importantes recursos fiscales. Estos impuestos no varían en función de la localidad, momento del día o las vías donde ocurre la congestión, por lo que no reducen la intensidad en el uso del vehículo ni proveen incentivos para un mayor ahorro de combustible (Parry, 2011). Tal como sugiere Diefenbacher *et al.* (2004), los impuestos ecológicos son eficientes en incentivar el cuidado del medio ambiente si logran incrementar los precios relacionados con las actividades perjudiciales.

Con la excepción de un puñado de países desarrollados, el uso de los impuestos ecológicos no es usual en las ciudades (Scott Cato, 2009). Países europeos como el Reino Unido, Alemania y los países escandinavos han sido pioneros en la introducción de impuestos relacionados con el medio ambiente (Brannlund y Gren, 1999). Hay un amplio rango de impuestos ecológicos, que incluye desde impuestos de carbono y de tarificación por congestión, como impuestos al transporte, hasta impuestos sobre el vertido de residuos a fin de mitigar la contaminación, o impuestos sobre los recursos escasos, como el impuesto británico sobre los áridos, que es un impuesto a la extracción de arena, grava y piedra excavada del suelo o dragada del mar en aguas británicas. En el caso de Alemania, el gobierno introdujo en 1999 un programa que aumentaba

CUADRO 6. Mecanismos económicos asociados al uso del automóvil

Mecanismo	Potencial de recaudación	Efecto	Implementación
Cuotas de registro vehicular o permisos de circulación	Alto	Posible reducción de compras de vehículos	Fácil aplicación pero poco popular
Impuesto a la gasolina	Alto	Reducción en el uso del automóvil	Sencilla, bajo costo, pero poco popular
Gravamen a estacionamientos privados no residenciales	Moderado	Reducción en la oferta de estacionamiento	Costo alto
Impuesto a estacionamientos públicos	Depende de la tarifa y el cobro de estacionamiento en vía	Cambios en el uso del suelo y la densificación	Fácil
Parquímetros (cobro estacionamiento en vía)	Medio	Reducción en el uso del automóvil y la congestión	Sencilla pero poco popular
Peajes urbanos y/o tarificación vial	Medio	Alta reducción en el uso de vehículo privado	Costo económico y político puede ser alto

Fuente: Crotte et al. (2017).

el precio del consumo de energía y recursos, al mismo tiempo que reducía los costos de mano de obra. Tal como declaró la Oficina Federal del Medio Ambiente de Alemania (Umweltbundesamt), el programa fue un éxito, tanto en su objetivo de reducir las emisiones de CO₂ en más de 7 millones de toneladas a 2002, como en la creación de al menos 60.000 nuevos puestos de trabajo.

En América Latina, la experiencia en términos de impuestos ambientales es aún más limitada. Además de los impuestos a la propiedad de vehículos y los gravámenes a los combustibles, las medidas más utilizadas han sido de tipo regulatorio, como es el caso de las restricciones a la circulación. Estas medidas regulatorias se implementan desde hace varios años en Ciudad de México, por razones ambientales, y en Bogotá, para combatir la congestión. Sin embargo, resultaron poco efectivas pues los conductores encontraron alternativas para evadirlas, por ejemplo, adquiriendo un segundo vehículo particular o una motocicleta. Además de que solo se trata de medidas de corto plazo, también han sido criticadas por generar un alto costo en términos de eficiencia, afectando la productividad de las ciudades así como a los hogares de bajos ingresos que utilizan un vehículo como medio de trabajo (Medina y Vélez, 2011).

Desde el punto de vista teórico, la tarificación por congestión se considera la medida más efectiva para llegar a un óptimo social, pues los conductores internalizan el costo que la congestión le genera a la sociedad (Tyler et al., 2013). Al buscar internalizar esta externalidad, se logran cambios en el comportamiento de los individuos, motivando los viajes en horas de menor congestión o en otros medios de transporte. Otros mecanismos económicos, como impuestos a la propiedad de vehículos privados, impuestos a los combustibles y cobros de estacionamiento, reducen la congestión en menor medida, debido a que no existe la capacidad de cobrarles directamente a aquellos que generan la congestión (Miller y Wilson, 2015). A pesar de su efectividad, la tarificación por congestión presenta importantes desafíos de implementación, por lo que las ciudades han priorizado el uso de mecanismos más fáciles de aplicar desde el punto de vista operativo, como los impuestos a los combustibles. Como señala el Clean Air Institute (2012), para reducir la congestión se requiere de un paquete de medidas, no de una sola, que se utilicen de manera coordinada y ajustada al contexto particular de cada ciudad (véanse Santos et al., 2010a y 2010b, que presentan un análisis detallado de la congestión como externalidad y de los instrumentos de política utilizados para enfrentarla).

RECUADRO 1. Oposición a los cargos por congestión

Análisis recientes de diferentes casos de tarificación en el mundo han abordado los aspectos que generan oposición a esta medida. Gu *et al.* (2018) destaca que la aplicación del cobro durante un periodo de prueba y la realización de referendos han sido elementos importantes, pero no resultan necesarios para lograr la aprobación de la medida. El estudio encuentra cuatro factores que inciden en el apoyo de los ciudadanos y legisladores al instrumento:

Privacidad

Este aspecto llevó al rechazo de la medida en Hong Kong. En los casos de Londres y Singapur, las preocupaciones fueron abordadas de manera temprana, garantizando que la información privada no se guardaría en las tarjetas utilizadas por el sistema y dejando en claro la responsabilidad de la autoridad de tránsito de salvaguardar los datos de los usuarios.

Equidad

La forma en que el cobro de la tarifa afecta a conductores de bajos ingresos o personas con discapacidad y a los residentes de la zona de cobro genera rechazo en tanto no se propongan alivios para estos grupos. Londres, Estocolmo y Milán ofrecieron descuentos a residentes de las zonas de congestión y exenciones a usuarios con discapacidad. En Hong Kong, Edimburgo y Nueva York, la medida fue rechazada en gran parte porque no se llegó a un acuerdo sobre estos aspectos en la discusión legislativa.

Complejidad

En Edimburgo y Manchester se propuso un doble cordón que dificultó la comprensión de la medida de tarificación. En Estocolmo y Milán, las propuestas iniciales fueron difíciles de entender debido a que incorporaban estructuras de cobro variable. En ambos casos, la propuesta inicial fue ajustada hacia esquemas más simples, lo que aumentó su nivel de aceptación.

Incertidumbre

La incertidumbre y falta de información sobre la efectividad de la medida fue una de las razones que llevó al rechazo de la medida en Edimburgo. La falta de certeza respecto del uso que se va a dar a la recaudación de la tarificación también es otra fuente de rechazo. En Londres, Estocolmo, Milán y Manchester se aclaró desde un inicio que la tarificación iba acompañada de un paquete de medidas de transporte, incluidas mejoras en transporte público, con lo cual se ganó la aceptación del público. Del mismo modo, las ciudades donde se implementaron los cobros mediante un periodo de prueba han permitido a la ciudadanía observar la efectividad de la medida para reducir la congestión.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de Gu *et al.* (2018).

El uso de la tarificación por congestión se ha limitado a algunas ciudades en países desarrollados como el Reino Unido, Singapur y Suecia, en las cuales se han logrado reducciones de entre 13% y 30% en el tránsito, y de entre 15% y 20% en los gases de efecto invernadero, con importantes mejoras para el bienestar (Pike, 2010). Si bien estos casos han

sido exitosos, no han estado exentos de polémica. En la mayoría, al principio la ciudadanía presentó una fuerte oposición a los cargos (recuadro 1). Sin embargo, una vez que se redujo la congestión y los desplazamientos se hicieron más ágiles, se logró la aceptación del público. Tal es el caso de Estocolmo, donde el mecanismo se puso a prueba durante seis

CUADRO 7. Características de casos exitosos de cobros por congestión

Ciudad	Singapur	Londres	Estocolmo
Adopción	1975	2003	2006–07
Área de influencia	Centro de la ciudad. Originalmente 7,25 km ² (ampliación 2008).	Centro de la ciudad. 22 km ² , luego ampliado a 24 km ² .	Centro de la ciudad. 34 km ² .
Objetivo	Reducir la contaminación y motivar el uso de transporte público.	Reducir la congestión y contaminación.	Mejorar la movilidad y reducir la congestión.
Mecanismo de cobro	Cobro en horas pico con algunos vehículos eximidos. Luego todos los vehículos a todas horas, con tarifa diferencial. Cobro manual de licencias para todo el día o medio día.	Uso de cámaras para identificar placas de los vehículos y aplicar el cobro, de manera centralizada, al final del día. Tarifa fija: inicial de £5, que se incrementó a £8 en 2008.	Implementación en periodo de prueba durante seis meses. Cobro electrónico en 17 puntos de acceso al área. Tarifa de US\$3 por ingreso, con un cobro máximo diario de US\$8,5.
Efectos en la movilidad	Reducción inicial de 44% en la congestión (incremento de 10 millas/h en velocidad). Diez años después, reducción permanente de 31% en el tránsito. Incremento de 20% en el uso de buses de transporte público.	30% de reducción de congestión en la zona inicial y 10% en zona adicional. Incremento de 6% en uso de transporte público y de 66% en viajes en bicicleta en la zona de cobro original. 15–20% de reducción de emisiones de CO ₂ .	25% de reducción de tránsito, con similar incremento en velocidad. Aumento del uso de transporte público entre 6% y 9%. Reducción de emisiones de CO ₂ en 15%.
Ajustes posteriores	Sistema electrónico de cobro con tarifa variable según la congestión y ampliación de la zona de cobro. Se gravan camiones y motocicletas. Ajuste de tarifas cada tres meses.	En 2008, se expandió el cordón inicial en la zona occidental. Se estableció descuento de 90% para residentes de la zona de cobro.	Implementación definitiva en 2007, luego de un referendo ciudadano y de la aprobación del poder legislativo. Previamente se hicieron inversiones en infraestructura y transporte público.
Costos	Inicialmente, 12% de los ingresos, pero luego aumentaron bajo esquema electrónico.	Cerca de 50% de los ingresos son consumidos por costos operativos (2008).	Estimados en cerca del 25% de los ingresos anuales.

Fuente: Elaborado sobre la base de Pike (2010).

meses logrando reducir la congestión, la cual volvió a incrementarse una vez que se desactivó el cobro. Esto ayudó a obtener la aprobación definitiva del cobro en un referendo.

Una característica importante que comparten los casos de Singapur, Londres y Estocolmo es que los cargos fueron establecidos de manera flexible e integrada con las demás políticas de movilidad y transporte. De

esta manera, los tarifas y zonas de cobro fueron ajustadas en el tiempo en función de los objetivos establecidos y de los resultados observados en las pruebas piloto (cuadro 7). Igualmente, los cambios de un medio de transporte a otro estuvieron enteramente ligados al desarrollo de alternativas de transporte público confiables y de calidad, financiadas en parte con la recaudación del impuesto por congestión.

2

Efectos potenciales de la tarificación por congestión

El presente capítulo estima los posibles efectos de la tarificación por congestión en Bogotá, Ciudad de México y Santiago, en términos de congestión, contaminación y recaudación fiscal. El objetivo es contestar las siguientes preguntas de manera cuantitativa:

- ¿Cuál es la elasticidad de la demanda del uso del automóvil, es decir, cómo cambia el uso del automóvil frente a un aumento del costo?
- ¿Cuál es el monto de un peaje “óptimo” en cada ciudad?
- ¿Cuánto se reduce el uso del automóvil con este esquema de tarificación?
- ¿Qué beneficios económicos y sociales se obtienen?
- ¿Cuál es el monto de la recaudación esperada?
- ¿Cuál es la reducción de emisiones de CO₂?

Los modelos y ejercicios se desarrollaron específicamente para responder las preguntas anteriormente planteadas; por tanto, su carácter es estratégico. A continuación, se describe el análisis de dichos modelos:

- Planteamiento de una tarifa plana para todo el periodo propuesto de funcionamiento del esquema de tarificación vial. Para los cálculos de

la tarifa se incluyeron únicamente los viajes en vehículo particular, en las condiciones de tránsito promedio del día y no se contemplaron excepciones al pago de la tarifa de ningún tipo.

- No se consideraron las motos en los cálculos y análisis efectuados. Sin embargo, es preciso tener presente que en las ciudades de América Latina se ha venido experimentando un fuerte incremento del uso de este modo de transporte.
- Dado el carácter estratégico de los modelos, la limitada información y el hecho de que no se emplean modelos de transporte detallados que contemplen la totalidad de la ciudad ni la red de transporte público, los análisis no permiten determinar los efectos ni las necesidades adicionales de transporte público, ni un mayor uso de vías alternas o aspectos de equidad relacionados con la capacidad de pago de la tarifa estimada.
- No se desarrolla una evaluación ni económica ni financiera de los esquemas de tarificación por congestión planteados que determinen su viabilidad.
- En proyectos de tarificación vial, específicamente tipo cordón, una variable importante a considerar es el efecto cordón. El efecto cordón resulta en un incremento en los volúmenes de tránsito en los bordes de la zona de congestión como resultado de la restricción

económica dentro de la zona. Usuarios que cruzaban la zona para acceder a un destino que no se encuentra dentro de la zona ahora deben usar las vías aledañas para evadir la tarifa, generando congestión. Este efecto no se tuvo en cuenta en el análisis, ya que solo se consideraron los viajes dentro de la zona de tarificación vial; sin embargo, se resalta su importancia para futuros estudios.

- Cabe señalar que el esquema de tarificación vial es parte de un paquete de herramientas para mejorar la movilidad de las ciudades y no es una solución única ni excluyente. Sistemas de transporte público y no motorizado tales como bicicletas compartidas deben complementar estos esquemas para ofrecer a los usuarios opciones de transporte y facilitar la aceptación política.

Como resultado se obtiene que la tarifa por congestión óptima por kilómetro estimada oscila entre US\$0,24 y US\$0,42 (la menor se obtiene en Santiago y la más elevada en Ciudad de México), con la que se lograría una reducción de la congestión relativamente similar en las tres ciudades (25% en Santiago, 28,3% en Bogotá y 28,8% en Ciudad de México). La ciudad donde más aumentaría la velocidad promedio es Ciudad de México (8,4 km/h), seguida de Bogotá (6,5 km/h) y por último de Santiago (4,7 km/h). Esta mejora en las velocidades de circulación generaría reducciones en los tiempos promedio de viaje de entre 2 y 10 minutos, dándose la mayor reducción en Ciudad de México. En términos de beneficio económico y recaudación, nuevamente Ciudad de México obtendría mayores beneficios, mientras que, de las tres ciudades, la zona de congestión de Bogotá —al ser la más pequeña en extensión y presentar menor número de viajes y kilómetros recorridos— generaría la menor recaudación y el menor beneficio económico.

Con el fin de dimensionar la magnitud de la tarifa óptima estimada, se realizan dos análisis comparativos. El primero muestra que, para alcanzar una tarifa diaria similar a la estimada, el costo de estacionamiento tendría que aumentar más del doble (entre 121% y 793%), mientras que el

costo de combustible aumentaría entre 42% y 162%. Asimismo, la estimación de la recaudación de la tarificación por congestión equivale a 16%–97% de los ingresos fiscales por concepto de impuesto de vehículos, y alcanzaría a financiar entre 3 km y 53 km de infraestructura de transporte masivo en las ciudades estudiadas.

2.1 Metodología general

La metodología planteada se basa en la aplicación propuesta por Prud'homme y Bocarejo (2005), que emplea la teoría de internalización del costo de congestión (gráfico 1). Primero, se propone establecer una relación entre el costo de uso del automóvil y la cantidad de kilómetros recorridos en cada ciudad establecida siguiendo los modelos sugeridos por la literatura (sección 2.2). Para la estimación se construyeron bases de datos a partir de las encuestas de movilidad más recientes de las tres ciudades,¹ que incluyen variables ligadas a las características de los hogares y los viajes con los kilómetros recorridos en automóvil.² La elasticidad calculada con estos modelos se emplea como insumo para el modelo de determinación de la tarifa por congestión estimado en el tercer paso de esta metodología, teniendo en cuenta que para simplificar se supone que la curva de demanda del uso del automóvil es lineal.³

Segundo, se exploran diversas opciones de zona de congestión a partir de estudios previos, y se analizan viajes en automóvil generados y atraídos en las diferentes zonas, y por último datos sobre velocidades de circulación.

Tercero, se establecen ecuaciones de costo individual $I(q)$ y social $S(q)$ —explicadas en detalle

¹ Bogotá, en 2011; Ciudad de México, en 2007, y Santiago, en 2012.

² Cabe destacar que se utilizaron las encuestas y los datos disponibles al momento de elaboración de los cálculos y que algunos se actualizaron posteriormente, lo cual introduce un cierto grado de incertidumbre sobre los cálculos. Sin embargo, no parece haber un cambio de tendencia en la congestión en estas ciudades. Por el contrario, la congestión se sigue presentando en igual o mayor medida.

³ En el caso de demanda lineal se tiene que $Elasticidad = -pendiente * precio / demanda$.

GRÁFICO 1. Metodología general

Modelo explicativo de uso del automóvil
<ul style="list-style-type: none"> • Variables relevantes • Elasticidad al costo de uso
Definición de zona de cobro por congestión
<ul style="list-style-type: none"> • Variables relevantes • Velocidad promedio • Kilómetros recorridos
Modelo de tarifa óptima
<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo de tarifa óptima • Reducción del uso del automóvil • Cálculo de modificación de velocidad • Estimación de beneficios económicos • Estimación de ingresos por cobro de peaje

Fuente: Elaboración propia sobre la base de Prud'homme y Bocarejo (2005).

en la sección 2.4 y en el anexo 3—, que están relacionadas con los kilómetros recorridos en la zona y en consecuencia con el grado de congestión. Siguiendo la teoría de Pigou, se calcula una tarifa óptima para el área de estudio, estimada para un período aproximado de 12 horas al día y una única tarifa. Con mayor conocimiento de las condiciones a lo largo del día, es posible evaluar tarifas diferenciales para diferentes períodos. Este análisis permite estimar el costo económico de la congestión y la posible recaudación que generaría este cobro en cada ciudad.

Dado que las encuestas de movilidad disponibles para este estudio fueron elaboradas en diferentes años, fue necesario proyectar, en el caso de Bogotá y Ciudad de México, las variables de movilidad y sus costos asociados al año 2012. Esta proyección se hizo con base en el crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB) del país.

2.2 Modelación del impacto del costo en el uso del automóvil

Para modelar el uso del automóvil, se realizó una revisión de la literatura enfocada en los factores que explican este comportamiento y los modelos empleados para estimar la elasticidad de la demanda del uso de este modo frente al costo monetario de transportarse en él, es decir, la variación porcentual de la cantidad demandada con relación a la variación porcentual del costo monetario, elemento central para poder plantear un esquema de tarificación por congestión.

De acuerdo con la literatura revisada se identificó que los factores que explican la demanda (uso) del automóvil pueden dividirse en tres categorías de atributos: i) socioeconómicos y demográficos; ii) patrones espaciales y de desarrollo urbano, y iii) culturales y actitudinales (Buehler, 2010). En estas categorías se destacan los atributos presentados en el cuadro 8.

CUADRO 8. Factores que explican el uso del automóvil

Socioeconómicos y demográficos	Patrones espaciales de desarrollo y forma urbana	Culturales y actitudinales
Ingreso	Densidad (poblacional y de empleos)	Asociados a percepciones
Nivel educativo	Uso mixto del suelo	Preferencias personales
Propiedad del automóvil	Oferta/acceso a transporte público	
Tamaño y composición del hogar	Localización de actividades	
Poseción y número de licencias de conducir en el hogar		
Costos monetarios de viaje		

Fuente: Elaboración propia sobre la base de Buehler (2010), Ortuzar y Willumsen (2011), y Forsman y Engstrom (2005).

Los modelos sobre el uso del automóvil e incluso sobre la propiedad vehicular han sido desarrollados y aplicados por economistas y planificadores de transporte para elaborar diversos análisis de planificación y de políticas. Entre estas aplicaciones se destacan los impactos en la propiedad y/o uso del automóvil afectados por: i) políticas de regulación de la eficiencia de combustibles y de tecnologías vehiculares; ii) políticas de precios del combustible; iii) impuestos por emisión de contaminantes basados en distancias recorridas, y iv) proyecciones de demanda y análisis de congestión de tránsito, entre otros (McMullen *et al.*, 2008).

Para determinar la elasticidad de la demanda de transporte frente a los atributos particulares y a los intereses perseguidos con los análisis, se reportan en la literatura diversas aproximaciones. Estas incluyen variaciones significativas en términos de agregación espacial (país, estado, ciudad, municipio), unidades de análisis (hogar o individuo), información requerida y complejidad para la estimación de los modelos (McMullen *et al.*, 2008) (Dong *et al.*, 2012).

En particular, el uso del automóvil ha sido analizado considerando como variables explicativas los kilómetros recorridos o el número de viajes realizados, en función de los factores expuestos en el cuadro 8 y, para el caso particular de los modelos de elección discreta, de los atributos de los modos de transporte disponibles. En el cuadro 9 se presentan los modelos usualmente empleados.⁴ Cabe destacar que el modelo de elección discreta se emplea generalmente en el marco de la planificación y el análisis tradicional de transporte; sin embargo, este tipo de modelos requiere un diseño específico de instrumento de toma de información (encuesta), o en el caso de contar con información secundaria, es preciso construir para cada uno de los individuos considerados el conjunto de opciones disponibles y caracterizar los viajes analizados en cada una de estas alternativas.

Por otra parte, el modelo de Poisson es una herramienta que sirve para determinar la elasticidad de la demanda del uso del automóvil en términos del número de viajes realizados. Sin embargo, algunos estudios mencionan como principal dificultad para su aplicación en el contexto de generación

de viajes el cumplimiento del supuesto de varianza igual a la media (Jang, 2005). Asimismo, no se considera adecuado estimar este tipo de modelos para este estudio dado que, tal y como se describe en el anexo 3, las curvas de demanda, costo social y costo individual requeridas para determinar la tarifa por congestión expresan el uso del automóvil en términos de kilómetros recorridos.

Por último, el modelo de demanda directa ofrece una aproximación más sencilla para caracterizar la actividad de viajes en vehículo privado, puede estimarse a partir de la información de las encuestas de movilidad y sus resultados pueden interpretarse fácilmente.

La estimación de estos modelos requirió la construcción de bases de datos agregadas a nivel de hogar a partir de las encuestas Origen-Destino de las ciudades analizadas. Las encuestas son bastante similares por lo que las bases de datos construidas contenían las mismas variables, entre las que destacan: número de miembros del hogar según rangos de edad y ocupación; ingreso mensual del hogar; número de automóviles del hogar; distancia y tiempo de viaje en automóvil; número de viajes en automóvil; costo de estacionamiento, y consumo y costo de combustible.

Las estadísticas descriptivas de las variables empleadas se presentan en el anexo 1. Cabe señalar que las bases de datos construidas contemplaron únicamente los hogares que declararon en las encuestas tener vehículo particular y, del módulo de descripción de viajes, los reportados para días entre semana en temporada laboral, agregados a nivel de hogar. Para el cálculo y construcción de las variables descritas que se emplearon para los modelos se consideraron los supuestos y los datos adicionales a la encuesta de movilidad más reciente de cada ciudad estudiada, presentados en el cuadro 10.

Con base en los modelos señalados, las limitaciones o requerimientos asociados a cada uno y la información sobre los viajes y la caracterización de los hogares disponibles en las encuestas Origen-Destino,

⁴ El detalle de los modelos reseñados figura en los estudios referenciados.

CUADRO 9. Descripción de modelos para la determinación de la elasticidad precio-demanda del uso del automóvil

	Modelo de demanda directa	Regresión de Poisson	Modelo de elección discreta
Descripción	Viajes como una función multiplicativa de los atributos del viaje y del hogar.	Modela el número de eventos como una variable aleatoria discreta con distribución Poisson y una probabilidad de ocurrencia.	Determina la probabilidad de que un individuo q emplee un modo de transporte j a partir de la comparación de las utilidades entre los modos disponibles.
Forma funcional	$M = \theta \prod_i P_i^{\beta_i}$ <p>Forma linealizada</p> $\text{Log } M = \beta_o + \sum_i \beta_i * \log P_i$ <p>donde P_i son variables explicativas</p>	$f(Y = y_i X_i) = \frac{\mu(X_i)^{y_i} * e^{-\mu(X_i)}}{y_i!}$ <p>$f(Y)$ probabilidad de ocurrencia del evento Y</p> <p>μ tasa de ocurrencia esperada del evento modelado en un periodo determinado</p> $E(y_i X_i) = \mu = e^{\beta X_i}$ <p>donde X_i son variables explicativas</p>	$P_{jq} = \frac{\exp(\sum_k \theta_{jk} X_{jkq})}{\sum_i \exp(\sum_k \theta_{ik} X_{ikq})}$ <p>Donde:</p> <p>$A(q) = \{A_1, A_2, \dots, A_{nq}\}$ Conjunto de alternativas para el individuo q</p> <p>x Atributos de las alternativas y del individuo</p> $U_{jq} = V_{jq} + \varepsilon_{jq} = \sum_k \theta_{jk} X_{jkq} + \varepsilon_{jq} = a$ <p>Utilidad de la alternativa j para individuo q</p> <p>ε_{jq} componente aleatorio con distribución de probabilidad Gumbel</p>
Variable dependiente	Kilómetros recorridos en automóvil por hogar o número de viajes en automóvil por hogar.	Número de viajes en automóvil por hogar en un día.	Probabilidad de que un individuo q emplee un modo de transporte j .
Elasticidad	β_i elasticidad asociada a la variable P_i	β en el caso en que la variable a la que esté asociada esté expresada en logaritmos	$E_{P_{jq}, X_{jkq}} = \theta_{jk} X_{jkq} (1 - P_{jq})$ <p>Cambio porcentual en la probabilidad de escoger la opción A_i respecto al cambio marginal en el atributo X_{jkq}</p>
Necesidades de información	Información de viajes en automóvil por hogar, incluidos los costos de operación.	Información de viajes en automóvil por hogar, incluidos los costos de operación.	Identificar para cada individuo/hogar las opciones disponibles independientes (modos de transporte). Para cada individuo/hogar determinar las características del viaje para todas y cada una de las alternativas disponibles.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de McMullen et al. (2008), Ortuzar y Willumsen (2011), y Dong et al. (2012).

se optó por estimar modelos de demanda directa que relacionan el costo por kilómetro —operación del vehículo, estacionamiento y tiempo de viaje— con la distancia de viajes en automóvil, las características de la movilidad en este modo y las características del hogar (ecuación [1]). Para la estimación de tales modelos se consideraron únicamente aquellos hogares que reportaron tener automóvil propio y que realizaron viajes en este modo. En todos los casos se consideraron las encuestas en las que se reportaban los viajes en días hábiles de temporada normal.

Ecuación (1)

$$\log(\text{distancia}_{\text{viaje}}) = \gamma * \text{Log}(\text{costo}_{\text{km}}) + \sum_{i=1}^n X_i * \beta_i$$

En el cuadro 11 se presentan los coeficientes modelos estimados y seleccionados para cada una de las ciudades. Es importante mencionar que los modelos se estimaron con el objeto de determinar la elasticidad precio-demanda en cada una de las ciudades y no de pronosticar la demanda del uso del automóvil en ellas.

CUADRO 10. Supuestos y datos adicionales empleados en los modelos de uso del automóvil

Ítem	Bogotá	Ciudad de México	Santiago
Eficiencia energética promedio del parque automotor (litros/km) ^a	0,11	0,10	0,08
Costo de combustible (US\$/litro)	1,11 ^b	0,6 ^c	1,52 ^d
Costo total de combustible (US\$/día)	Según la distancia recorrida calculada, la eficiencia energética promedio del parque automotor y el costo de combustible, se calculó el costo diario del combustible del hogar para movilizarse en automóvil.		
Km recorridos en vehículo (km/día)	Estimación de la distancia a partir de las distancias entre los centroides de las zonas incluidas en los <i>shapefiles</i> asociados a las encuestas de movilidad.		
Vehículos del hogar	Vehículos propios declarados por el hogar en las encuestas de movilidad.		
Costos de variables de operación del automóvil (US\$/día)	Se asumió que el costo del combustible representaba 56% del costo total variable de operación del automóvil. Este porcentaje se tomó del estudio de diseño de peaje por congestión de Bogotá D.C. (Unión Temporal SDG-PHR-AKIRIS, 2014).		
Costo estacionamiento (US\$/día)	Estimación a partir de los datos de las encuestas de movilidad, transformando los costos reportados en costo diario.		
Ingreso del hogar (US\$/mes)	Ingreso reportado por el hogar en la encuesta de movilidad.		
Valor del tiempo (US\$/min.)	Cálculo del valor del minuto considerando ingreso del hogar, número de trabajadores y jornada laboral diaria.		

Fuente: Elaboración propia sobre la base de encuestas de movilidad, Banco de Desarrollo de América Latina – CAF (2010), Unidad de Planeación Minero Energética (2015), Secretaría de Energía (s/f), Comisión Nacional de Energía (2015) y Unión Temporal SDG-PHR-AKIRIS (2014).

^a Banco de Desarrollo de América Latina – CAF (2010).

^b Unidad de Planeación Minero Energética (2015).

^c Secretaría de Energía (s/f).

^d Comisión Nacional de Energía (2015).

CUADRO 11. Modelos estimados de uso del automóvil

Variable	Bogotá	Santiago	Ciudad de México
Log_costo_km	-0,5819 (0,0000)	-0,769 (0,0000)	-0,525 (0,0000)
Número de viajes en automóvil	-0,1541 (0,0000)	-0,144 (0,0000)	-0,041 (0,0000)
Número de vehículos del hogar	0,165 (0,0000)		0,025 (0,0006)
Ingreso		2,75e-07 (0,0000)	
Número de trabajadores	-0,067 (0,001)		
Constante	5,83 (0,0000)	6,01 (0,0000)	1,08 (0,0000)
Observaciones	1.712	2.609	6.961
R2	0,33	0,30	0,19
F	125,72	374,2	356,43
Prob>F	0,0000	0,0000	0,0000

Fuente: Elaboración propia.

Nota: *P valores en paréntesis.

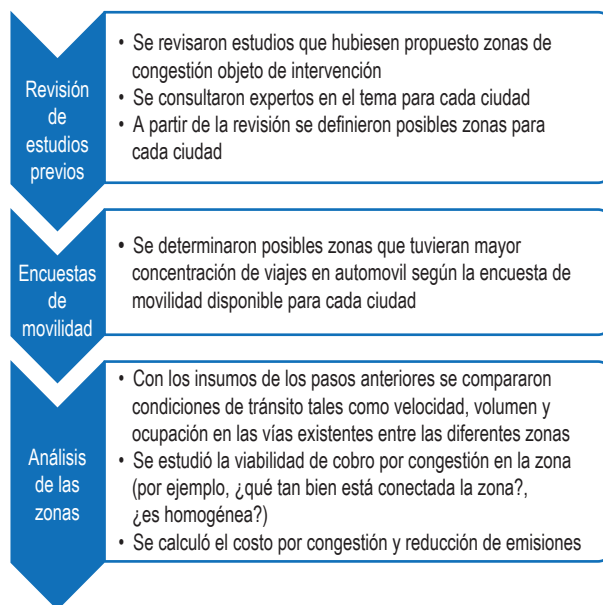
Los modelos estimados y seleccionados incluyen únicamente las variables estadísticamente significativas bajo la condición de que no existiera una alta correlación entre ellas para evitar problemas de multicolinealidad. Es importante resaltar que los modelos seleccionados incluyen en todos los casos el número de automóviles en el hogar y el número de viajes. En especial, se observa que el coeficiente de la variable “número de viajes en automóvil” tiene signo negativo, lo que posiblemente se deba a que los hogares hacen varios viajes, aunque cortos, al día. Por otra parte, el ingreso mensual del hogar no resultó estadísticamente significativo, o tenía problemas de multicolinealidad en los modelos de Bogotá y Ciudad de México; tampoco lo fue el número de trabajadores en el hogar para Santiago y Ciudad de México.

Con relación al parámetro de interés, la elasticidad precio-demanda, dada la forma funcional del modelo, está entonces dada por el coeficiente γ . Los resultados evidencian que los valores obtenidos oscilan entre $-0,769$ y $-0,525$. En el caso de Bogotá, el estudio de diseño de un peaje por congestión reporta una elasticidad de $-0,366$, la que según los propios autores resulta ser muy baja en comparación con la registrada en otras ciudades donde se ha implementado un esquema de tarificación pro congestión (Unión Temporal SDG-PHR-AKIRIS, 2014). En el caso de Santiago, se han estimado elasticidades de la demanda con relación a la tarifa y al combustible que oscilan entre $-0,47$ y $-0,44$; y $-0,503$ y $-0,068$, respectivamente (de Grange, González y Troncoso, 2015).

2.3 Área de aplicación del esquema de tarificación por congestión

Esta sección describe el proceso que se llevó a cabo para escoger una alternativa de diseño del sistema de cobro por congestión para Bogotá, Ciudad de México y Santiago de Chile. Asimismo, presenta una evaluación detallada de la zona en términos de las características de los viajes en vehículo particular.

GRÁFICO 2. Metodología para la definición de la zona de congestión



Fuente: Elaboración propia.

El objetivo principal del cobro por congestión en las diferentes ciudades es la reducción de la congestión en algunos sectores de la ciudad. Se busca internalizar las externalidades que genera el uso desmedido del automóvil (tiempos de viaje elevados para todos los usuarios del sistema, incremento en emisiones de gases efecto invernadero y contaminantes que afectan la calidad del aire, pérdidas económicas por congestión, accidentalidad, etc.). Teniendo en cuenta lo anterior, para la definición de la zona de aplicación de la tarifa por congestión en las diferentes ciudades se siguió la metodología que figura en el gráfico 2.

Los estudios para la revisión bibliográfica fueron seleccionados según su relevancia respecto del tema de tarificación por congestión y su validez técnica. De la bibliografía consultada se tuvieron en cuenta los siguientes estudios:

Bogotá

- “Elaborar los estudios, diseños y estructuración técnica, financiera y legal del proyecto cobros

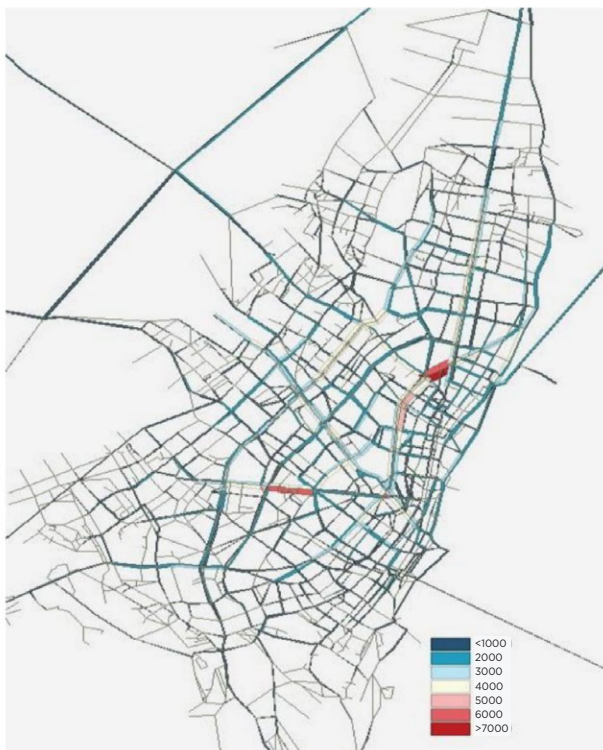
por congestión para la ciudad de Bogotá D.C.". 2014. Entrega final. Preparado por la unión temporal Steer Davies Gleave, Akiris y Posse Herrera Ruiz.

- "Cobros de congestión en ciudades colombianas". 2013. University College London y Universidad de los Andes.

Ciudad de México

- "Congestion Pricing in Cities of the Developing World: Exploring Prospects in Mexico City." 2004. Presentado al MIT Department of Urban Studies and Planning Anjali Mahendra (Massachusetts Institute of Technology).
- "Estimation of Transport Related Demand Elasticities in Mexico City. An Application to Road User Charging." 2009. Tesis doctoral de Amado Crotte, Imperial College London.

MAPA 1. Cargas de vehículos privados en la red vial en hora pico de la mañana – Bogotá



Fuente: Steer Davies Gleave (2012a).

Santiago de Chile

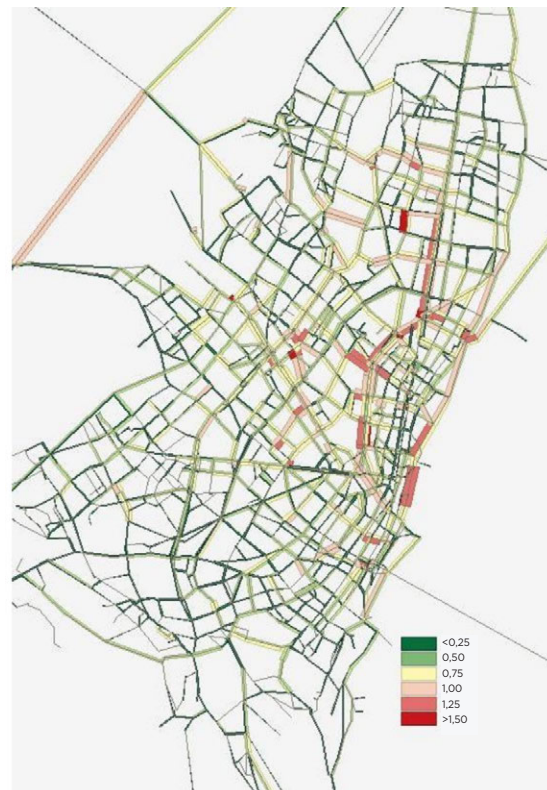
- "Tarificación vial por congestión para la ciudad de Santiago". 2009. Informe final. Steer Davies Gleave.

2.3.1 Bogotá

Teniendo en cuenta las cargas de vehículo privado en la red vial en hora pico de la mañana se destacan los altos volúmenes en la zona noreste de la ciudad: más de 5.000 vehículos transitan por las calles de esta zona durante ese período (mapa 1). Con respecto a otras calles, el volumen de vehículos privados es relativamente bajo (alrededor de 3.000).

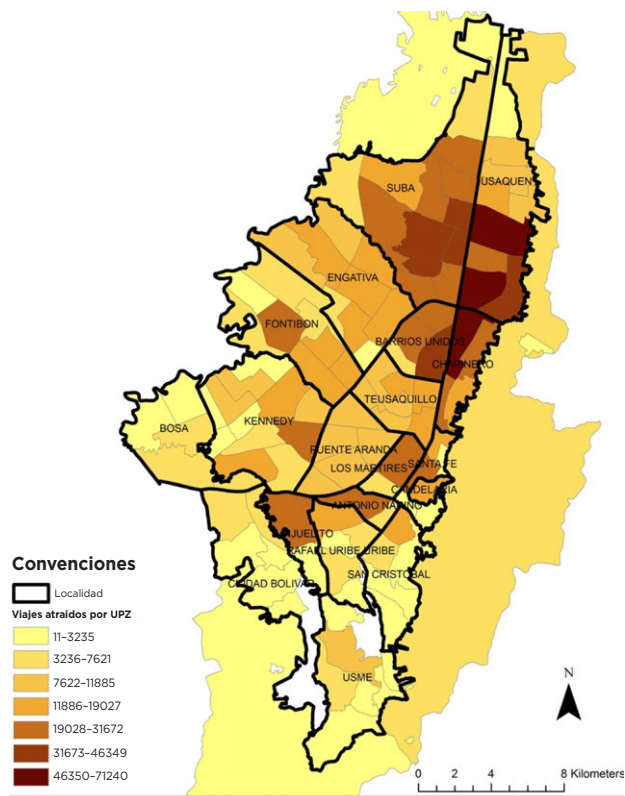
Es interesante observar que en esta zona se presentan diversos problemas de congestión debido a que el volumen típico para la hora pico de

MAPA 2. Relación volumen-capacidad para la red vial en hora pico de la mañana – Bogotá



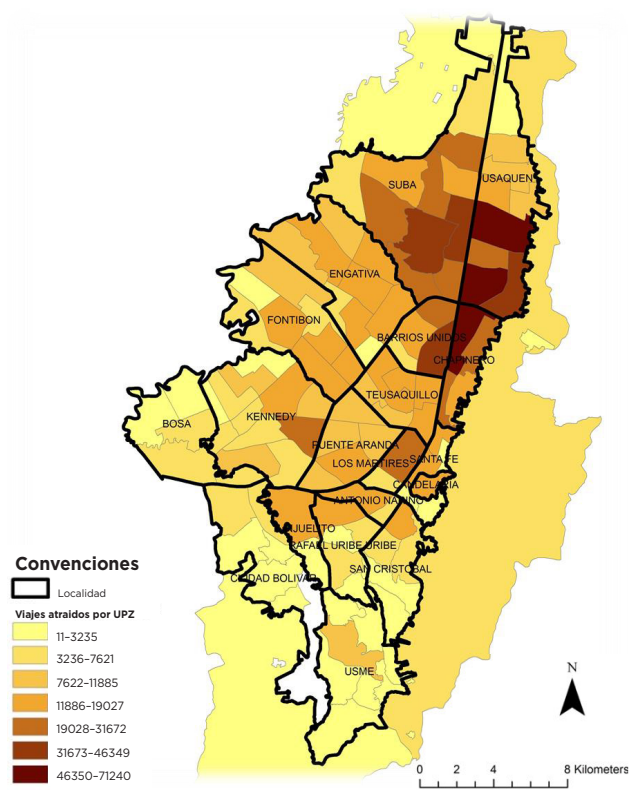
Fuente: Steer Davies Gleave (2012a).

MAPA 3. Principales destinos de viaje en vehículo privado – Bogotá



Fuente: Steer Davies Gleave (2012a).

MAPA 4. Principales orígenes de viaje en vehículo privado – Bogotá



Fuente: Steer Davies Gleave (2012a).

la mañana excede la capacidad de la vía (mapa 2). Estos problemas se concentran en la Carrera 30, Carrera Séptima y Autopista Norte. Existen otras vías con problemas de congestión; sin embargo, no presentan una oportunidad para la implementación de un esquema de tarificación vial ya que no son focos importantes de atracción y generación de viajes, como se observará más adelante.

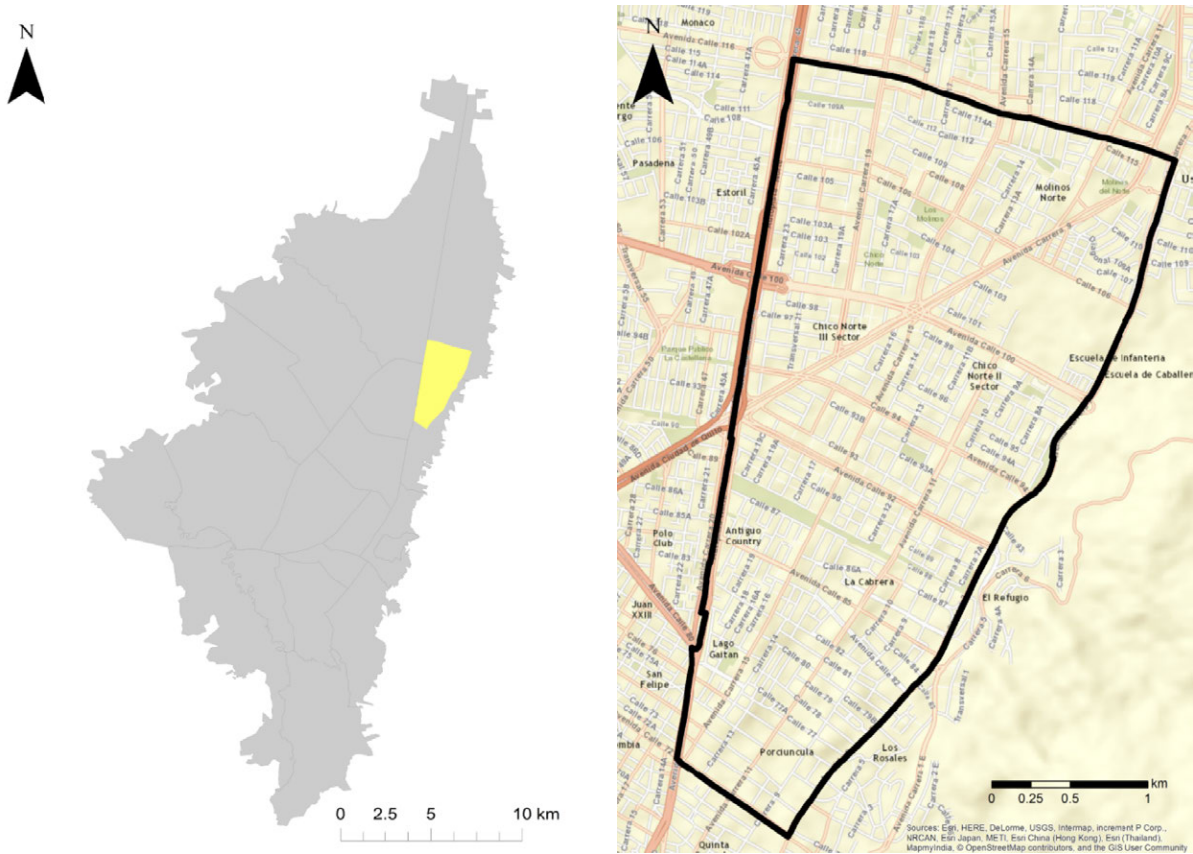
Los mapas 3 y 4 muestran el total de viajes generados y atraídos en vehículo privado entre las diferentes zonas de transporte de la ciudad. Nuevamente resaltan la zona del noreste de la ciudad, donde se atraen y originan alrededor de más de 30.000 viajes en vehículo privado por día.

A partir de esta información proveniente de diversas fuentes (Steer Davies Gleave 2009 y 2012) y de las encuestas realizadas a actores clave se definió una zona de tarificación por congestión de 8,7

km² para la ciudad de Bogotá. La zona está ubicada en el norte de la ciudad y está delimitada al norte con la calle 116, al sur con la calle 72, al este con la Carrera Séptima y al oeste con la Autopista Norte (mapa 5). Cabe señalar que la zona de tarificación por congestión propuesta contiene algunas de las zonas de transporte con mayor afluencia de viajes a lo largo del día, tanto atraídos como generados. La unión temporal SDG-PHR-Akiris (2014) encontró que la participación del vehículo privado en la zona propuesta es mayor que la participación del vehículo privado en el resto de los viajes de la ciudad.

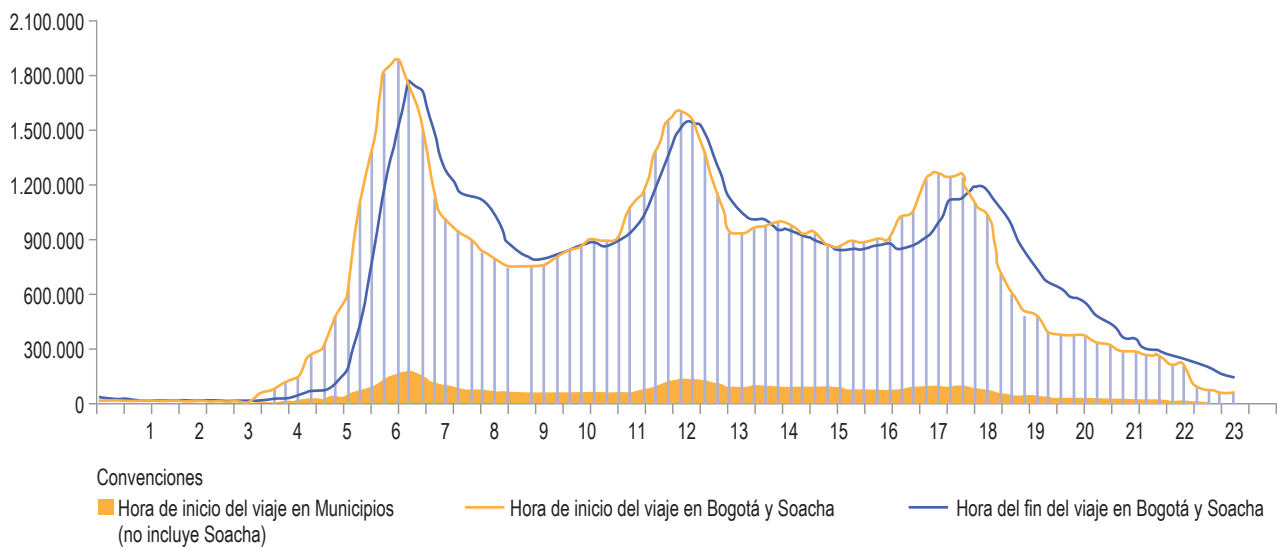
A partir de la encuesta de movilidad de 2011 se observa que la distribución de viajes en la ciudad tiene tres picos principales: la mañana, el mediodía y la tarde (gráfico 3). Con base en esta información, la consultoría propone que la tarificación por

MAPA 5. Ubicación de la zona de tarificación por congestión – Bogotá



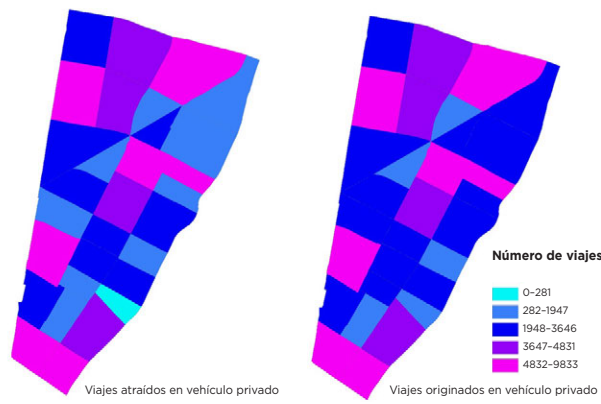
Fuente: Elaboración propia a partir de OpenStreetMap.

GRÁFICO 3. Distribución total de viajes – Bogotá y Soacha (valores por hora)



Fuente: Steer Davies Gleave (2012a).

GRÁFICO 4. Viajes en vehículo privado en la zona de tarificación por congestión – Bogotá

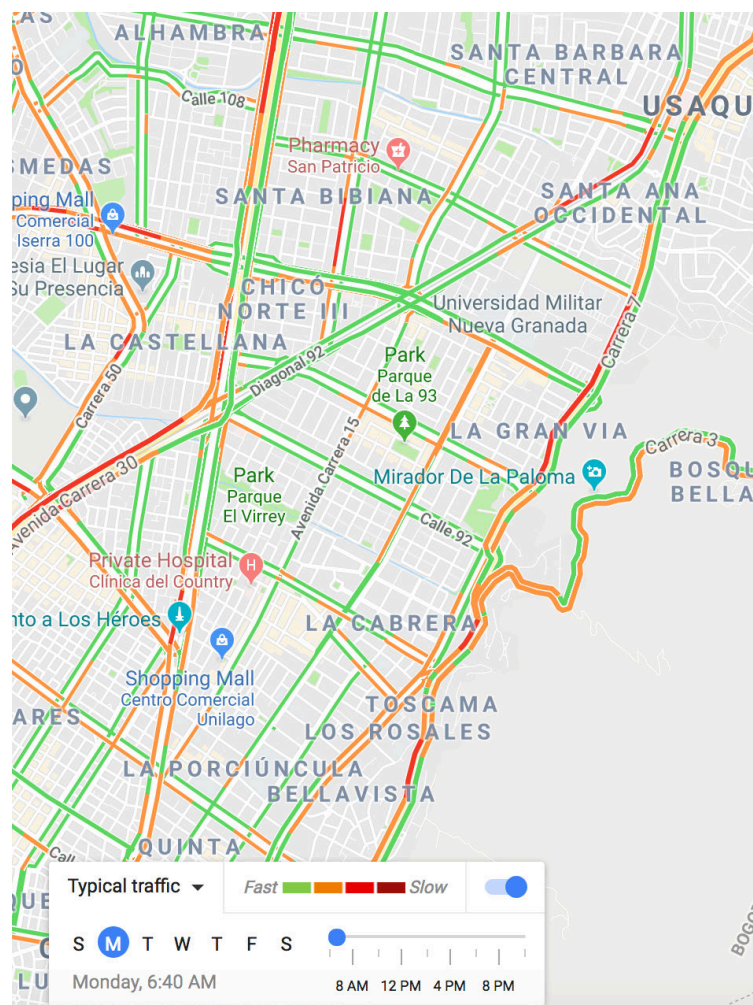


Fuente: Steer Davies Gleave (2012).

congestión funcione al inicio de la hora pico de la mañana y finalice al término de la hora pico de la tarde —es decir, de 6:00 a 19:00— con el fin de tener un efecto sobre los tres picos a lo largo del día.

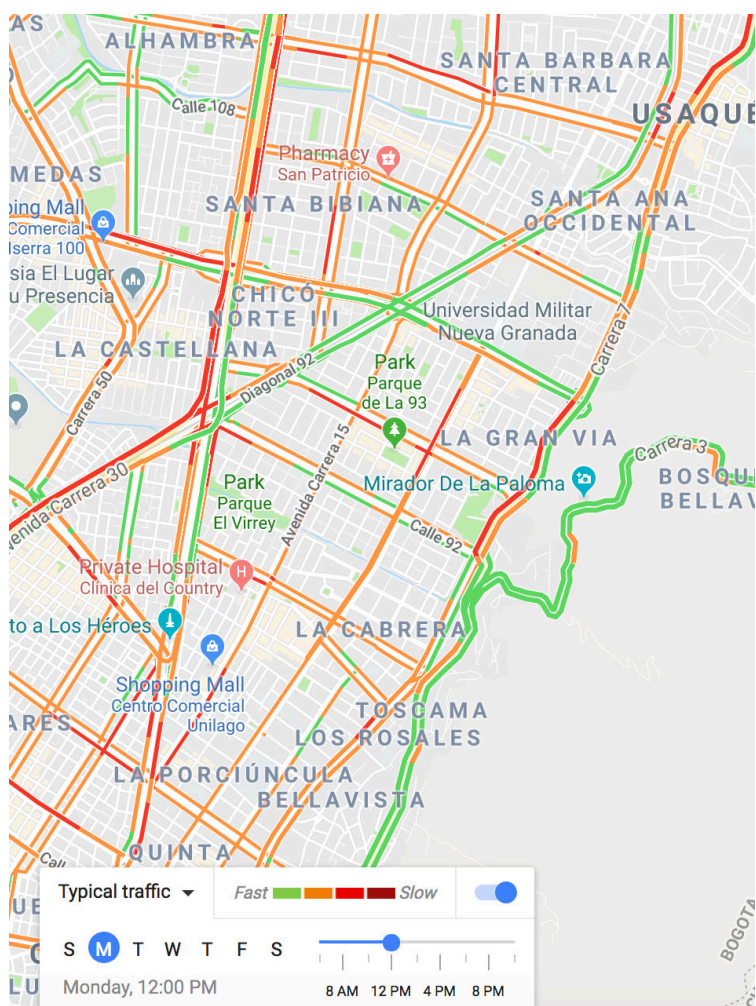
En este periodo de tiempo se registran 348.694 viajes (año 2011) en vehículo privado que entran, salen o circulan dentro de la zona (véase distribución de viajes entre origen y destino en el gráfico 4). En el 41% de los viajes en vehículo particular el usuario es pasajero y no conductor, hallazgo que coincide con la distribución y magnitud del total de viajes para esta zona hallados por la union temporal SDG-PHR-Akiris (2014). La ocupación promedio es de 1,7 personas por vehículo privado.

MAPA 6. Velocidades en zona de tarificación por congestión – Bogotá, 6:40



Fuente: Google (2018).

MAPA 7. Velocidades en zona de tarificación por congestión – Bogotá, 12:00



Fuente: Google (2018).

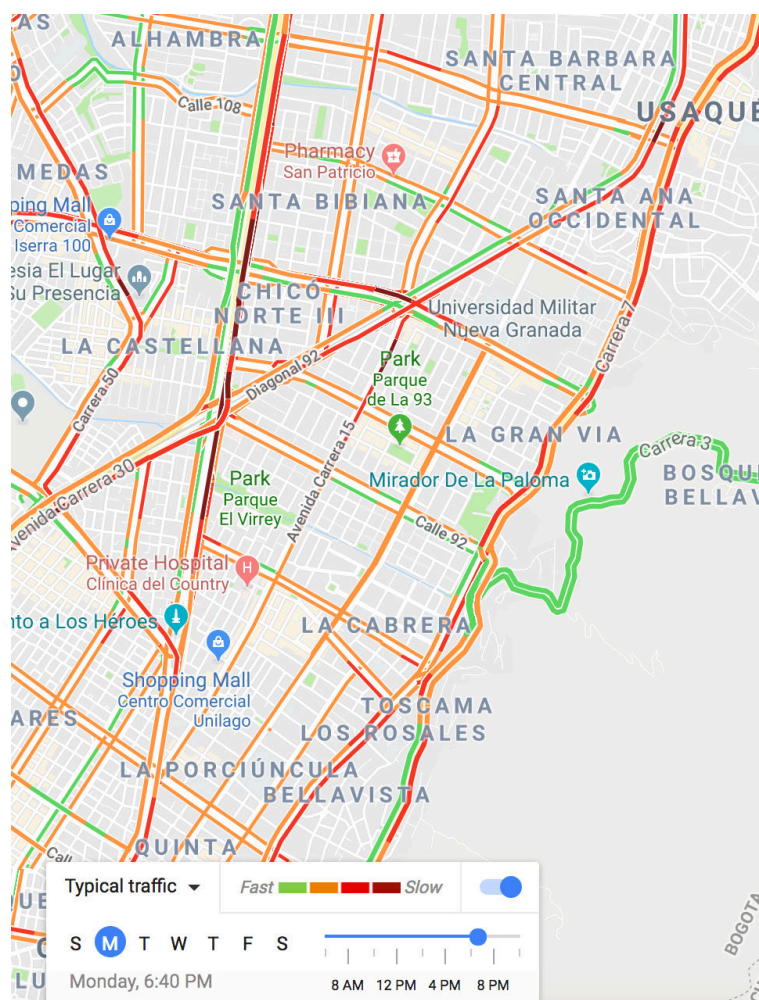
Si se consideran los viajes en vehículo particular en la zona (que salen, entran o circulan dentro de la zona), en total se recorren aproximadamente 616.343 km de 6:00 a 19:00, con una distancia de viaje promedio de 3 km.

La velocidad de la malla vial es otra medida que se considera en la definición de la zona y que se debe tener en cuenta en el futuro como indicador para medir la eficiencia de la tarificación por congestión en la zona. En los mapas 6, 7 y 8 puede observarse que el tránsito de Bogotá está clasificado como 'lento' (tiene una velocidad promedio de 20 km/h).

2.3.2 Ciudad de México

Para definir la zona de tarificación vial en la Ciudad de México se tuvieron en cuenta los análisis realizados en la encuesta de movilidad 2007 y estudios previos acerca de la tarificación vial para Ciudad de México. Estos documentos permitieron conocer la situación de la ciudad en términos de movilidad, identificando las zonas con conflictos y problemas de congestión. El mapa 9 muestra la incidencia de viajes en vehículo particular en los diferentes distritos de Ciudad de México y alrededores. Se observa una incidencia significativa en distritos que

MAPA 8. Velocidades en zona de tarificación por congestión – Bogotá, 18:40



Fuente: Google (2018).

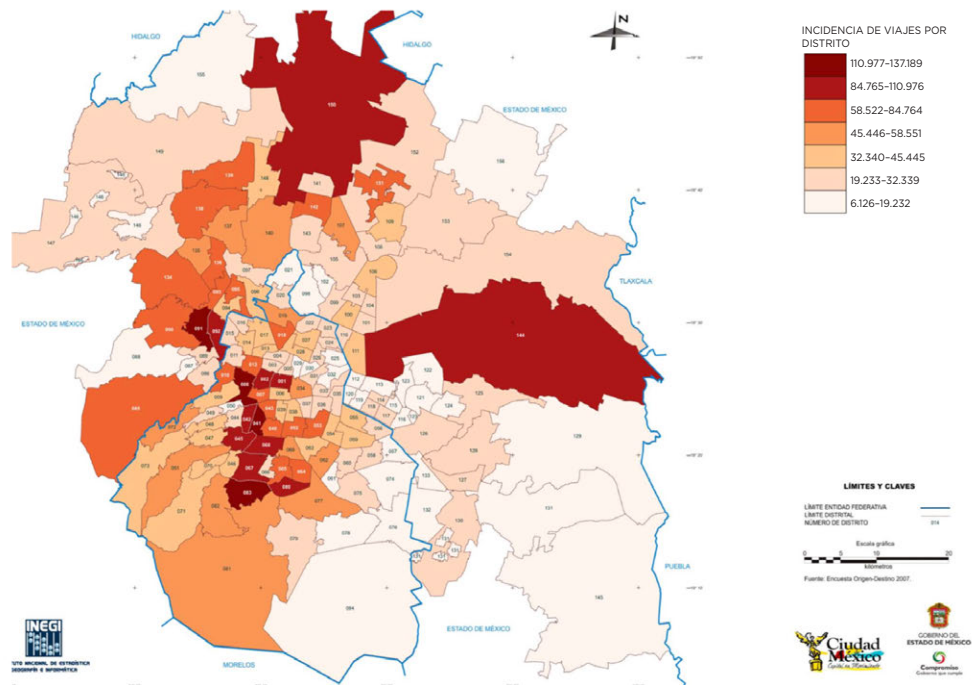
están dentro del área de Ciudad de México, donde destacan Benito Juárez, Cuauhtémoc y Miguel Hidalgo, con cerca de 100.000 viajes. Sobresalen también dos grandes zonas fuera de Ciudad de México: Zumpango y Texcoco. El primer distrito se caracteriza por actividades agropecuarias y el segundo por contar con diferentes instituciones educativas e industria pequeña, lo cual hace que la fuerza laboral se desplace diariamente a Ciudad de México.

En cuanto a los principales pares de distritos de origen y destino con más viajes en vehículo particular, las zonas dentro de Ciudad de México se

destacan por los altos flujos de viaje (mapa 10). Benito Juárez, Cuauhtémoc, Coyoacán, Tlalpan y Miguel Hidalgo representan flujos con volúmenes que oscilan entre 8.000 y 10.000 viajes por día.

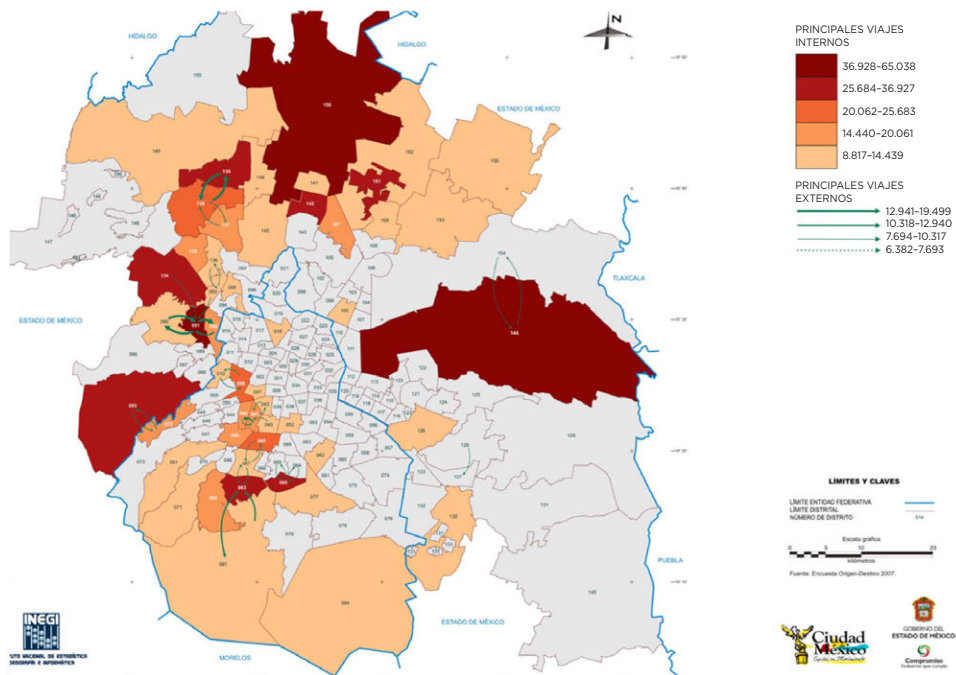
La zona de cobro propuesta para Ciudad de México —a partir de esta información y estudios previos (Mahendra, 2004)— se encuentra dentro del circuito interior compuesto por colonias como Condesa, Nápoles, Roma y Benito Juárez (mapa 11). La zona tiene un área de 27,02 km², limita al norte con la Avenida Ejército Nacional, la calle James Sullivan y el Puente de Alvarado; al sur con el Viaducto Presidente Miguel Alemán; al este con el

MAPA 9. Viajes de un solo tramo realizados en vehículo particular por distrito – Ciudad de México



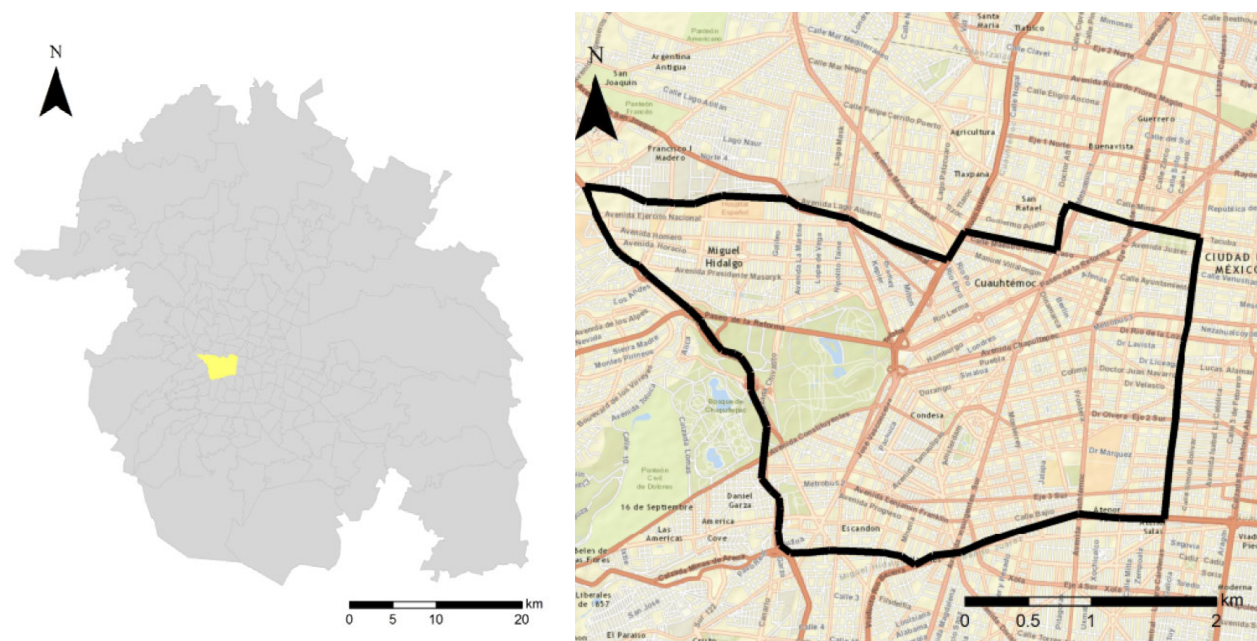
Fuente: INEGI (2007).

MAPA 10. Principales pares de distritos de origen y destino con más viajes de un solo tramo en vehículo particular – Ciudad de México



Fuente: INEGI (2007).

MAPA 11. Ubicación de la zona de tarificación por congestión – Ciudad de México



Fuente: Elaboración propia a partir de OpenStreetMap.

Eje Central Lázaro Cárdenas, y al oeste con el anillo periférico Adolfo Ruíz Cortines.

El mapa 12 muestra el total de viajes en vehículo privado generados y atraídos entre las diferentes zonas de la ciudad. Cabe señalar que la zona de tarificación por congestión propuesta contiene algunas de las zonas de transporte con mayor afluencia de viajes a lo largo del día.⁵ En particular, la zona atrae más de 80.000 viajes en vehículo privado por día.

A partir de la encuesta de movilidad de 2007 se puede observar que hay dos horas pico principales para los viajes en la ciudad: de 6:00 a 9:00 y de 18:00 a 19:00 (gráfico 5). A partir de esta información se propone que la tarificación por congestión funcione de 7:00 a 19:00. Este periodo incluye horas valle, ya que no existe una diferencia significativa con el número de viajes en horas pico de la mañana y la tarde (gráfico 5).

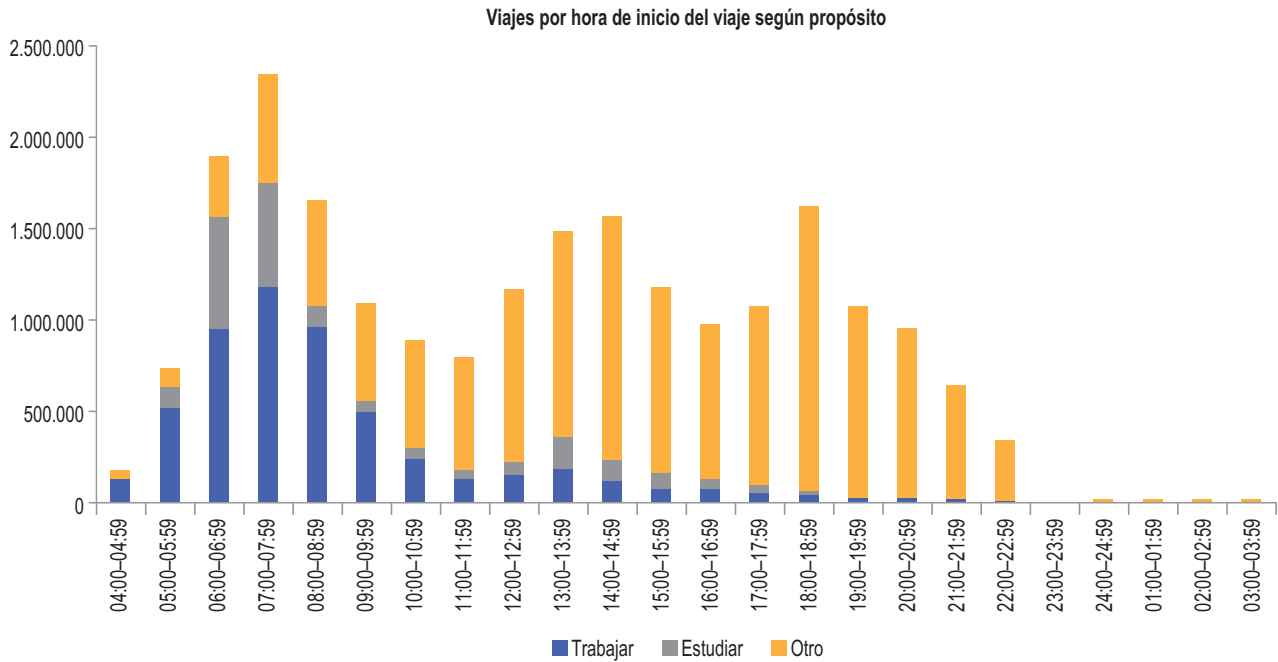
Durante el año de la encuesta (2007) en el periodo comprendido entre las 7:00 y las 19:00, se registraron 507.260 viajes en vehículo privado en la zona (considerando solo los viajes como

conductor) (mapa 13). La ocupación promedio es de 1,7 personas por vehículo privado. Tomando en cuenta los vehículos que transitan en la red de esta zona, en el periodo de análisis se recorren aproximadamente 2.028.017 km, con una distancia promedio de 4 km por viaje.

Actualmente, la velocidad promedio para la zona de tarificación por congestión propuesta es de 11 km/h, con una velocidad a flujo libre supuesta de 40 km/h. Es importante observar en los mapas 14, 15 y 16 que las zonas con menores velocidades (mayor congestión) se encuentran en las avenidas viaducto Miguel Alemán, Melchor Ocampo, el anillo periférico y algunos tramos del circuito interior.

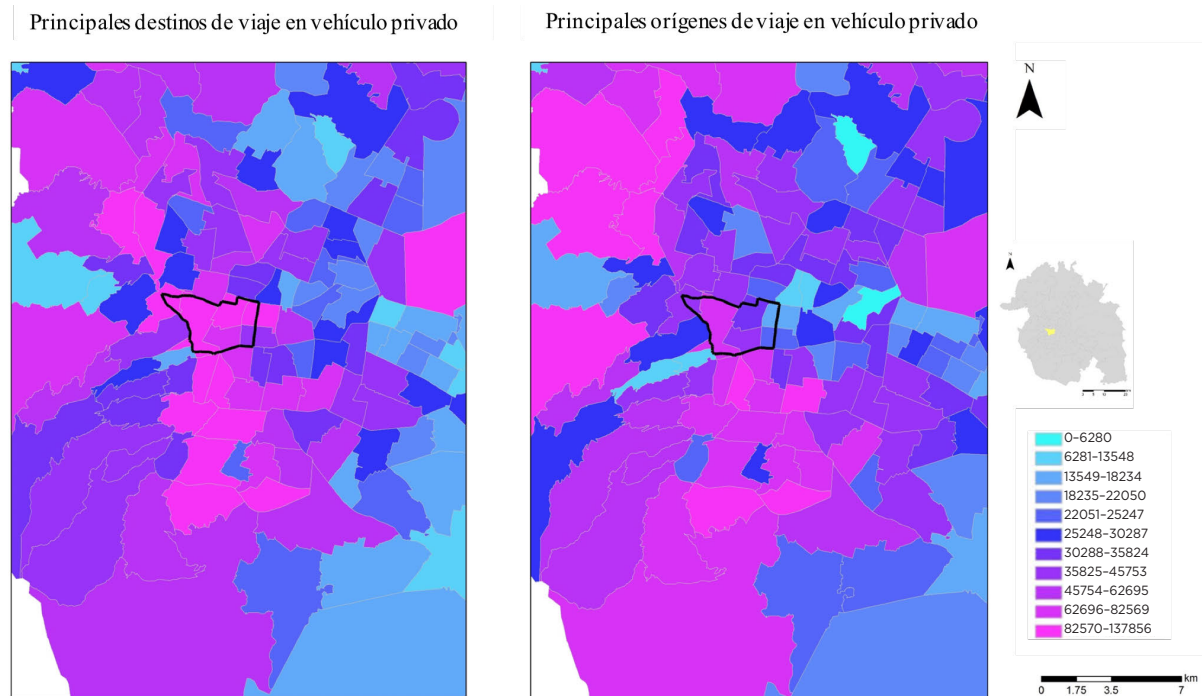
⁵ Distritos como Zumpango, Texcoco, Jaltenco y Nextaplan, que tienen una alta proporción de viajes en automóvil al día, se excluyeron de la zona de tarificación por dos razones: i) si se tuviesen en cuenta estos distritos, el área de tarificación no sería homogénea ya que los distritos están separados entre sí y no cuentan con límites comunes, dificultando la operación del sistema, y ii) estas zonas no cuentan con características urbanas que atraigan trabajadores desde otros distritos de manera significativa.

GRÁFICO 5. Distribución de viajes – Ciudad de México



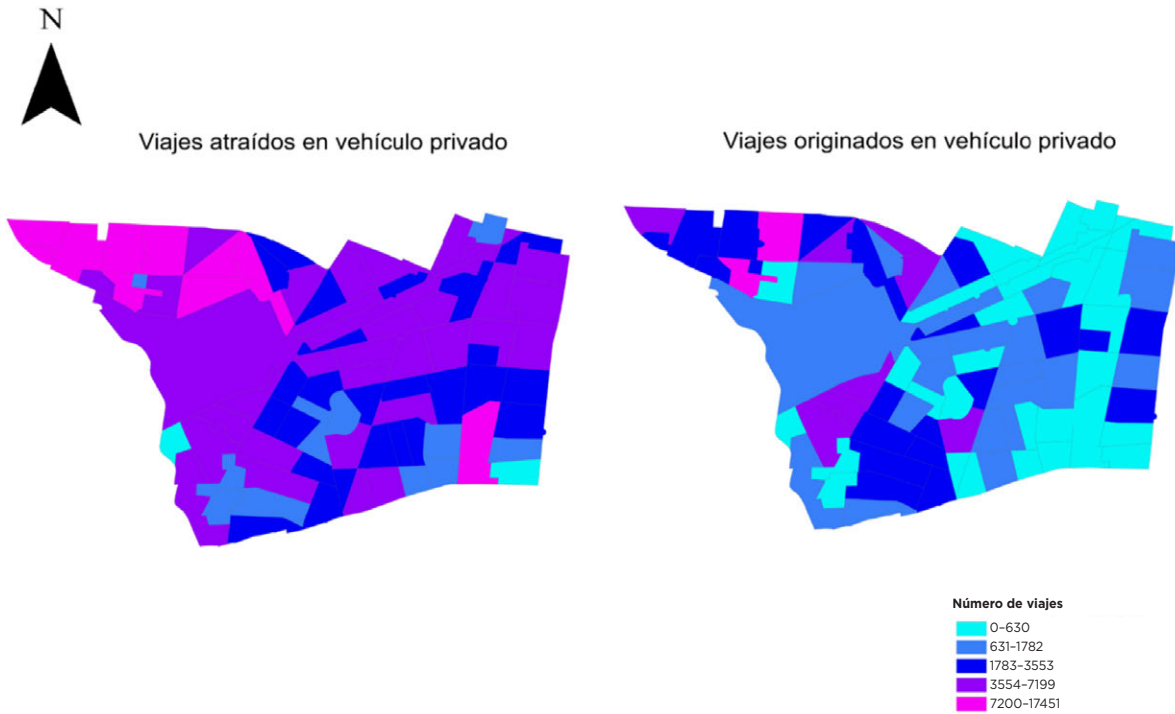
Fuente: INEGI (2007a).

MAPA 12. Viajes en vehículo privado – Ciudad de México



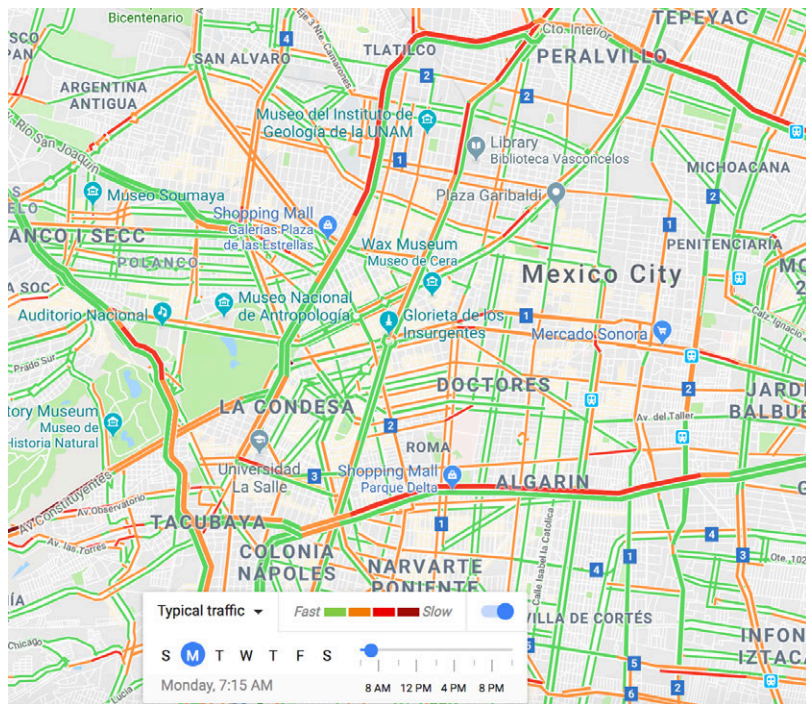
Fuente: Elaboración propia sobre la base de INEGI (2007).

MAPA 13. Viajes en vehículo privado en la zona de tarificación por congestión – Ciudad de México



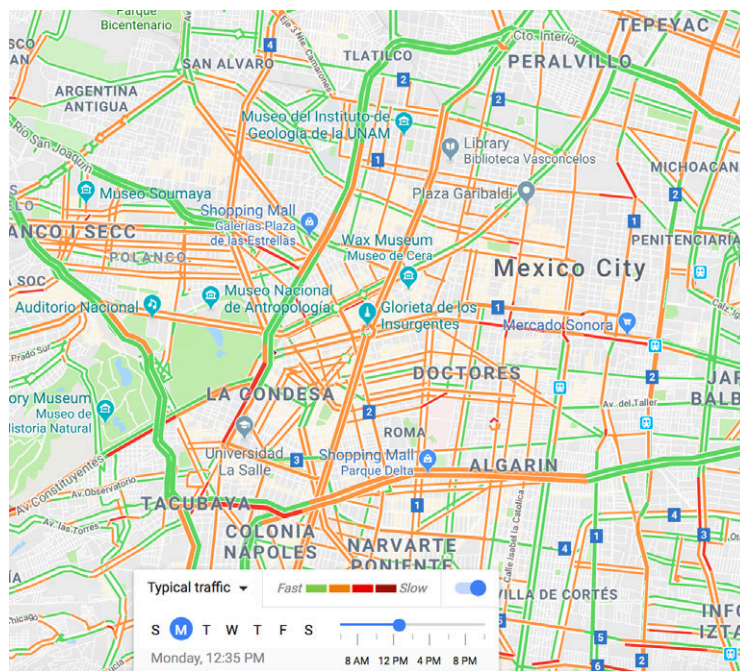
Fuente: Elaboración propia sobre la base de INEGI (2007).

MAPA 14. Velocidades en zona de tarificación por congestión – Ciudad de México, 7:15



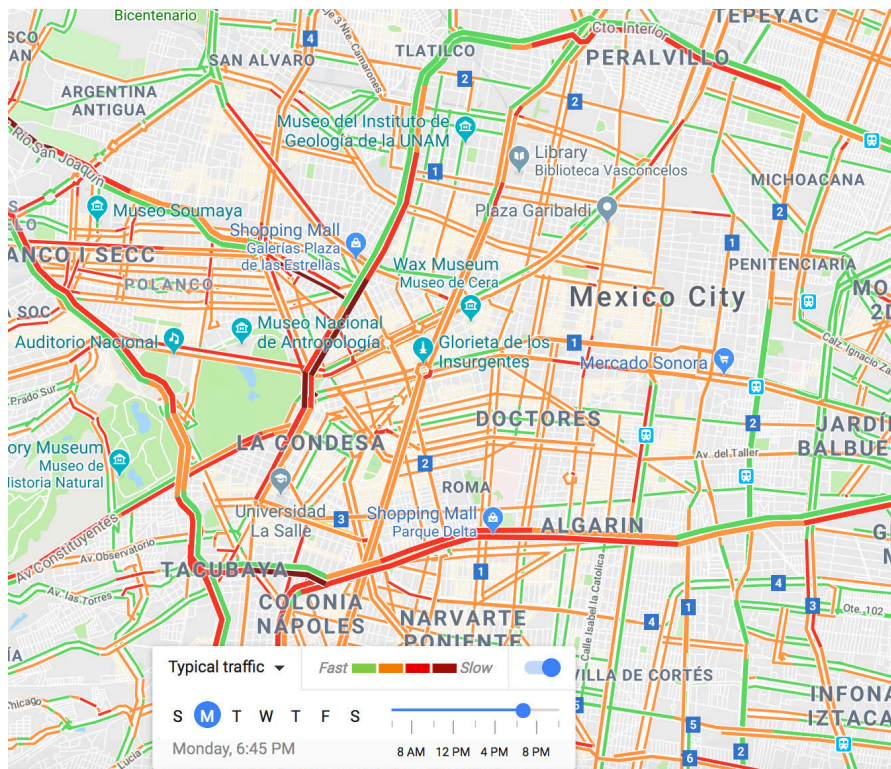
Fuente: Google (2018).

MAPA 15. Velocidades en zona de tarificación por congestión – Ciudad de México, 12:35



Fuente: Google (2018).

MAPA 16. Velocidades en zona de tarificación por congestión – Ciudad de México, 18:45



Fuente: Google (2018).

2.3.3 Santiago

Al igual que en el caso de las ciudades anteriores, para definir la zona de tarificación vial en Santiago de Chile primero se analizaron las condiciones actuales de la ciudad a partir de estudios previos y la encuesta de movilidad disponible, a fin de identificar la zona con mayor impacto y potencial para la implementación del esquema.

A partir del estudio de tarificación vial de Steer Davies Gleave (2009), se puede observar en el mapa 17 que los tramos de vías con mayores tiempos de viaje para los usuarios se encuentran concentrados en el centro de la ciudad, donde se atraen la mayor parte de los viajes.

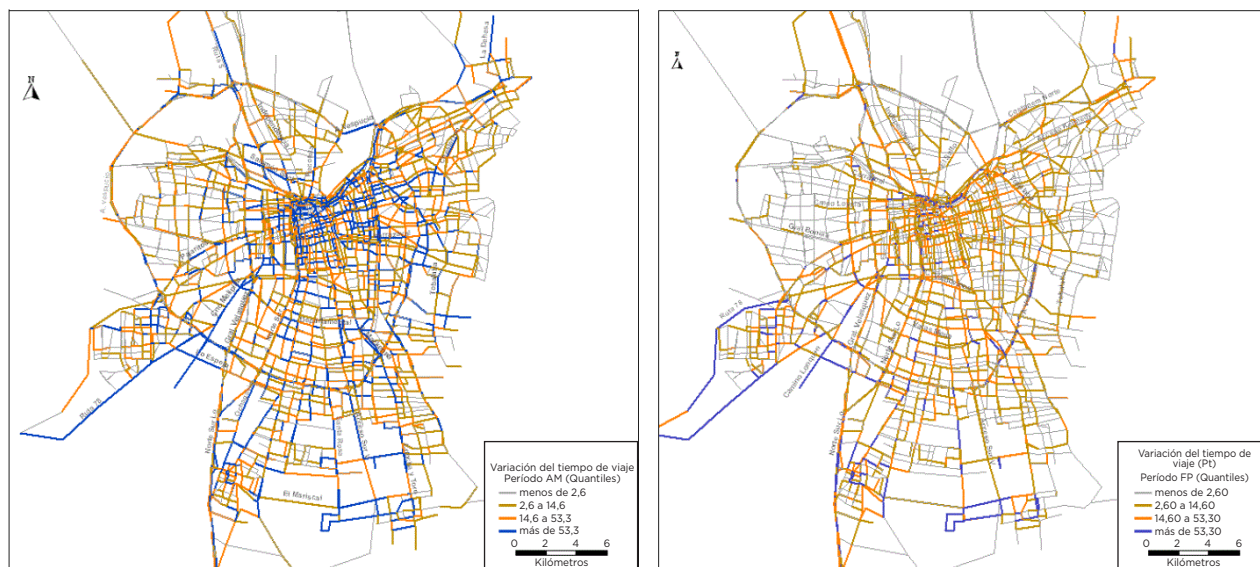
Se observa claramente que el porcentaje de vías con saturación mayor a 90% presenta una tendencia positiva en el año 2005 (año para el que se cuenta con esta información), y que concuerda con los tramos en los cuales los tiempos de viaje son mayores (mapa 18). Muchas de estas vías se encuentran ubicadas en el noreste de la ciudad, donde se concentran la mayor parte de las actividades económicas de la ciudad.

A partir de esta información se escoge la zona de tarificación vial con el mayor potencial para resolver los problemas de saturación y mejorar los tiempos de viaje. La zona de tarificación por congestión propuesta para la ciudad de Santiago de Chile está ubicada al noreste de la ciudad y comprende un área de 15,7 km² (mapa 19). La zona limita al norte con el río Mapocho; al este, con El Bosque y la Avenida M. Sánchez Fontecilla; al sur, con Bilbao, Diego de Almagro y Santa Isabel, y al oeste, con Norte Sur-Caletera Poniente.

En el mapa 20 se observa el total de viajes generados y atraídos en vehículo particular en las diferentes zonas de la ciudad. La zona propuesta se encuentra ubicada en el área donde se da una gran afluencia de viajes en vehículo particular. Aproximadamente se atraen más de 13.000 viajes por día (teniendo en cuenta conductor y pasajero).

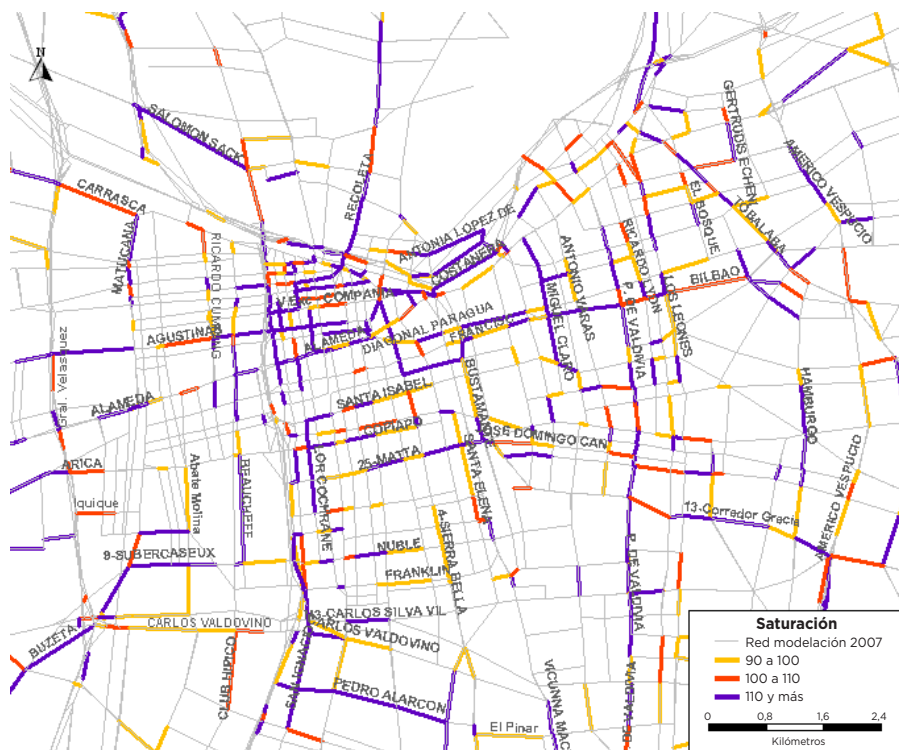
Según la encuesta de movilidad del año 2012, la distribución de viajes muestra dos picos principales para vehículos motorizados: alrededor de las 8:00 y alrededor de las 18:30 (gráfico 6). La consultoría

MAPA 17. Tiempos de viaje en Santiago de Chile



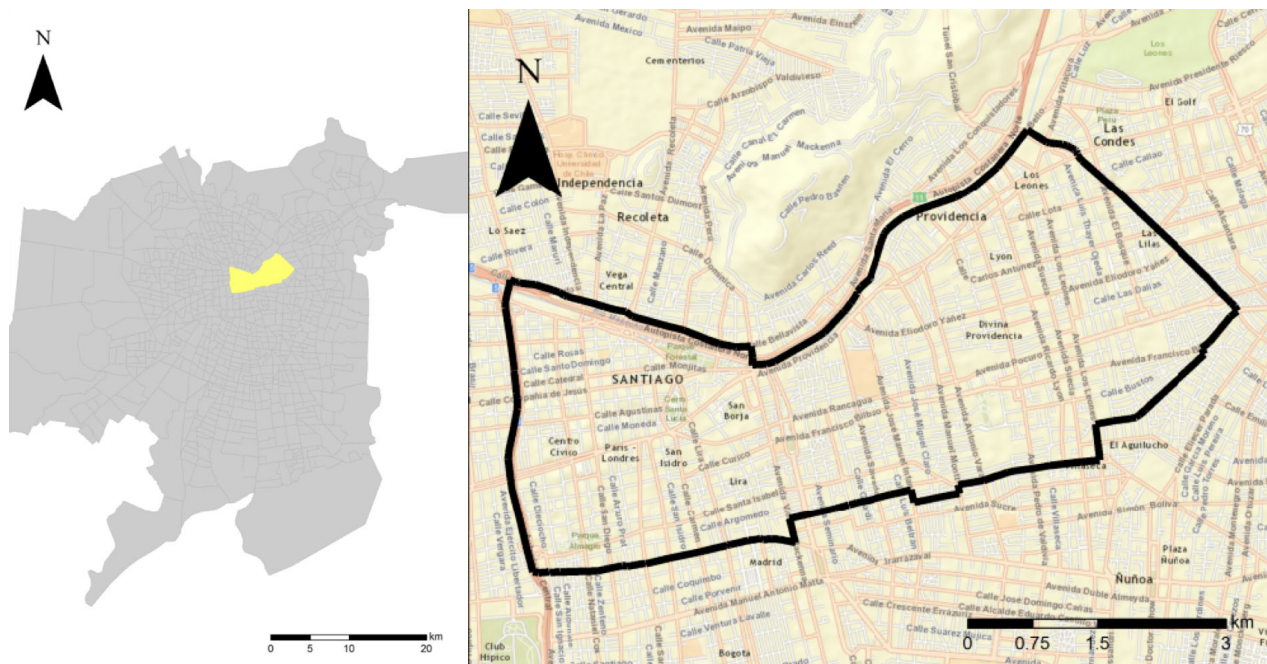
Fuente: Steer Davies Gleave (2009).

MAPA 18. Indicador de saturación en hora pico de la mañana para el sector céntrico de la ciudad



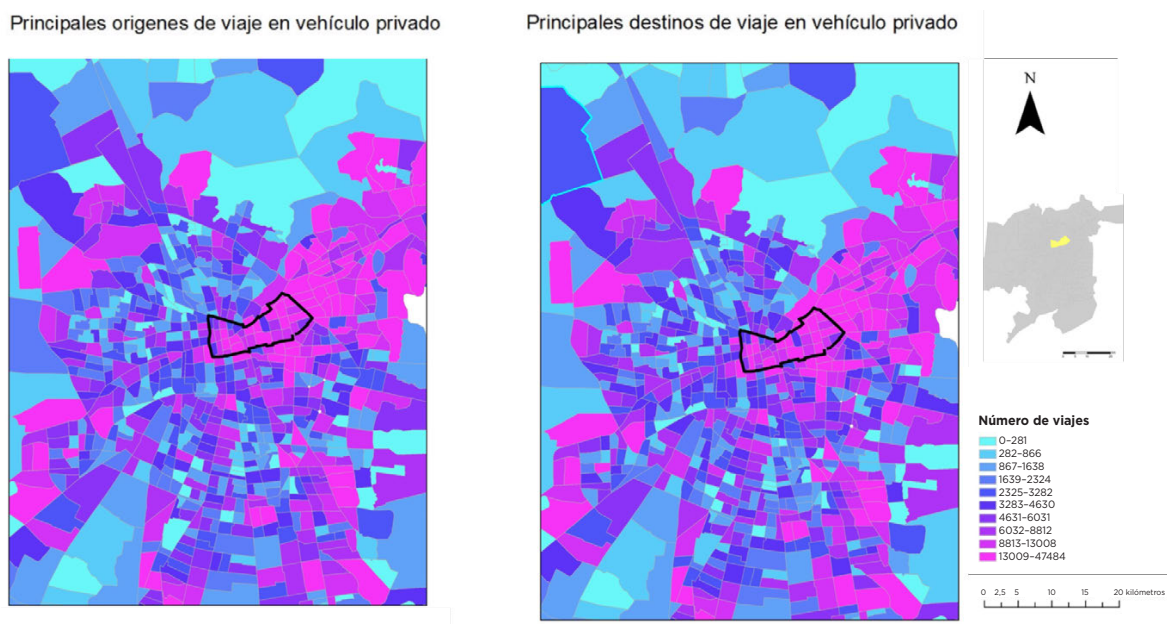
Fuente: Steer Davies Gleave (2009).

MAPA 19. Ubicación de la zona de tarificación por congestión – Santiago



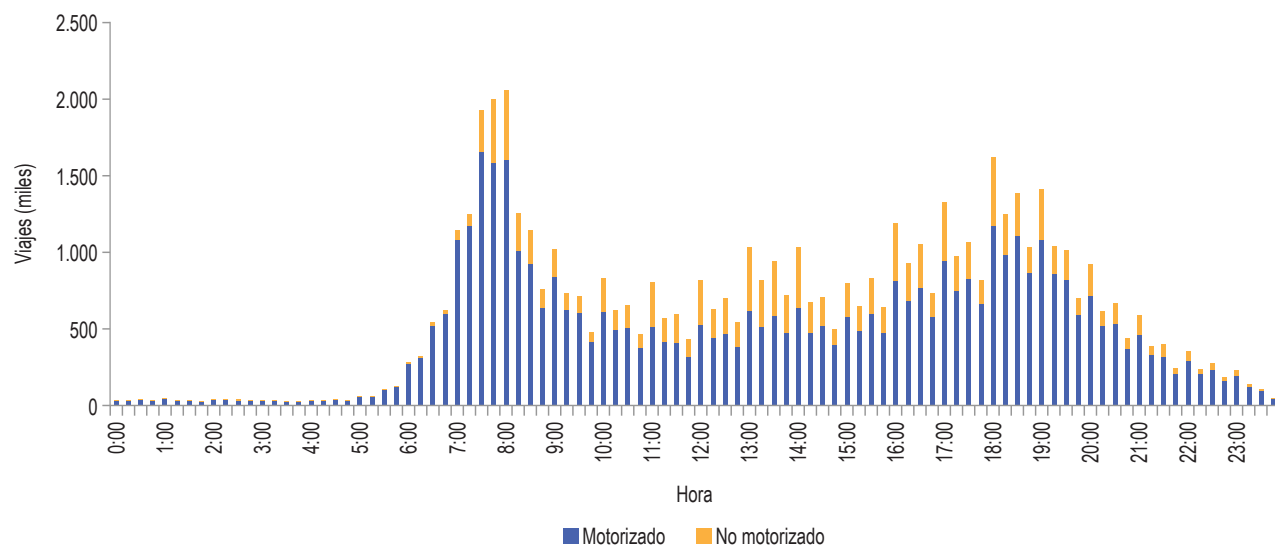
Fuente: Elaboración propia a partir de OpenStreetMap.

MAPA 20. Viajes en vehículo privado – Santiago



Fuente: Universidad Alberto Hurtado, SECTRA (2012).

GRÁFICO 6. Distribución de viajes – Santiago



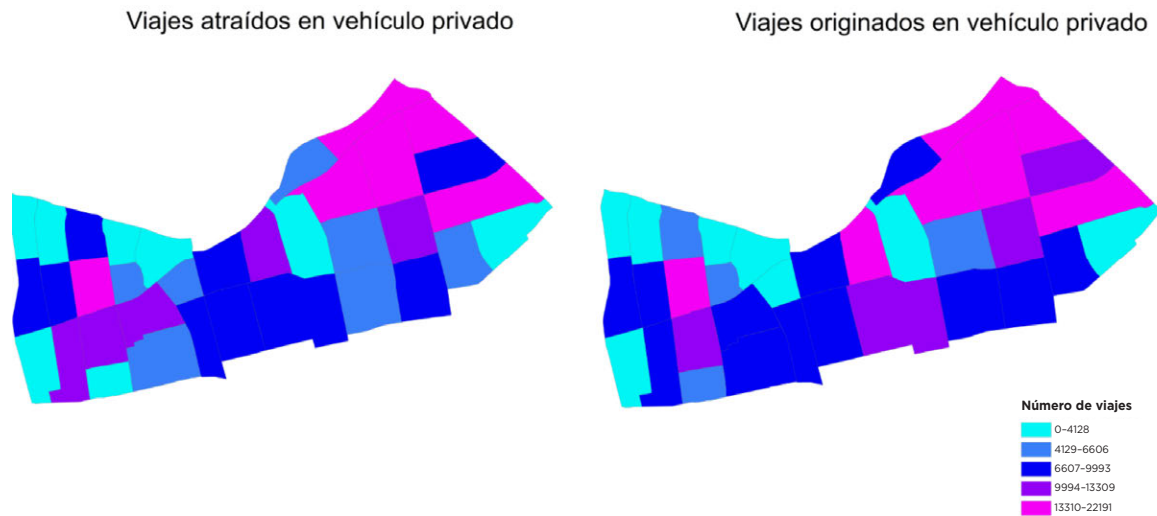
Fuente: Universidad Alberto Hurtado, SECTRA (2012a).

propone que la tarificación por congestión empiece a las 7:30 y finalice a las 20:00.

Para este periodo de tiempo (Encuesta de movilidad de 2012) en la zona propuesta se

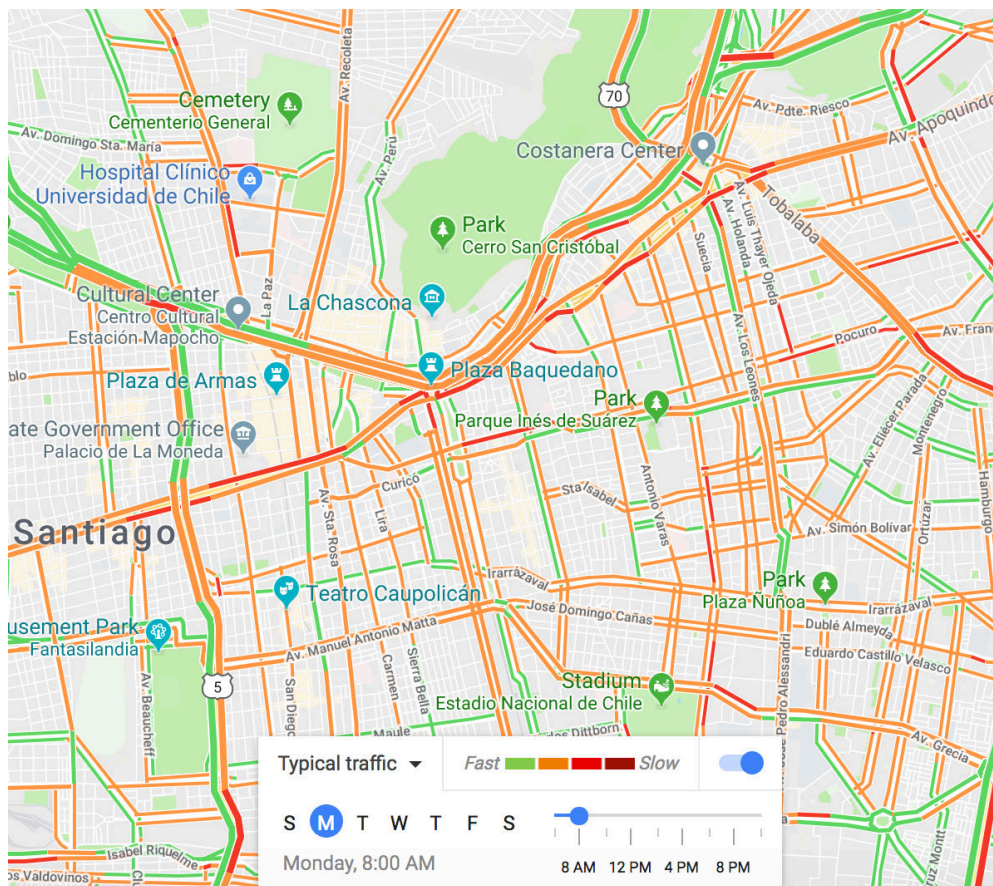
registraron 801.877 viajes en vehículo privado, es decir, aproximadamente 629.474 viajes sin tener en cuenta pasajeros. La ocupación promedio es de 1,3 pasajeros por vehículo privado. En cuanto

MAPA 21. Viajes en vehículo privado en la zona de tarificación por congestión – Santiago



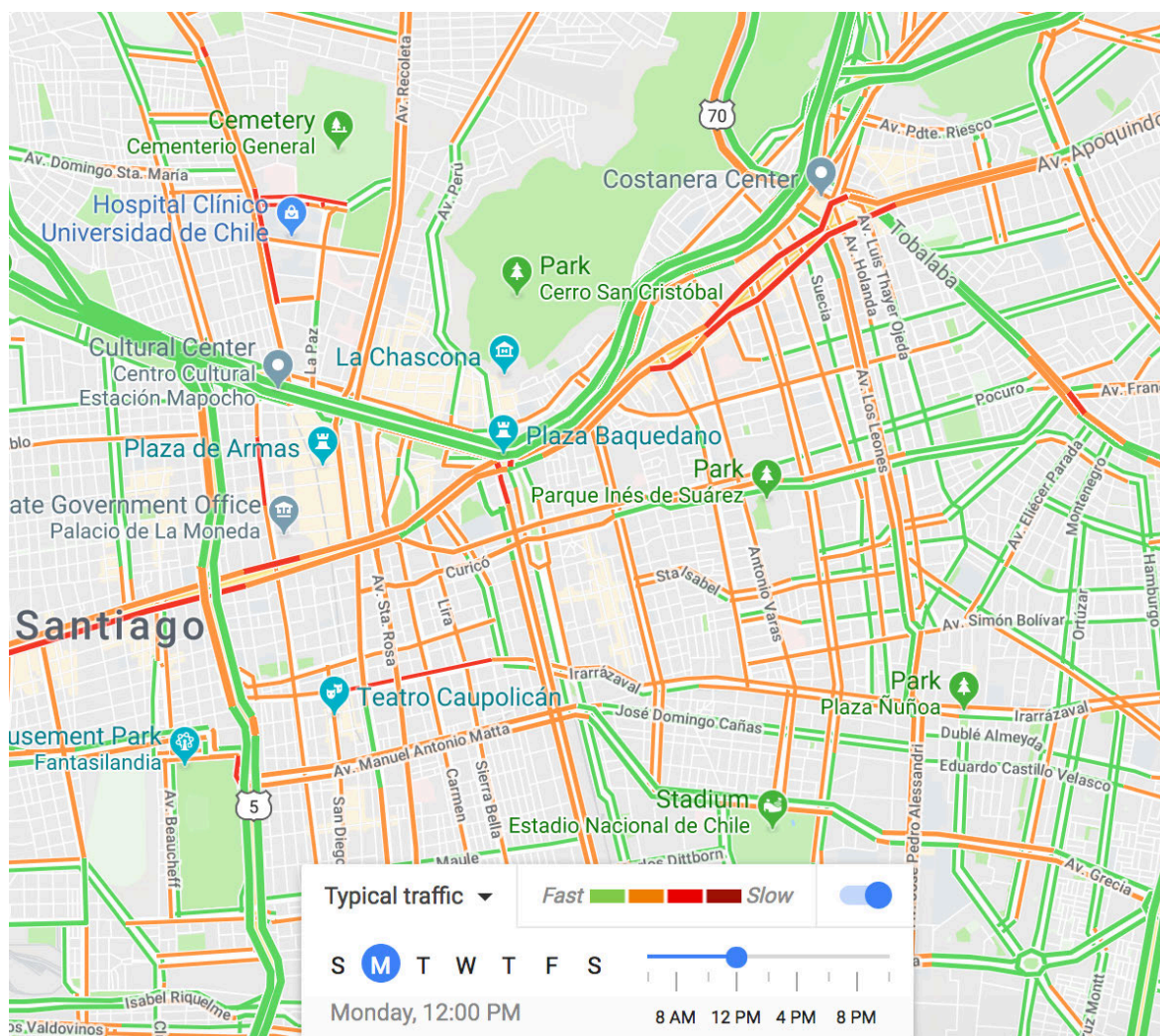
Fuente: Universidad Alberto Hurtado, SECTRA (2012).

MAPA 22. Velocidades en la zona de tarificación por congestión – Santiago, 8:00



Fuente: Google (2018).

MAPA 23. Velocidades en la zona de tarificación por congestión – Santiago, 12:00



Fuente: Google (2018).

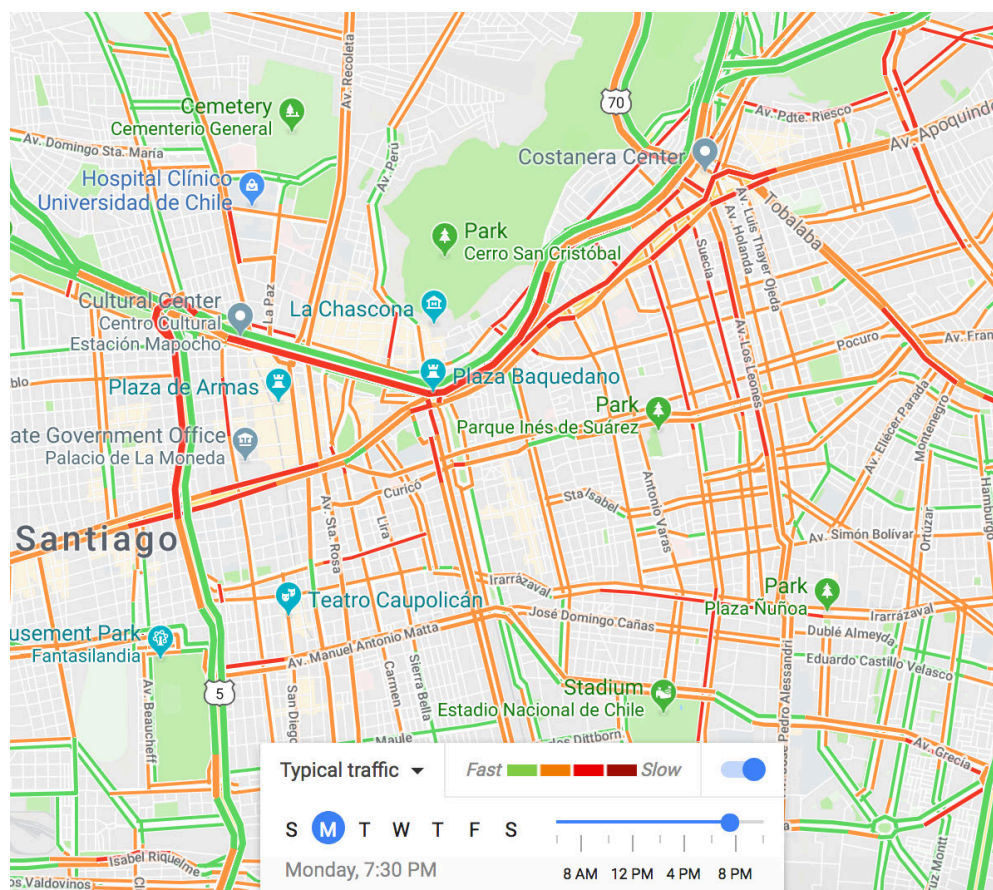
a los viajes en vehículo particular en la zona, en total se recorren aproximadamente 2.478.611. km entre las 7:30 y las 20:00. La distancia promedio por viaje realizado en la zona es de 3,94 km (mapa 21).

La velocidad promedio en la zona es de alrededor de 21 km/h. Es importante resaltar en los mapas 22, 23 y 24 que las vías más congestionadas son la Avenida Vicuña Mackenna, Los Leones y la Avenida Tobalaba.

Al comparar las características de las tres zonas en el cuadro 12, se observa que de las tres

ciudades estudiadas Bogotá tiene el área de congestión más pequeña, con menor número de viajes y menor distancia recorrida, pero que es la ciudad donde la tarifa se aplicaría por un periodo de tiempo más largo (13 horas frente a 12 y 12,5 en Ciudad de México y Santiago, respectivamente). Por su parte, Ciudad de México tiene la zona de congestión más grande y con la menor velocidad promedio. Estas características tendrán incidencia sobre los efectos estimados en términos de recaudación, congestión y contaminación que se presentan en la sección siguiente.

MAPA 24. Velocidades en la zona de tarificación por congestión – Santiago, 19:30



Fuente: Google (2018).

2.4 Modelo de determinación de la tarifa óptima




Desde el punto de vista económico, la congestión representa una externalidad negativa toda vez que, al superarse un determinado flujo de vehículos, el ingreso de nuevos usuarios en una vía hace que se sobrepase su capacidad de soportar de manera fluida la circulación de vehículos, lo cual produce una disminución de la velocidad de circulación y por consiguiente una pérdida de tiempo (aumento de tiempos de viaje). Esta situación genera una asignación no óptima de los recursos, y para corregirla es necesario introducir una tasa que permita internalizar tal externalidad y lograr un nivel de congestión óptimo para la sociedad.

Dicho fenómeno se puede entender con base en la relación entre la demanda $D(q)$ y el costo de circulación $C(q)$ en una vía, el costo individual de circulación $I(q)$ y el costo marginal social $S(q)$. $I(q)$ contempla los costos monetarios en los que incurre el usuario, asociados a combustible, mantenimiento del vehículo, estacionamiento, costo asociado al tiempo de viaje, que conforman los costos variables,⁶ sumados a los costos fijos⁷ del vehículo. Por su parte, $S(q)$ añade a $I(q)$ el costo por la reducción de la velocidad de circulación (congestión); en contextos más amplios esta curva puede incluir el costo de otras externalidades asociadas

⁶ Costos que varían en función del nivel de actividad.

⁷ Costos que no varían en función del nivel de actividad.

CUADRO 12. Comparación de las zonas de tarifación en las tres ciudades

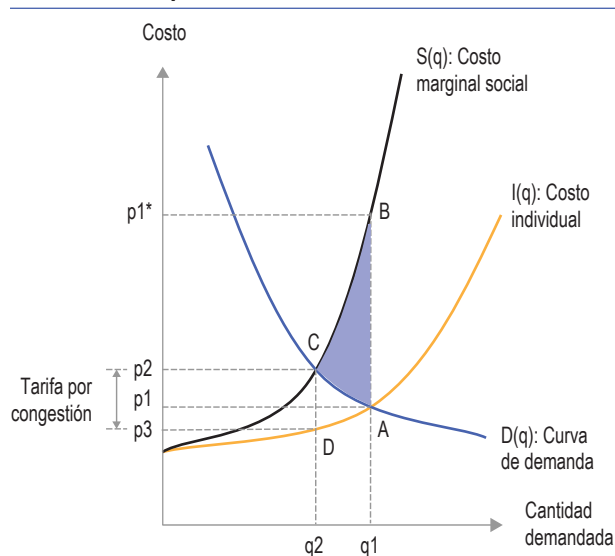
Ítem	Bogotá	Ciudad de México	Santiago
Zona			
Zona	8,7 km ²	27,02 km ²	15,7 km ²
Horario	6:00 a 19:00	7:00 a 19:00	7:30 a 20:00
Viajes en veh. privado (miles)	348,7	507,3	629,5
Km recorridos (miles)	641	2.050	2.478
Distancia prom. de viaje (km)	3,00	4,00	3,94
Velocidad promedio (km/h)	17	11	21

Fuente: Elaboración propia sobre la base de las encuestas de movilidad.

al transporte, tales como las emisiones. Al estar en presencia de congestión y en ausencia de un cobro para internalizar esta externalidad, $I(q)$ difiere de $S(q)$ para la demanda asociada q_1 bajo un costo p_1 . Se obtiene el equilibrio en el punto C, cuando se logra internalizar por completo este fenómeno al establecer el peaje óptimo (p_2-p_3) —peaje pigouviano—, reduciendo la demanda de la vía a un nivel q_2 y generando un beneficio social correspondiente al área CBA (gráfico 7) (Prud'homme y Bocarejo, 2005) (Tyler *et al.*, 2013). De acuerdo con la teoría económica, la tarifa definida como el costo marginal⁸ maximiza el beneficio social en el sentido que se obtiene una situación Pareto-eficiente⁹ (Hau, 1992). El detalle de la descripción de las curvas que describen este fenómeno se presenta en el anexo 3.

A continuación, se presentan los parámetros empleados para cada una de las ciudades analizadas de acuerdo con la información disponible (cuadro 13). La velocidad a flujo libre se asumió constante (40km/h) para las tres ciudades, mientras que la velocidad para el año base —2012— se

GRÁFICO 7. Diagrama de determinación de la tarifa óptima



Fuente: Elaboración propia sobre la base de Tyler *et al.* (2013) y Pigou (2005).

⁸ Cambio en el costo total de producción derivado de la producción de una unidad adicional.

⁹ Situación en la que cualquier cambio en la asignación de los recursos beneficia a algún individuo sin perjudicar a otro.

CUADRO 13. Parámetros base para el modelo de determinación de la tarifa por congestión

	Bogotá	Ciudad de México	Santiago
Costo por km (US\$/km)	0,25	0,10	0,22
Velocidad a flujo libre (km/h)	40	40	40
Velocidad del año base (km/h)	17 ^a	11 ^b	21 ^c
Valor del tiempo (US\$/h)	6,61	5,9	8,25
Viajes en automóvil en zona de tarificación	348.694	507.260	629.474
Km recorridos por día en zona de tarificación (miles)	641,27	2.050	2.478
Elasticidad de la demanda	-0,58	-0,52	-0,76
Factor de emisión de CO₂ (g/km)	328,29 ^d	171,66 ^e	210,59 ^f

Fuente: Elaboración propia sobre la base de las encuestas de movilidad.

Notas:

^a Unión temporal SDG-PHR-AKIRIS (2014) y Google (2015).

^b Google (2015).

^c Steer Davies Gleave (2009) y Google (2015).

^d Rodríguez y Behrentz (2009).

^e Secretaría del Medio Ambiente (2012).

^f Universidad de Santiago de Chile (2014).

tomó a partir de las reportadas en diferentes fuentes. Con relación a los viajes en automóvil en la zona seleccionada para implementar el esquema de tarificación vial, se emplearon los datos de las encuestas “origen-destino” correspondientes a los viajes con origen o destino, o internos, realizados en la zona en este modo de transporte. A fin de estimar los kilómetros recorridos al interior de las zonas propuestas se utilizó la metodología de la distancia del taxista, la cual en vez de tener en cuenta la distancia más corta entre dos coordenadas (distancia euclidiana), tiene en cuenta las distancias absolutas entre los dos puntos, asemejándolas a una distancia real recorrida por un vehículo en una malla vial. Finalmente, el valor del tiempo y el costo por kilómetro se tomaron de las bases de datos construidas para los modelos de uso del automóvil. Cabe señalar que los datos base de movilidad y de costos se actualizaron a 2012 conforme el aumento del PIB registrado entre el año de la encuesta y el año base para los casos de Bogotá y Ciudad de México.

La estimación de la reducción de emisiones de CO₂ se basó en los factores de emisión reportados en los inventarios de emisiones más recientes de cada ciudad, junto con la reducción de kilómetros

derivada de la implementación del esquema de tarificación vial.

En el cuadro 14 se muestran los resultados de la estimación de la tarifa y los potenciales beneficios directos de la implementación en las zonas de congestión propuestas bajo las condiciones base, es decir, empleando los parámetros anteriormente descritos. Es preciso recalcar que los análisis desarrollados consideran únicamente los viajes en automóvil realizados en el periodo comprendido entre el inicio de la hora pico de la mañana y el fin de la hora pico de la tarde, tal como se señaló en la sección anterior.

Se destaca que las tarifas por kilómetro estimadas oscilan entre los US\$0,24 y US\$0,42, siendo la más elevada en el caso de Ciudad de México. En particular, en el caso de Bogotá, el estudio de cobros por congestión desarrollado en 2014 estimó una tarifa US\$0,37 por kilómetro, la cual es muy similar a la obtenida en el presente estudio. Con relación al beneficio de reducción de demanda en la zona, se obtienen resultados muy similares para Ciudad de México y Bogotá (28%), mientras que en Santiago es un poco menor (25%); el aumento de velocidad derivado de esta reducción se estimó en 6,5 km/h en

CUADRO 14. Resultados de los modelos de congestión

	Bogotá	Ciudad de México	Santiago
Tarifa óptima (US\$/km)	0,33	0,42	0,24
Tarifa diaria (US\$)	2,00	3,33	1,91
Disminución de km (miles de km) y en (%)	182 (28,3%)	592 (28,8%)	618 (24,8%)
Mejora de velocidad por viaje (km/h)	6,5	8,4	4,7
Reducción en tiempos de viaje promedio (min.)	2,5	10,2	2,2
Beneficio económico de la reducción de congestión (US\$/día)	70.571	401.064	137.878
Monto de la recaudación (miles de US\$/día)	154	611	447
Emisiones de CO ₂ evitadas (g/km)	59,79	101,57	130,16

Fuente: Elaboración y cálculos propios.

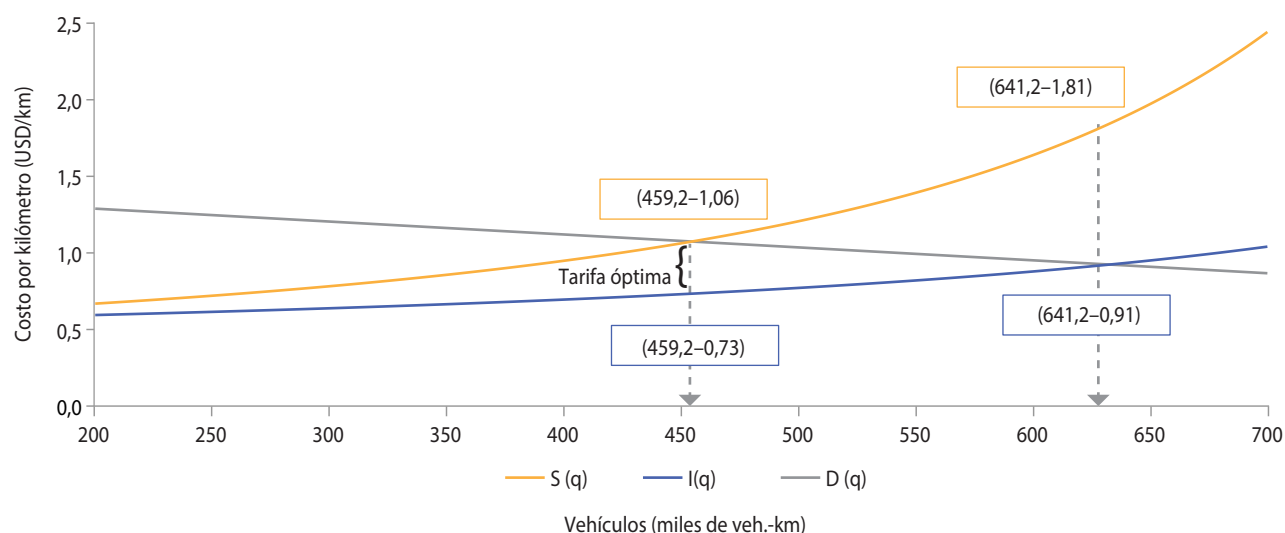
Bogotá, 8,4 km/h en Ciudad de México y 4,7 km/h en Santiago. Esta mejora en las velocidades promedio generaría reducciones en los tiempos promedio de viaje que oscilan entre los 2 y 10 minutos según la ciudad. El mayor beneficio económico y la mayor recaudación se obtuvieron en el caso de Ciudad de México, y lo contrario se dio en el caso de Bogotá.

A continuación, se presentan los gráficos construidos para cada ciudad en estudio (gráficos 8, 9 y 10) a fin de determinar la tarifa óptima, el costo de la congestión, la recaudación y la variación

esperada de la demanda. Las ecuaciones que describen las curvas graficadas se encuentran en el anexo 4.

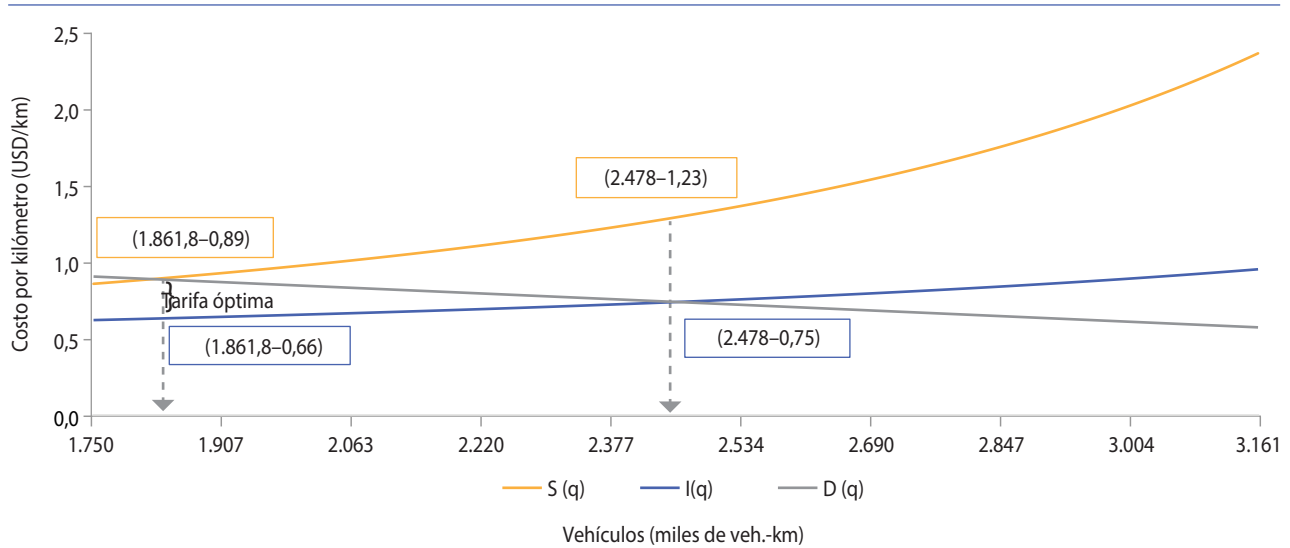
Dada la incertidumbre de los datos, se adelantaron un análisis de sensibilidad de la tarifa, la variación en la demanda, la variación de la velocidad promedio de operación en la zona de tarifación vial, el costo de la congestión, la recaudación asociada y las emisiones evitadas frente a la velocidad promedio de circulación, el valor del tiempo y la elasticidad de la demanda.

GRÁFICO 8. Modelo de congestión – Bogotá



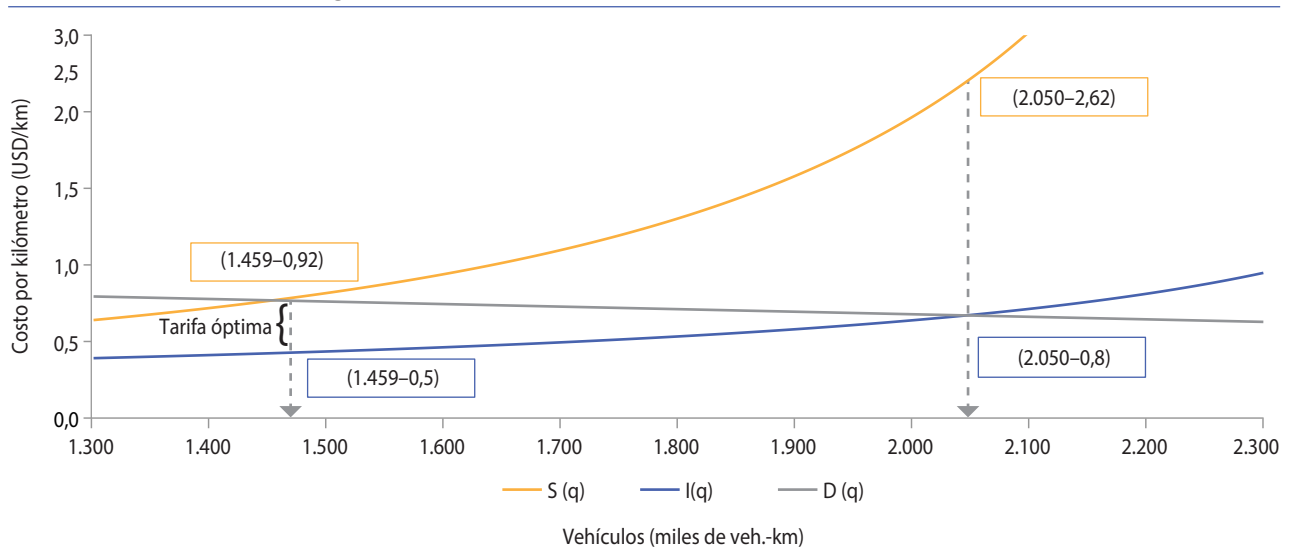
Fuente: Elaboración y cálculos propios.

GRÁFICO 9. Modelo de congestión – Santiago



Fuente: Elaboración y cálculos propios.

GRÁFICO 10. Modelo de congestión – Ciudad de México



Fuente: Elaboración y cálculos propios.

Los análisis muestran que la velocidad promedio de circulación en el área de tarifación vial es el parámetro que mayor incidencia tiene en la tarifa por kilómetro (cuadros 15, 16 y 17) y en las demás variables analizadas. En el caso de Bogotá, con una velocidad de entre 5 km/h y 21 km/h, se estiman tarifas que van desde 0,23 US\$/km hasta 1,74 US\$/km, mientras que al considerar velocidades entre 5 km/h y 25 km/h para Santiago y Ciudad de México,

se obtienen tarifas que oscilan entre 0,16 US\$/km y 1,79 US\$/km, y 0,1 US\$/km y 1,15 US\$/km, respectivamente. En los anexos 5 al 7 se presentan en detalle los gráficos correspondientes al comportamiento de las diferentes variables para el análisis de sensibilidad.

Con las condiciones base empleadas para la estimación de la tarifa por congestión, y considerando el costo del estacionamiento y de combustible

CUADRO 15. Análisis de sensibilidad frente a la velocidad, el valor del tiempo y la elasticidad – Bogotá

Parámetro	Rango	Tarifa (US\$/km)	Δ veh.– km*1000	Δ velocidad (km/h)	Costo de la congestión (millones de US\$)	Recaudación	Emisiones (ton.)
Velocidad (km/h)	[5;21]	[0,23;1,74]	[149,92;182,81]	[5,13;8,4]	[38,51;660,47]	[107,04;852,68]	[49,22;60,01]
Valor del tiempo (US\$/h)	[3,31;9,92]	[0,18;0,49]	[170,49;186,47]	[6,11;6,69]	[33,5;107,81]	[83,65;223]	[55,97;61,22]
Elasticidad	[-0,87;-0,29]	[0,29;0,37]	[162,45;209,61]	[5,83;7,52]	[64,45;78,46]	[125,02;177,46]	[53,33;68,81]

Fuente: Elaboración y cálculos propios.

CUADRO 16. Análisis de sensibilidad frente a la velocidad, el valor del tiempo y la elasticidad – Santiago

Parámetro	Rango	Tarifa (US\$/km)	Δ veh.– km*1000	Δ velocidad (km/h)	Costo de la congestión (millones de US\$)	Recaudación	Emisiones (ton.)
Velocidad (km/h)	[5;25]	[0,16;1,79]	[544,23;672,26]	[3,29;8,08]	[70,19;2.503,63]	[315,43;3.434,38]	[114,61;141,57]
Valor del tiempo (US\$/h)	[4,13;12,39]	[0,13;0,35]	[559,32;641,06]	[4,29;4,91]	[63,11;213,5]	[246,2;644,7]	[117,78;135]
Elasticidad	[-0,91;-0,38]	[0,2;0,27]	[524,91;762,81]	[4,02;5,85]	[128,74;164,94]	[349,13;521,04]	[110,54;160,64]

Fuente: Elaboración y cálculos propios.

CUADRO 17. Análisis de sensibilidad frente a la velocidad, el valor del tiempo y la elasticidad – Ciudad de México

Parámetro	Rango	Tarifa (US\$/km)	Δ veh.– km*1000	Δ velocidad (km/h)	Costo de la congestión (millones de US\$)	Recaudación	Emisiones (ton.)
Velocidad (km/h)	[5;25]	[0,1;1,15]	[485,85;613,63]	[4,02;8,6]	[47,66;1.438,34]	[149,05;1.801,05]	[83,4;105,34]
Valor del tiempo (US\$/h)	[2,93;8,79]	[0,21;0,62]	[580,68;595,52]	[8,21;8,42]	[198,24;603,94]	[315,21;906,71]	[99,68;102,23]
Elasticidad	[-0,62;-0,26]	[0,38;0,43]	[575,2;640,48]	[8,14;9,06]	[394,18;420,2]	[532,27;640,29]	[98,74;109,94]

Fuente: Elaboración y cálculos propios.

por día, se estimó cuánto representa la tarifa por congestión por día con relación al costo de estacionamiento y de combustible durante el mismo periodo de tiempo. De acuerdo con los datos, para el caso del estacionamiento, alcanzar un monto equivalente a las tarifas bases estimadas por

congestión implicaría aumentos que oscilan entre 121% y 793% del costo estimado para 2012 (cuadro 18). En cuanto al combustible, el aumento sería menor y se ubicaría entre 42% y 162%.

Por último, se realiza una comparación de la recaudación estimada de tarificación por congestión

CUADRO 18. Estimación del aumento equivalente de la tarifa por congestión en estacionamiento y combustible

Ítem	Bogotá	Santiago	Ciudad de México
Estacionamiento (US\$/día)	1,65 ^a	0,42 ^b	0,59
Combustible (US\$/día)	4,81	2,06	2,45
Tarifa por congestión (US\$/día)	2	3,33	1,91
Aumento del costo de estacionamiento (%)	121%	793%	324%
Aumento del costo de combustible (%)	42%	162%	78%

Fuente: Elaboración y cálculos propios.

Notas:

^a Cerca de 60% de los hogares no pagan por el estacionamiento al día.

^b Cerca de 87% de los hogares no pagan por el estacionamiento al día.

CUADRO 19. Comparación de la recaudación por tarificación con otras fuentes de recursos y posibles usos en las ciudades

Ítem	Bogotá	Ciudad de México	Santiago
Tarificación por congestión			
Monto de la recaudación (miles de US\$/día)	154	611	447
Monto de la recaudación anual (millones de US\$) ^a	38,5	152,8	111,8
Otros impuestos municipales			
Impuesto de vehículos anual (millones de US\$)	239,0	157,0	280,7
Tarificación por congestión como % del imp. vehículos	16%	97%	40%
Recaudación anual por tarifas de sistemas de transporte			
Ingresos por tarifas de sistemas de transporte (millones de US\$)	357,0	60,0	85,0
Tarificación por congestión como % de ingresos por tarifas del sistema de transporte	11%	255%	131%
Costos de infraestructura por kilómetro (millones de US\$/km) ^b	12,5	2,9	5,7
Km de transporte público financiados con recaudación por tarificación	3,1	53,0	19,5

Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de la Secretaría de Hacienda Distrital, Secretaría de Finanzas de la CDMX, SINIM y BRT Data.

Notas:

^a Asumiendo 250 días hábiles de aplicación de la medida.

^b Tomado de BRT Data, para los sistemas de transporte masivo de cada ciudad.

con los principales ingresos municipales y con dos variables de ingresos y costos de los sistemas de transporte. Se observa en el cuadro 19 que la ciudad con menor recaudación anual por la medida sería Bogotá, con US\$38,5 millones, mientras que la recaudación más alta la alcanzaría Ciudad de

México, con US\$152,8 millones. El cargo por congestión solo representaría 16% del impuesto de vehículos para Bogotá, mientras que alcanzaría 40% para Santiago y sería prácticamente equivalente a lo que recauda Ciudad de México por el impuesto de tenencia o uso de vehículos.

Al comparar la recaudación potencial de la tarificación por congestión con los ingresos de los sistemas de transporte de cada ciudad, se observa que los recursos que puede generar la medida serían superiores a lo recaudado por los sistemas de transporte de Ciudad de México y Santiago. Sin embargo, representarían solo el 11% de la recaudación del sistema de transporte de Bogotá.¹⁰ Por otro lado, si se utiliza una medida de costo unitario de infraestructura de los sistemas de transporte, costo por kilómetro, se obtiene que la recaudación

de tarificación por congestión alcanzaría a financiar 3,1 km nuevos en Bogotá, mientras que en Santiago podrían financiarse 19,5 km y en Ciudad de México, 53 km.

¹⁰ Es importante señalar que, en 2012, el sistema de transporte de Bogotá se financió en su mayoría con la tarifa pagada por los pasajeros, sin recibir subsidios importantes, como sí ocurrió con los sistemas Metrobus y Transantiago.

3

Otras estrategias económicas de reducción de la congestión

El objetivo de los mecanismos económicos es internalizar las externalidades negativas que conlleva la utilización del vehículo particular (congestión, contaminación, etc.) capturando los costos económicos que los usuarios dejan de pagar, desestimulando su uso y fomentando la utilización de modos de transporte sostenible. Los impuestos y tarifas pagados por los conductores pueden utilizarse en inversiones de transporte público y no motorizado. En el cuadro 20 se presenta un resumen de algunos mecanismos económicos que se utilizan para internalizar los costos generados por el transporte en vehículos privados.

De manera complementaria a las medidas económicas, las ciudades han venido utilizando otros mecanismos para incentivar el uso de medios de transporte alternativos más eficientes y sostenibles, tales como caminar, usar transporte público o montar bicicleta. Estas medidas son complemento de los mecanismos económicos pues ofrecen alternativas al uso del transporte privado, desincentivando su uso. Para ello, las ciudades han adecuado su infraestructura física, ampliando los espacios para ciclistas y peatones, y extendiendo la red de transporte público con sistemas tipo bus rápido con infraestructura exclusiva (Clean Air Institute,

2012). A continuación, se describen las experiencias de gestión de la demanda implementadas en las tres ciudades estudiadas.

3.1 Las experiencias de gestión de la demanda

3.1.1 Bogotá

Desde hace varias décadas en la ciudad de Bogotá se han venido implementando medidas de gestión de la demanda, que en especial se han centrado en mecanismos de tipo regulatorio; a su vez, más recientemente se han impulsado medidas económicas y de comportamiento (cuadro 21) (recuadro 2). La sobretasa a la gasolina ha sido una importante fuente de financiación de infraestructura. Sin embargo, no es claro si ha actuado como un elemento disuasorio de viajes en automóvil. En cambio, la fuerte restricción de uso a partir del número de la placa sí ha generado un impacto importante en los kilómetros recorridos, aunque algunos estudios muestran que también ha podido aumentar la compra de un segundo automóvil en los hogares con suficiente capacidad de pago, contrarrestando la efectividad de la medida.

CUADRO 20. Descripción de los mecanismos económicos

Medida	Descripción	Ejemplo
Políticas de estacionamiento	<ul style="list-style-type: none"> Restricción de los espacios disponibles para el estacionamiento de vehículos particulares por medio de cobros y limitación de plazas. 	<ul style="list-style-type: none"> En 1997, Portland (Oregón) limitó la oferta de estacionamiento en barrios comerciales densos, distritos comerciales y distritos residenciales centrales, y zonas cercanas a una línea de transporte público (Banco Interamericano de Desarrollo, 2013). Esta medida resultó en un incremento en el uso de transporte público de 25% en 1970 a 48% en 1990 (Banco Interamericano de Desarrollo, 2013).
Cuotas por contaminación	<ul style="list-style-type: none"> Multas o bonificaciones según las tasas de emisión de los vehículos. 	<ul style="list-style-type: none"> En 2007, Hong Kong introdujo un programa para incentivar la compra de vehículos particulares con bajas emisiones a fin de mejorar la calidad del aire (Clean Air Institute, 2012). El programa ofrece una reducción de 30% sobre el impuesto del primer registro (FRT) de vehículos particulares a gasolina con bajas emisiones de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno (Dong <i>et al.</i>, 2012).
Impuestos y tasas a la propiedad y/o uso del vehículo	<ul style="list-style-type: none"> Cobro a la propiedad del vehículo a través del incremento de impuestos o cargos adicionales a los ya existentes. 	<ul style="list-style-type: none"> En 1990 Singapur implementó un sistema mediante el cual se subasta una cantidad limitada de certificados de título (<i>Certificates of Entitlement</i>, COE) utilizados para adquirir la propiedad de un vehículo (GTZ, 2009).
Cobros por congestión	<ul style="list-style-type: none"> Considerados como la mejor forma de que las externalidades generadas por el vehículo particular se vean reflejadas en el costo de su uso. Dentro de estos instrumentos se encuentran cobros por usar la vía y/o carriles expresos, cobros por conducir dentro de un área de la ciudad (<i>cordon pricing</i>) y cobro por una licencia para operar dentro de una zona. En teoría, la tarifa es flexible y se define según las condiciones actuales de congestión de la vía y el tipo de zona por la cual se quiere conducir. A diferencia de la tarificación vial, los ingresos recibidos por esta medida no están destinados a cubrir los costos de la infraestructura (túneles, puentes, avenidas, etc.) y su mantenimiento. En cambio, se invierten en transporte público y no motorizado. 	<ul style="list-style-type: none"> En 1975 Singapur implementó un esquema de licencias (<i>Area Licensing Scheme</i>, ALS) el cual requería que los vehículos particulares pagaran por una licencia para operar en áreas específicas de la ciudad. Debido a que con este esquema no había restricción en los kilómetros recorridos del vehículo y la congestión no se tenía en cuenta, en 1998 ALS se reemplazó por el esquema de pago electrónico de la vía (<i>Electronic Road Pricing</i>, ERP). La tarifa varía según la hora del día, el tipo y tamaño de vehículo y el tipo de vía que se está utilizando. Este esquema redujo el tránsito de la ciudad en un 31% (GIZ, 2012).

Fuente: Elaboración propia sobre la base de Sigma Gestión de Proyectos-Systra (2013), GIZ (2012), GTZ (2009), BID (2013), Clean Air Institute (2012), y Dong *et al.* (2012).

3.1.2 Ciudad de México

Las acciones de gestión de la demanda en Ciudad de México han estado encaminadas a generar nuevas opciones de transporte más sostenible como vehículos públicos y bicicletas públicas, más que a aumentar el costo de uso del automóvil (cuadro 22). Aunque también se han implementado restricciones al uso del automóvil, son menos duras que las

de Bogotá. Recientemente, se han impulsado políticas de cobro del estacionamiento en vía.

3.1.3 Santiago

En el caso de Santiago de Chile, las medidas de gestión de la demanda han estado dirigidas hacia la provisión de infraestructuras concesionadas (cuadro 23). Tanto estacionamientos como autopistas

CUADRO 21. Medidas vigentes de gestión de la demanda – Bogotá

Medida	Descripción
Impuesto a los combustibles – Sobretasa a la gasolina	<ul style="list-style-type: none">• Impuesto al consumo de combustible en la ciudad.• Pagado por distribuidores mayoristas de gasolina y diésel, los productores e importadores.• Impuesto cargado al consumidor en la tarifa de combustible.• 50% de la recaudación se destina al Sistema de Transporte Masivo.• 20% de la recaudación se dedica a la ampliación y mantenimiento de la malla vial.• 30% de la recaudación se destina al programa de acceso a barrios y pavimentos locales.
Restricción de uso por placa – Horario pico y placa	<ul style="list-style-type: none">• Medida para reducir la oferta de vehículos que circulan; se implementó desde 1998, y ha sufrido cambios en los horarios y rotación de los días de restricción.• Busca racionar el espacio vial.• Restricción de circulación de vehículos según el número de su placa en horario definido.
Disminución del espacio vial	<ul style="list-style-type: none">• Disminución del espacio vial destinado al automóvil a favor de la bicicleta y del transporte público.• Implementación de bicirreles que conectan con la red de ciclorutas. Medida implementada desde 2013.• Implementación de carriles preferenciales de transporte público. Medida implementada desde 2014.• Peatonalización: calle para el uso exclusivo de peatones. Por ejemplo, el tramo de la Carrera Séptima entre Calle Décima y Avenida Jiménez.
Cambio de horarios de trabajo	<ul style="list-style-type: none">• Reglamenta un cambio de horario laboral de los empleados del distrito a fin de mejorar la movilidad en las horas pico.• Medida adoptada por decreto de la alcaldía en 2012.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de Sigma Gestión de Proyectos-Systra (2013).

RECUADRO 2. Experiencia del proyecto de tarificación por congestión en Bogotá

Marco normativo de las tasas por congestión en Colombia

En 2011, el Plan Nacional de Desarrollo *Prosperidad para Todos* (Ley 1450 de 2011) habilitó a los municipios o distritos con más de 300.000 habitantes para que impongan tasas por el uso de áreas de alta congestión, de alta contaminación o de infraestructura construida a fin de evitar la congestión urbana, de acuerdo con el Decreto 2883 de 2013,^a que establece que para definir las zonas de aplicación de este tipo de medidas se debe analizar lo siguiente:

- La disponibilidad de oferta de transporte público y las alternativas de transporte no motorizadas suficientes para atender tanto las demandas existentes como las nuevas, y su proyección en el tiempo a partir de series estadísticas de al menos diez (10) años.
- Cuando se trate de infraestructura vial a mejorar o las áreas en cuestión, acreditar que se caracterizan por la existencia de externalidades negativas relacionadas principalmente con el uso excesivo de vehículos motorizados particulares y que no se afectarán adversamente los niveles de servicio del transporte público y no motorizado, realizando simulaciones con base en las series estadísticas.
- La forma en que se va a contener el número de impactos negativos previsible en diversos órdenes sobre las vías, zonas o corredores de transporte por fuera de la infraestructura o de las áreas, y cómo la administración municipal o distrital formulará e implementará acciones apropiadas de mitigación en todo caso.

Por otra parte, el mencionado Decreto estableció que para la formulación del modelo de tasa por uso de áreas de alta contaminación o alta congestión se debe contemplar lo siguiente:

(continúa en la página siguiente)

RECUADRO 2. Experiencia del proyecto de tarificación por congestión en Bogotá (continuación)

- Tipos de vía, niveles de congestión y servicio, tipos de servicio de los vehículos y niveles de ocupación vehicular para la imposición de tasas por uso de áreas de alta congestión o de infraestructura construida o mejorada para evitar la congestión urbana.
- Concentraciones de los contaminantes, criterio, tipos de vehículos, modelos, tipos de servicio de los vehículos y niveles de ocupación vehicular para la imposición de tasas por uso de áreas de alta contaminación.
- Temporalidad de las tasas por uso, de acuerdo con los criterios señalados en los párrafos 1 y 2 del artículo 90 de la Ley 1450 de 2011, y en concordancia con el destino específico previsto en el inciso 2.º del mismo artículo.
- Aspectos relacionados con la aplicación de las tasas por uso, tales como días de la semana, horas del día, vías de aplicación o distancias recorridas.

Del mismo modo, la Ley 1450 estableció que los recursos provenientes de la recaudación de tales tasas deben destinarse a financiar proyectos y programas de infraestructura vial, transporte público y programas de mitigación de contaminación ambiental vehicular.

Proyectos de cobro por congestión en Bogotá

Bajo este marco normativo, en tres ocasiones (2011, 2014 y 2015), la administración de la ciudad de Bogotá presentó al Concejo de la ciudad proyectos de acuerdo que pretendían crear o adoptar tasas por el uso de vías de alta congestión. Sin embargo, estos no fueron aprobados por el Concejo argumentando, principalmente, que la ciudad no contaba aún con transporte público de calidad que permitiera atender la demanda adicional derivada de la implementación de esta medida.

El proyecto de 2014, presentado por un alcalde encargado, no tuvo acogida en el Concejo Distrital al considerar adicionalmente que se dejaban aspectos fundamentales a discreción del gobierno, tales como la definición de las tarifas, las zonas de cobro, el sistema de recaudación y los dispositivos de monitoreo.^b En el caso del proyecto presentado en noviembre de 2015, a un mes de finalizar el periodo del alcalde, la propuesta fue nuevamente rechazada por el Concejo Distrital por falta de tiempo para su debate y con el argumento de que el Gobierno distrital no había cumplido con el trámite para sustentar los cobros ante el Ministerio de Transporte.^c

Fuente: Elaboración propia sobre la base de la Ley 1450 de 2011, el Decreto 2883 de 2013, Revista Semana y diario El Espectador.

^a <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2013/Documents/DICIEMBRE/11/DECRETO%202883%20DEL%2011%20DE%20DICIEMBRE%20DE%202013.pdf>.

^b <https://www.elespectador.com/noticias/bogota/concejo-dicen-aprobar-peajes-urbanos-seria-entregar-un-articulo-486115>.

^c <http://www.semana.com/nacion/articulo/se-caera-el-ultimo-proyecto-de-gustavo-petro-en-el-concejo-de-bogota/452742-3>.

urbanas han adoptado tarifas diferenciales relacionadas con el grado de congestión.

3.2 Alternativas a la tarificación por congestión – Políticas de estacionamiento

A diferencia de los impuestos a la propiedad del automóvil o a los combustibles, la tarificación por

congestión tiene la ventaja de estar dirigida a desincentivar viajes en automóvil en horas y zonas realmente congestionadas. En ese sentido, se reconoce como una herramienta más adecuada en términos económicos para resolver este fenómeno. Sin embargo, como se analiza en el capítulo 4, los desafíos de implementación son considerables. Así, una opción similar para aumentar el costo de uso del automóvil en ciertas zonas y horarios es la

CUADRO 22. Medidas vigentes de gestión de la demanda – Ciudad de México

Medida	Descripción
Préstamo de vehículos	<ul style="list-style-type: none"> Sistema Carrot de vehículos públicos de iniciativa privada implementado en el Distrito Federal en 2012 (Carrot, 2015). Tiene por objetivo reducir el número de vehículos en la ciudad y la contaminación generada por los vehículos particulares. En 2012 inició con 20 vehículos híbridos. En 2013 incorporó vehículos eléctricos a su flota.
Promoción de modos de transporte sostenible	<ul style="list-style-type: none"> Sistema de bicicletas públicas Ecobici puesto en marcha en 2010, que busca incentivar la movilidad no motorizada en la ciudad. Ecobici inició con 44 estaciones y 1200 bicicletas. Hoy en día cuenta con 444 estaciones y más de 6.000 bicicletas. Desde 2005 se implementó en la ciudad el sistema de buses tipo BRT Metrobús. Actualmente cuenta con cinco líneas que se extienden un total de 105 km, donde se ubican 171 estaciones.
Restricción de circulación	<ul style="list-style-type: none"> Programa “Hoy No Circula” restringe la circulación de los vehículos en Ciudad de México y en algunos estados de la Zona Metropolitana, entre lunes y viernes, de acuerdo con el último número de la placa. Busca reducir la contaminación del aire.^a Empezó a funcionar en 1989. Inicialmente se aplicaría en la época de invierno y en situaciones donde la concentración de contaminantes en la atmósfera superara determinados niveles (Secretaría del Medio Ambiente. Ciudad de México, 2015). En 1990 el programa pasó a ser permanente. En 1997 se decidió eximir de la medida a vehículos con convertidor catalítico. En 2008 se amplía para aplicar la medida los días sábado.^b
Sobrepeso en la gasolina	<ul style="list-style-type: none"> Por medio del Impuesto Especial sobre producción y servicios (IEPS). Dos impuestos (nacionales): i) tasa variable con respecto al precio del crudo en el mercado internacional, y ii) gravamen a la gasolina y el diésel (Clean Air Institute, 2012). Esta medida no funciona eficientemente ya que el Estado también subsidia una porción del precio de la gasolina. Para 2008 este valor representó aproximadamente 1,5% del PIB (Campodónico, 2009).
Políticas de estacionamiento	<ul style="list-style-type: none"> En 2012 se lanzó el programa ecoParq. El programa consiste en parquímetros en diferentes espacios de la ciudad. El cumplimiento del pago de la tarifa es vigilado por la policía de tránsito y empleados de ecoParq. Si el conductor no paga la tarifa, el vehículo es inmovilizado. Debido a estas tarifas, los conductores empezaron a estacionar en zonas aledañas a la zona donde se implementó ecoParq, trasladando el problema de congestión a otros barrios de la ciudad.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de Sigma Gestión de Proyectos–Systra (2013).

^a Los vehículos que utilizan fuentes de energía no contaminantes están exentos de esta restricción.

^b Dejan de circular conforme al último dígito de la placa. El primer y tercer sábado de cada mes descansan los vehículos con placas terminadas en número impar. El segundo y cuarto sábado de cada mes descansan los números pares.

CUADRO 23. Medidas vigentes de gestión de la demanda – Santiago

Medida	Descripción
Impuesto específico a los combustibles	<ul style="list-style-type: none"> Establecido en 1986 como impuesto al consumo de combustible para automotores. Inicialmente se estableció un impuesto de 15 Unidades Tributarias Mensuales (UTM)^a por metro cúbico para la gasolina y de 2 UTM por metro cúbico para la gasolina; sin embargo, este último ha fluctuado. En principio buscaba recaudar recursos para rehabilitar carreteras y caminos afectados por el terremoto de 1985. Posteriormente se entendió como un impuesto por el uso de la infraestructura vial que contribuía a financiar su mantenimiento.
Restricción vehicular	<ul style="list-style-type: none"> Originalmente diseñada e implementada para controlar la contaminación (disminuir el material particulado); en principio se aplicaba únicamente a los vehículos no catalíticos. En situaciones de contaminación crítica como alertas o emergencias ambientales, se incrementa la restricción a una mayor cantidad de vehículos. Su aplicación inició en 1986. En 2001 se extendió la medida a vehículos catalíticos.

(continúa en la página siguiente)

CUADRO 23. Medidas vigentes de gestión de la demanda – Santiago (continuación)

Medida	Descripción
Promoción de modos sostenibles	<ul style="list-style-type: none">Desde 2013 la ciudad cuenta con el sistema intercomunal de bicicletas públicas Bikesantiago, con el que se busca ofrecer a los ciudadanos una solución de transporte eficiente, segura y sostenible.En 2005 comenzó el funcionamiento del sistema de transporte público Transantiago, que integra física y tarifariamente todos los servicios de buses públicos de la ciudad. Este sistema reestructuró el sistema de buses con el que contaba la ciudad.
Estacionamientos concesionados	<ul style="list-style-type: none">En 2013 la alcaldía de Santiago impuso la supresión de los estacionamientos en superficie en el centro de la ciudad para reemplazarlos por estacionamientos concesionados.La decisión estuvo motivada por evidencia del catastro vial que reveló que en aproximadamente 52% de las calles del centro de la ciudad se podía estacionar en uno o los dos costados de la vía.En 2013 se decidió que no se concederían más licencias de las emitidas en ese año para permisos de construcción de estacionamientos en el centro de la ciudad. Por el contrario, se privilegiaría el desarrollo de proyectos de estacionamiento en otras zonas.
Medidas de tránsito calmando	<ul style="list-style-type: none">Se han realizado intervenciones de pacificación del tránsito que reducen el espacio vial dedicado a los automóviles. Desde 2010 la ciudad cuenta con una guía para la implementación de intervenciones de este tipo.Su principal objetivo ha sido la reducción de la accidentalidad vial en lugares de alta accidentalidad.
Autopistas urbanas con peaje	<ul style="list-style-type: none">Programa de concesiones viales urbanas que pretendía reducir el déficit de infraestructura vial del Área Metropolitana de Santiago. Este programa se formuló para aliviar los problemas de congestión en el área y los problemas conexos de eficiencia y calidad de vida de los ciudadanos.Esta infraestructura debía ser pagada por los usuarios para no emplear recursos públicos.Además, buscaba incluir en la tarifa la internalización de los costos de viajar en automóvil, promoviendo un uso más racional de este modo de transporte.En 1995 se incluye este programa en el Plan de Transporte Urbano.Entre 1999 y 2002 se adjudican las autopistas del plan.En 2005 y 2006 cuatro de las autopistas inician la operación.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de Sigma Gestión de Proyectos-Systra (2013).

^a Unidad de cuenta utilizada en Chile para efectos tributarios y para el cobro de multas, la cual se actualiza con la inflación.

implementación de políticas de estacionamiento, la cual ha sido reconocida en la literatura como la segunda opción más eficiente, luego de la tarifación por congestión (Wilson y Miller, 2015).

En Bogotá, de acuerdo con la encuesta de movilidad, el promedio de tiempo de estacionamiento asociado a los viajes cotidianos es de tres horas (cuadro 24). Es usual que los viajes realizados en las horas pico de la mañana hacia las zonas de empleo tengan una mayor duración que aquellos realizados en otros horarios. El porcentaje de estos viajes que utiliza un estacionamiento propio o de su empresa es alto en Bogotá. El mayor desafío entonces tiene que ver con establecer mecanismos para el cobro a usuarios de estacionamiento privado.

Las opciones de cobro a usuarios de estacionamiento privado son diversas. Por un lado, es posible establecer un cobro adicional a su propiedad, aprovechando los esquemas existentes de cobro

del impuesto predial, incrementando las tarifas de las propiedades destinadas a estacionamiento. Por otra parte, se podrían establecer cobros directamente a empresas y establecimientos comerciales, lo que podría generar cambios en la costumbre que predomina en las compañías en América Latina de garantizar un sitio de estacionamiento gratuito a sus empleados.

En lo relacionado con el cobro a estacionamientos públicos, el desafío es fijar estrategias que desestimen cierto tipo de viaje. En particular, se puede generar una tarifa más alta para viajes al trabajo en hora pico que generan una alta ineficiencia en términos de utilización del espacio. Es necesario determinar un sistema de cobro y vigilancia estricta a los estacionamientos públicos. El otro aspecto fundamental para la implementación de este tipo de medidas tiene que ver con una fuerte política de cobro del estacionamiento en vía, o su restricción.

CUADRO 24. Tiempo de estacionamiento por localidad – Bogotá

Código de localidad	Localidad	No. de viajes que alcanza cada localidad	Tiempo total de estacionamiento (h)	Tiempo promedio de estacionamiento por vehículo (h)
1	Usaquén	876	2.183	2,49
2	Chapinero	666	2.172	0,60
3	Santa Fe	228	936	4,10
4	San Cristóbal	81	218	2,69
5	Usme	26	82	3,14
6	Tunjuelito	43	137	3,19
7	Bosa	48	150	3,12
8	Kennedy	278	775	2,79
9	Fontibón	298	932	3,13
10	Engativá	245	619	2,53
11	Suba	635	1.484	2,34
12	Barrios Unidos	255	784	3,07
13	Teusaquillo	315	1.078	3,42
14	Los Mártires	143	483	3,37
15	Antonio Nariño	94	254	2,70
16	Puente Aranda	196	733	3,74
17	Candelaria	65	288	4,43
18	Rafael Uribe Uribe	90	225	2,50
19	Ciudad Bolívar	38	109	2,88

Fuente: Elaboración propia sobre la base de Steer Davies Gleave (2012a).

4

Desafíos de implementación

La equidad y la facilidad de ejecutar el costo son dos de los aspectos que generan más prevención por parte de ciudadanos y legisladores a la hora de implementar la tarificación por congestión. En términos de equidad, a los legisladores les preocupa cómo la tarifa afectará a los individuos de menores ingresos (equidad vertical) y también cuál será la distribución adecuada de la nueva recaudación entre aquellos que no pagan la tarifa y quienes sí incurrir en el nuevo costo (equidad horizontal). Como lo plantea Litman (1996), en esta discusión es importante reconocer que la tarifa por congestión se aplica precisamente porque existen unos costos externos asociados al transporte privado que deben ser compensados a otros usuarios de diferentes medios de transporte. La sección 4.1 explora los aspectos de equidad y las opciones que pueden ayudar a mejorar la aceptabilidad de la tarificación por congestión.

De igual modo, la posible compensación entre un grupo y otro dependerá de los recursos que la ciudad pueda disponer una vez implementado el cargo. La tecnología escogida para aplicar el cobro será fundamental a la hora de reducir la evasión y asegurar la recaudación. Sin embargo, las tecnologías más efectivas suelen tener costos más altos, lo que también preocupa a la administración local a la hora de impulsar una medida de este tipo. La sección 4.2 explica diferentes tipos de cobro y tecnologías.

4.1 Equidad y aceptabilidad

A pesar de que los esquemas de tarificación por congestión conllevan beneficios sociales, como se mostró en el gráfico 7, algunos autores señalan que la internalización de los costos marginales puede generar impactos negativos en algunos grupos sociales (Banister, 1994). De no considerarse o corregirse los impactos podrían resultar en la exclusión social¹¹ (Rajé, 2003). Jones (1991) argumenta que este tipo de cobros tiene impactos negativos en los usuarios de bajos ingresos que son propietarios de vehículos, dado que no serán capaces de pagar este cargo y por consiguiente no tendrán posibilidad de entrar o usar la zona afectada (Banister, 1994). Particularmente, esta situación se exagera si no se ofrece un buen sistema de transporte público. En este mismo sentido, diversos autores han mencionado que si los ingresos no se emplean de manera que beneficien a los grupos de bajos ingresos afectados por el cobro, la medida resultaría discriminatoria y regresiva (Foster, 1975) (Foster, 1974) (Banister, 1994) (Levinson, 2010).

Por otro lado, Rajé (2003) advierte que, en el caso de los usuarios de bajos ingresos cuyo valor del tiempo es bajo, la implantación de este tipo

¹¹ La exclusión social es un proceso que hace que individuos o grupos que residen geográficamente en una sociedad no participen en las actividades normales de los ciudadanos en ella (Hine y Mitchell, 2001) (Preston *et al.*, 2000).

de medidas podría conducir a la exclusión social, puesto que el perjuicio/daño de los nuevos cargos será mayor que cualquier ahorro de tiempo, lo que resulta en la reducción de los viajes. Señala que, en contraste, la inclusión social de los usuarios de transporte público, que tienden a ser personas de bajos ingresos, puede verse afectada positivamente al poder disfrutar de viajes más rápidos con tarifas inalteradas e incluso más bajas como resultado del cobro. Los problemas de inequidad derivados de la implementación de un esquema de tarificación por congestión se pueden evaluar y mitigar desde las etapas de planificación y diseño de la medida.

Como lo describe Gu *et al.* (2018), cuatro aspectos influyen en la baja aceptación de la tarificación por congestión: i) privacidad; ii) equidad; iii) complejidad, y iv) incertidumbre. A continuación, se proponen algunas alternativas que pueden ayudar a abordar estos problemas, en especial los relacionados con la complejidad, la equidad y la incertidumbre, que son los que más dificultan la aceptación e implementación del cobro por congestión:

1. **Emplear modelos y llevar a cabo análisis que permitan reducir la incertidumbre sobre los efectos de la medida. Incluir aspectos como:**

- Determinar la o las tarifas a aplicar, los ingresos esperados, la zona y periodo adecuados donde implementar la tarificación por congestión, y definir las necesidades de inversión en infraestructura complementaria a la tarificación (Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, 2007) (Ecola y Light, 2009) (Jones, 2001).
- Seleccionar la mejor alternativa de esquema y garantizar que los beneficios obtenidos con ella justifiquen las inversiones requeridas. En especial se recomienda como mínimo desarrollar análisis de costo-beneficio (Ecola y Light, 2009).
- Estimar, aunque resulte complejo, cómo la tarificación por congestión podría afectar

los patrones de viaje y el bienestar de los grupos de bajos ingresos y grupos vulnerables (Ecola y Light, 2009).

2. **Definir descuentos que reduzcan la tarifa y excepciones de pago para determinados usuarios, o redistribuir los ingresos obtenidos con la tarificación a fin de abordar las preocupaciones sobre la equidad:**

Los descuentos y excepciones se pueden definir a nivel de personas, según características demográficas, socioeconómicas o de lugar de residencia. Del mismo modo, se pueden definir con relación al tipo de vehículo; por ejemplo, eximir del pago a los vehículos de servicios de emergencias, al transporte público, a vehículos de bajas emisiones o a motocicletas (Rajé, 2003) (Ecola y Light, 2009). Para aliviar problemas de equidad e impactos negativos en la frontera de la zona afectada por la tarificación vial, se recomienda reforzar las medidas de restricción de estacionamiento. En el límite del área de tarificación se debe evitar que los conductores no residentes ocupen los espacios de estacionamiento del borde de la zona de congestión, dejando a los residentes de esas zonas sin opciones de estacionamiento (Ecola y Light, 2009). Es importante tener en cuenta que los descuentos y las exenciones pueden tener efectos diferentes e importantes sobre el nivel de congestión. Mientras la exención al transporte público busca incentivar su uso como medio alternativo de transporte —reduciendo la congestión—, las exenciones a vehículos de personas residentes en la zona de congestión o a vehículos menos contaminantes buscan dar un beneficio que va en sentido contrario a la meta de reducir la congestión. El tipo de incentivos y descuentos afecta el grado de apoyo que la medida recibe del público, por lo que también se debe discutir cómo estos afectan la efectividad de la tarificación para reducir la congestión.

Diversos estudios también destacan que los ingresos obtenidos luego de descontar los costos de implementación y operación del

esquema deben reinvertirse en mejoras del sistema de transporte de la ciudad, principalmente del transporte público —de modo que se promueva la migración del usuario del vehículo particular a este modo de transporte—, de las vías y de otros modos de transporte alternativos al vehículo (Levinson, 2010) (Ecola y Light, 2009) (Rajé, 2003).

3. **Mejorar la comunicación sobre los alcances de la tarificación para mejorar la comprensión por parte del público, cubriendo aspectos como:**

- La percepción de libertad y afectaciones a la privacidad dado que en algunos esquemas la tecnología permite determinar la ubicación y trayectorias de los vehículos (Owen *et al.*, 2008) (Baron, 1995) (Jones, 1998) (Jakobsson, Fujii y Gärling, 2000) (Golob, 2001).
- Temas relacionados con la afectación a diferentes grupos sociales, la distribución de beneficios y perjuicios (sección 1.2.1) (Giuliano, 1992) (Giuliano, 1994) (Langmyhr, 1997) (Harsman, 2001).
- El reconocimiento y la comprensión de que los problemas que conlleva el transporte (congestión, peligros ocasionados por el tránsito y cuestiones ambientales) existen y deben ser remediados a través de herramientas de gestión de la demanda, tales como la tarificación por congestión. Por otra parte, la efectividad observada del esquema y los efectos percibidos en los residentes locales (Bartley, 1995) (Sheldon, Scott y Jones, 1993) (Schlag y Teubel, 1997) (Jones, Grosvenor y Wofinden, 1996) (Verhoef, Nijkamp y Rietveld, 1997) (Rajé, 2003) (Owen *et al.*, 2008).
- Los procesos de comunicación en los que se informe a la comunidad sobre el esquema diseñado, sus principales objetivos, los potenciales beneficios y su funcionamiento son determinantes para la aceptabilidad. Además, se quiere dar a conocer

casos de la medida de tarificación por congestión que se hayan implementado exitosamente y atender las preocupaciones de la sociedad (Sheldon, Scott y Jones, 1993) (Harsman, 2001) (Owen *et al.*, 2008).

- El uso de los ingresos generados (Jones, 1991) (Small, 1992) (Owen *et al.*, 2008): Jones (1998) concluye que la tarificación por congestión no será aceptada públicamente a menos que el dinero se emplee para proyectos de transporte local o relacionados con el medio ambiente.

El Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (2007) resume 12 elementos clave para la construcción de aceptabilidad de medidas de tarificación por congestión (cuadro 25).

4.2 **Tecnologías y costos de implementación**

En esta sección se presentan las diferentes opciones de tecnologías disponibles para la implementación de la tarificación por congestión en las diferentes ciudades. Para seleccionar la mejor opción se debe tener en cuenta el esquema que se va a implementar, el objetivo y la visión a largo plazo (por ejemplo, si en un futuro se expande la zona de tarificación por congestión propuesta es necesario contar con una tecnología que se adapte fácilmente).

Antes de elegir la tecnología para la tarificación por congestión es importante definir los objetivos y el esquema que se quiere seguir en la zona determinada; es decir, cómo se piensa cobrar a los usuarios que se movilizan en la zona. Se propone considerar tres posibilidades:

1. **Cobro por entrada en la zona**

Los usuarios pagan la tarifa cada vez que entran en la zona. Una vez en la zona, los usuarios son libres de moverse por la malla vial sin recibir tarifas adicionales. Los usuarios que ya se encuentran en la zona y se movilizan dentro de esta quedan exentos de pagar la tarifa.

CUADRO 25. Elementos para la construcción de aceptabilidad

Elemento	Descripción
El proyecto debe servir para implementar una política de transporte más amplia con la que deberá ser consistente	<ul style="list-style-type: none"> Implementar tarifas específicas para los viajes en automóvil que sean parte de un todo y que guarden coherencia, evidencien la existencia de una política y por consiguiente no sean entendidas como una medida aislada. Este factor ayuda a incrementar la aceptabilidad. Contribuye a la comunicación y al debate.
El proceso de toma de decisiones debe ser concebido de forma tal que asegure su transparencia y facilite la interacción entre diferentes actores	<ul style="list-style-type: none"> Desplegar esfuerzos para llegar a acuerdos sobre el proyecto aumenta la transparencia del proceso de toma de decisión, algo que no se logra siguiendo los procedimientos establecidos. El proceso de toma de decisión debe ser explicado para facilitar la interacción de las partes interesadas.
La inversión en esfuerzos en comunicación y marketing posibilita un mejor desarrollo y promoción del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> La opinión pública puede modificarse si el proyecto se desarrolla en el marco de una política amplia, no como una medida aislada, y si el proceso de toma de decisión tiene un componente importante de comunicación. Las campañas de comunicación y marketing deberían arrojar buenos resultados si se explican detalladamente la política y sus beneficios y se promueve el proyecto.
Se deben abordar aspectos de "justicia"	<ul style="list-style-type: none"> El proyecto puede contribuir a mejorar balances sociales y espaciales en términos de transporte, por sí mismo o a través de una política de inversión (zonas deprimidas, transporte público, etc.), o adaptando las políticas tarifarias de la red de transporte público. Para mitigar los efectos negativos relacionados con la equidad, las tarifas definidas por el proyecto deben incluir aspectos sobre la tarifa, tales como: diferentes tipos de suscripciones, tasas de concesión, excepciones de pago, variaciones horarias de la tarifa, etc.
Los objetivos del proyecto deben guardar relación con las principales expectativas de la población	<ul style="list-style-type: none"> Es más probable que un proyecto de tarificación vial gane aceptación si cumple con los principales requisitos y preocupaciones expresadas por la población, durante los procesos de toma de decisión y diseño del proyecto.
Los ingresos generados deben ser reinvertidos en transporte, y proponer alternativas al transporte en vehículo particular	<ul style="list-style-type: none"> Puesto que el proyecto debe ser parte de una política amplia de transporte que requiere inversiones, es necesario que se le garantice a la población que el dinero recaudado se empleará en el desarrollo de esta política. Esta política de transporte debe incluir inversiones en modos alternativos al vehículo particular, para ofrecer suficientes opciones al usuario. Se recomienda que dichas inversiones se realicen antes de la implementación del proyecto.
Adoptar una estrategia paso a paso hace posible adaptar el proyecto y darlo a conocer a la población	<ul style="list-style-type: none"> Esta estrategia contribuye a generar cambios graduales de las reglas del juego de modo que las partes involucradas adapten sus modos y hábitos de transporte. Esta estrategia ayuda a adaptar el proyecto según la reacción de la población.
Debe persuadirse a la población de que no hay otra solución viable	<ul style="list-style-type: none"> Es necesario convencer a la población de que la tarificación vial es la única solución para mejorar el sistema de transporte.
El proyecto debe mantenerse lo más sencillo posible	<ul style="list-style-type: none"> Pese a problemas de eficiencia o justicia, la complicidad y transparencia contribuyen a que los usuarios entiendan mejor el proyecto y calculen fácilmente su costo. La etapa de definición del proyecto debe establecer los límites de complejidad discutiéndolos con los futuros usuarios.
Deben cobrarse tasas de descuento especiales cuando el sistema entre en operación	<ul style="list-style-type: none"> Es más sencillo aumentar las tarifas una vez que el proyecto ha sido implementado y aceptado que reducirlas para aliviar fricciones. La etapa de marketing debe presentar un listado de las tarifas discriminadas por tipo de usuario. Es útil considerar como precio de referencia un boleto de bus.
Es importante buscar un apoyo político amplio y firme	<ul style="list-style-type: none"> El apoyo de actores políticos comprometidos con la política de transporte a largo plazo, independientemente de las ideologías, es un factor determinante en el éxito de este tipo de proyectos.
Los diferentes niveles institucionales deben establecer importantes capacidades de negociación	<ul style="list-style-type: none"> Diversas autoridades de diferente orden tienen injerencia en las redes de transporte urbano y el Estado debe adaptar su normativa para autorizar esquemas de tarificación vial.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (2007).

2. Cobro por movimiento en la zona

Los usuarios pagan la tarifa cada vez que entran en la zona, pero a diferencia del esquema anterior, deben pagar una tarifa adicional por moverse en la malla vial dentro de la zona. Los usuarios que ya se encuentran dentro de la zona no deben pagar la tarifa de entrada, pero sí la tarifa por utilizar las vías.

3. Cobro por distancia recorrida

Los usuarios son identificados al entrar en la zona y se les cobra de acuerdo con la distancia recorrida dentro de ella. Este esquema es de fácil implementación cuando la tarificación por congestión es en una sola vía, ya que se puede identificar rápidamente el punto de entrada y de salida (y, por consiguiente, la distancia recorrida). Dentro de una zona se requiere que el vehículo tenga un sensor intravehicular para rastrear los movimientos.

Existen dos tipos de esquemas de tecnologías de cobro en la actualidad, los electrónicos y los no electrónicos. A continuación, se presentan en detalle cada una de las opciones de tecnología de cobro; sin embargo, es importante tener en cuenta que estos esquemas se aplican frecuentemente de manera combinada dentro de un mismo sistema de cobro.

4.2.1 Sistemas de cobro no electrónico

1. Sistema de papel

El usuario del vehículo privado debe pagar por una licencia de papel o calcomanía adhesiva (de manera mensual o anual) que le da acceso a la zona de tarificación por congestión. El control se realiza con personal ubicado en diferentes puntos a lo largo del cordón. El sistema tiene una vida útil de larga duración; el mantenimiento está relacionado exclusivamente con los canales de distribución de licencias y puntos de control. Este sistema permite discriminar por tipo de vía, vehículo y período del día, mas no por estado del tránsito. Una de las ventajas para el usuario es que permite el prepago; sin embargo, tal como ocurre en

Singapur, esto termina siendo contraproducente para la ciudad. Entre las complejidades del sistema se encuentra la falsificación de licencias y la implementación de un alto número de puntos de control de infractores.

2. Cobro en plazas

El usuario debe pagar por una tarifa cada vez que entra en la zona. Este cobro se realiza en casetas ubicadas en los cordones de acceso a la zona. El cobro en las casetas puede ser manejado por personal o por sistemas automáticos de reconocimiento de tarjetas inteligentes. El sistema tiene una vida útil de larga duración; el mantenimiento está relacionado exclusivamente con los puntos de control. Este sistema permite discriminar por tipo de vía, vehículo y período del día, mas no por estado del tránsito. El cobro prepago se puede realizar si se implementan tarjetas inteligentes. Una de las desventajas del sistema son las colas que se generan cuando los usuarios se detienen a pagar en las casetas. Para solucionar este problema se requiere de una cantidad de espacio público, lo que resulta impráctico en el contexto urbano donde ocurre la mayor parte de la congestión.

4.2.2 Sistemas de cobro electrónico

1. Basados en infraestructura de pórticos o postes

a. Reconocimiento por video y reconocimiento automático de placas (ANPR)

Este sistema consiste en la identificación del vehículo a partir de cámaras instaladas en pórticos sobre la vía o postes adyacentes a esta, las cuales graban y reconocen las placas a partir de un software especializado. Estos dispositivos tienen una amplitud de captura de 5 metros a una distancia de entre 25 y 30 metros de la cámara. La confiabilidad de este sistema es de 95%-98%.

Una vez obtenido el número de la placa (la imagen capturada puede ser procesada en un centro de operaciones o en la misma

cámara si cuenta con el software necesario), se cruza con la información del propietario y se carga el cobro en el sistema.

En caso de que el sistema de reconocimiento del número de la placa no funcione o esta no pueda cruzarse con algún propietario, el proceso se envía a un operador el cual se encarga de finalizarlo. El pago puede hacerse de manera automática si la placa del vehículo está asociada a la cuenta bancaria del usuario. Esta tecnología requiere que haya operarios verificando el correcto reconocimiento de las placas y permite discriminar por tipo de vía, vehículo y período del día. Entre las complejidades del sistema se encuentran su dependencia de la calidad de las lecturas de las placas (que se ve afectada en condiciones climáticas difíciles o por falta de iluminación) para funcionar y la cultura de evasión en la ciudad (modificación de la placa). Debido a esto, las cámaras requieren de limpieza periódica y de dispositivos de iluminación que duran entre 2 y 5 años.

El sistema ANPR se compone de cámara con sistema de localización de placa, sistema de iluminación, módulo de adquisición, software de procesamiento automático y centro de procesamiento manual.

Para el esquema de tarificación vial en la ciudad de Londres (con alrededor de 200 puntos de identificación de placas), se instalaron 650 cámaras, donde cada punto de detección tuvo un valor que oscila entre US\$43.000 y US\$57.000. El costo de operación del sistema de Londres se calcula en aproximadamente US\$45 millones, que corresponde al 40% del valor recaudado por el esquema.

b. **DSRC: Cobro a flujo ininterrumpido mediante transpondedores y pórticos**

Este sistema consiste en un conjunto de sensores emisores y antenas lectoras de señal infrarroja instalados en pórticos o postes,

los cuales se comunican con una unidad intravehicular OBU (por ejemplo, *Thin-Client* o *Thick-Client*) que contiene la información para la fiscalización (número de placa, propietario y clase de vehículo).

Estos dos equipos se comunican a corta distancia, entre 5 y 30 metros, a pesar de que el vehículo transite a una alta velocidad. El sistema tiene una confiabilidad del 99%. Los pórticos están conectados con un centro de procesamiento de datos a través de una red de comunicaciones con un nivel de seguridad apropiado para el envío de información personal de los usuarios y de cobro de los peajes. La cantidad de información que se procesa es proporcional a los niveles de tránsito, por esta razón algunas transacciones se procesan después de las horas pico.

Las unidades intravehiculares tienen una vida útil de cinco años. Este sistema permite discriminar por tipo de vía, vehículo y período del día. Tiene la posibilidad de permitir prepagos y pagos a través de la cuenta bancaria. Una de sus desventajas es el alto costo que resulta de expandir el sistema y la interferencia de las señales debido a la luz solar, el clima o las señales de radio frecuencia. De igual modo, la unidad intravehicular debe ubicarse en un lugar visible a través del parabrisas del vehículo; sin embargo, muchos automóviles modernos tienen una lámina metálica para reflejar el calor que impiden una lectura precisa. Otro problema es que los pórticos en general son estructuras de gran tamaño, que resultan ser bastante molestas para áreas urbanas.

El sistema DSRC requiere de cámaras para la detección, identificación y fiscalización de vehículos; unidades de iluminación; cámaras; lector con antena CEN-DSRC (que permite hacer la lectura de la información de las unidades intravehiculares), y unidades intravehiculares. Un lector con

antena (2 carriles) tiene un costo unitario de US\$6.200, el software de procesamiento, de US\$995 y el sistema intravehicular, de US\$15 a US\$19.

2. Basados en equipos vehiculares

a. **Tecnologías de localización vehicular (VPS) GNSS: GPS/GLONASS/GALILEO**

Por medio de sistemas satelitales (estadounidenses, europeos o rusos) se localizan e identifican los vehículos que entran en la zona de tarificación por congestión. El vehículo que cuenta con una unidad pesada (*Thick-Client*) transmite a los satélites su posición geográfica y la información necesaria para la fiscalización. Debido a la reflexión de las señales a causa de la infraestructura urbana (edificios) es necesario implantar equipos de repetición de señal para amplificarla y asegurar una correcta transmisión. Asimismo, es importante la definición de medidas de seguridad para proteger la información. Las unidades intravehiculares tienen una vida útil de cinco años. Este sistema permite discriminar por tipo de vía, vehículo, período del día y estado del tránsito. En la actualidad, este sistema se utiliza para cobros por distancia recorrida. La expansión del sistema resulta más económica que las tecnologías de localización (este sistema no permite discriminar por estado del tránsito). El mantenimiento del sistema se hace principalmente a las repetidoras de señal y a las cámaras de control de infractores.

Este sistema requiere de unidades intravehiculares que integren un receptor GPS, con el cual se puede localizar la posición geográfica del vehículo y recabar información acerca del tipo de vehículo.

En Alemania, la inversión en este sistema por parte de la compañía Toll Collect está por el orden de los €700 millones, mientras que los costos anuales del sistema

representan aproximadamente €600 millones, entre 16% y 20% de los ingresos.

b. **Sistemas de redes de telefonía celular**

Por último, los sistemas de redes de telefonía celular consisten en la localización geográfica de los vehículos a partir de celulares o unidades intravehiculares. Estos sensores se comunican con las antenas de las redes de telefonía celular transmitiendo la posición del vehículo y la información necesaria para la fiscalización. A pesar de que esta medida no se ha implementado en ninguna ciudad, diferentes pilotos en Estados Unidos (Maryland y California) han demostrado su efectividad. Este sistema permite discriminar por tipo de vía, vehículo y período del día. También permite prepago y pago por medio de cuenta bancaria. Una de las desventajas es la saturación de la red si no existen suficientes transceptores.

A excepción del sistema de reconocimiento por video, el cual tiene un margen de fallas de lectura de entre 10% y 30%, todos los sistemas de cobro tienen una exactitud de reconocimiento alta. En términos de infraestructura, los sistemas de cobro no electrónico y el sistema DSRC tienen un alto impacto urbano. Los sistemas de papel y el cobro manual en plaza requieren de casetas, vallas y puntos de control a lo largo de la zona de tarificación por congestión. El sistema de reconocimiento por video y DSRC requiere de la instalación de pórticos en puntos de cobro y de control a infractores. En cuanto al costo de implementación, los sistemas de cobro electrónico son altos (a excepción del sistema de reconocimiento por video). El DSRC requiere de pórticos, cámaras, antenas, puntos de cobro y control a lo largo de la zona. Las tecnologías de localización vehicular GNSS requieren repetidores de señal, esquemas y tecnologías para la protección de la información y puntos de control. Por último, los sistemas de redes de telefonía celular requieren de transceptores, unidades vehiculares, cámaras para control de infractores y puestos de control.

Es importante mencionar que, dentro de las tecnologías basadas en postes y pórticos, existen tres sistemas de escaneo principales:

- Láser
- Ultrasonido
- Circuito de radiofrecuencias

De estas opciones, el escáner de láser tiene un desempeño alto y un costo de operación y mantenimiento bajo en comparación con las demás opciones; sin embargo, su costo de implementación es alto.

5

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Sobre la metodología propuesta

La metodología desarrollada en este documento permite establecer, a partir de las encuestas de transporte en una ciudad, la elasticidad del uso del automóvil frente a un mayor costo monetario. Este análisis puede realizarse de manera desagregada para diferentes zonas de la ciudad y estratos socioeconómicos. A través de esta metodología se puede obtener la tarifa óptima que se debería aplicar en una zona de la ciudad. El modelo permite simular varias zonas, diferentes horarios y tipos de zonas, y arroja el costo total de congestión que se puede internalizar y el potencial de recaudación de la medida.

5.2 Sobre los resultados en las ciudades analizadas

La elasticidad frente al costo por parte de los usuarios del automóvil es mayor en Santiago, lo que significaría que los usuarios tendrían un mayor grado de predisposición a dejar de usar el automóvil que en Bogotá y Ciudad de México, que cuentan con una menor elasticidad. En el caso de estas últimas, probablemente la mala percepción del transporte público contribuye a que un número menor de usuarios estén dispuestos a cambiar de modo de transporte a pesar de un aumento en el costo del uso del vehículo privado.

El potencial de mejoramiento del tránsito en la zona estudiada en cada ciudad es significativo, y se situaría en alrededor de 5 km/h en Santiago, 6 km/h en Bogotá y 8 km/h en Ciudad de México. Esto generaría una disminución diaria de 28,3%, 28,8% y 24,8% de kilómetros, respectivamente. Por su parte, la internalización del costo de congestión asciende a cerca de US\$70.571 en Bogotá, US\$401.064 en Ciudad de México y US\$137.878 en Santiago. La diferencia radica especialmente en el tamaño de las zonas de congestión escogidas. En contraposición, con una tarifa de US\$0,33 para Bogotá, US\$0,42 para Ciudad de México y US\$0,94 para Santiago (por kilómetro recorrido en la zona de congestión en un período de 12 horas), se podrían recaudar, respectivamente, US\$154.000, US\$611.000 y US\$447.000 por día. El monto de la recaudación representa 16% de los ingresos de Bogotá por concepto de impuesto de vehículos, mientras que asciende a 40% para Santiago y 97% para Ciudad de México. En términos de la capacidad de financiar subsidios o infraestructura de transporte, se observa que, en Bogotá, al tener un sistema no subsidiado con infraestructura de alto costo, la recaudación potencial generada por la tarificación no sería muy representativa. Sin embargo, en el caso de Ciudad de México y Santiago, este impuesto si abriría espacio para cubrir o ampliar los subsidios del sistema de transporte o financiar la construcción de nueva infraestructura.

Es importante señalar que los cálculos obtenidos dependen considerablemente de la información sobre el uso del automóvil en la zona escogida y de la velocidad de operación promedio, y que se llevan a cabo análisis de sensibilidad frente a diversas variables. En la medida en que se cuente con una mejor información, los resultados obtenidos podrían ser más precisos.

5.3 Sobre los desafíos de implementación

Son pocas las iniciativas de tarificación por congestión que han logrado implementarse a nivel mundial. La decisión política de promover una medida generalmente antipopular es fundamental. Son esenciales una clara pedagogía sobre la equidad del cobro y la oportunidad de mejora de modos de transporte más sostenibles.

Es necesario impulsar procesos de consulta a la ciudadanía en general y de manera más detallada a los actores dentro de la zona de influencia del proyecto. Igualmente, resulta importante explicar a la ciudadanía que, de no implementarse proyectos como la tarificación por congestión, las condiciones de movilidad de las zonas afectadas tenderán a empeorar. Por su parte, los procesos de negociación para establecer tarifas diferenciales a residentes y definir condiciones para el transporte de carga, taxis y eventualmente motos son también elementos críticos en las ciudades de América Latina.

Se espera que con la implementación de un esquema de tarificación por congestión un número de usuarios del automóvil opten por usar el

transporte público; por lo tanto, para mantener la calidad y confort adecuados, es necesario realizar inversiones para mejorarlo. En Londres, buena parte de los recursos captados a través del esquema de tarificación por congestión se ha destinado a mejorar el sistema de buses.

La operación de sistemas existentes y los estudios conexos realizados muestran que la implementación de un sistema de tarificación por congestión debería ser autosostenible en términos financieros. En esta línea, únicamente las políticas de estacionamiento garantizan resultados similares a los de tarificación por congestión, pues apuntan a las zonas y horas de mayor congestión. Sin embargo, estas políticas también generan desafíos importantes desde el punto de vista fiscal, institucional y de fiscalización.

Por su parte, las tecnologías para la recaudación y el control de la tarificación por congestión están disponibles en el mercado y, como lo muestran algunos estudios recientes, son costeables dentro del marco tarifario calculado para internalizar los costos de congestión. Se recomienda implementar una tecnología mixta, entre reconocimiento por video y DSRC. Este último permite detectar el vehículo por medio de unidades intravehiculares y cobrar la tarifa indicada. Si el sistema no funciona, entra en operación el sistema de reconocimiento por video, el cual toma una fotografía de la placa para verificar si el usuario realizó el pago. El costo del sistema base para operar este esquema ronda los US\$6 millones, y el costo unitario por punto de cobro (pórtico con reconocimiento por video y DSRC) es de aproximadamente US\$380.000.

Bibliografía

- Banco de Desarrollo de América Latina - CAF. 2010. *Observatorio de Movilidad Urbana - OMU*. Disponible en: <http://www.caf.com/es/temas/o/observatorio-de-movilidad-urbana/>.
- Banco de Desarrollo de América Latina - CAF. 2011. "Desarrollo urbano y movilidad en América Latina". Dirección de Análisis y Programación Sectorial. Disponible en: https://www.caf.com/media/4203/desarrollourbano_y_movilidad_americalatina.pdf.
- Banco Interamericano de Desarrollo. 2013. "Guía práctica: Estacionamiento y políticas de reducción de congestión en América Latina". Washington, D.C.: BID.
- Banister, D. 1994. "Equity and acceptability questions in internalising the social cost of transport." En: *Internalising the Social Costs of Transport* (pp. 153-176), European Conference of Ministries of Transport (Ed.). París.
- Baron, J. 1995. "Blind Justice: Fairness to groups and do-no-harm principle." *Journal of Behavioral Decision Making*, 8: 71-83.
- Bartley, B. 1995. "Mobility impacts, reactions and opinions. Traffic demand management options in Europe: The MIRO Project." *Traffic Engineering and Control*, 596-602.
- Brännlund, R. y I. Gren. 1999. *Green Taxes: Economic Theory and Empirical Evidence from Scandinavia*. Cheltenham: E. Elgar.
- Buehler, R. 2010. "Transport Policies, Automobile Use, and Sustainable Transport: A Comparison of Germany and the United States." *Journal of Planning Education and Research*, 30 (1), 76-93.
- Campodónico, H. 2009. "Gestión de la industria petrolera en períodos de altos precios del petróleo en países seleccionados de América Latina". CEPAL: Santiago de Chile. Disponible en: http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6351/S0900832_es.pdf;jsessionid=471BC5A7407E6971C0DD463191D2C7C4?sequence=1.
- Carrot. 2015. "Sistema de vehículo compartido Carrot". Disponible en: <http://carrotshare.carrot.mx/inicio>.
- Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques. 2007. "Urban road pricing. The question of acceptability." Disponible en: <https://www.polisnetwork.eu/uploads/Modules/PublicDocuments/Urban%20Road%20pricing.pdf>.
- Clean Air Institute. 2012. "Gestión de la demanda de transporte: oportunidades para mitigar sus externalidades y las de los vehículos automotores en América Latina". Washington, D.C.: Clean Air Institute. Disponible en: http://www.cleanairinstitute.org/cop_gd/wp-content/uploads/2012/08/doc_completo_gdt_politica.pdf.

- Comisión Nacional de Energía. 2015. "Sistema de información en línea de precios de combustibles en estaciones de servicio". Disponible en: <http://www.bencinaenlinea.cl/web2/>.
- Crotte, A., C. Arvizu, A. P. Taddia, E. Diez-Roux y J. Garduño. 2017. "Mejores prácticas internacionales de fondeo y financiamiento para el transporte público urbano". Washington, D.C.: BID.
- de Grange, L., F. González y R. Troncoso. 2015. "Estimates of price elasticity of demand for urban freeway use with high-frequency control variables: the case of Santiago, Chile." *Applied Economics*, 47(22), 2326-2337.
- Diefenbacher, H., V. Teichert y S. Wilhelmy. 2004. "How have ecotaxes worked in Germany?," *Feasta Review 2: Growth: The Celtic Cancer*, Dublin: Feasta.
- Dong, J., D. Davidson, F. Southworth y T. Reuscher. 2012. "Analysis of Automobile Travel Demand Elasticities with Respect to Travel Cost."
- Ecola, L. y T. Light. 2009. "Equity and Congestion Pricing. A Review of the Evidence." RAND Corporation. Santa Monica, CA: RAND Corporation. Disponible en: https://www.rand.org/pubs/technical_reports/TR680.html.
- Forsman, A. e I. Engstrom. 2005. *The Composition and Use of the Swedish Car Fleet: Formulation of a Forecasting System*. Linköping.
- Foster, C. 1974. "The regressiveness of road pricing." *International Journal of Transport Economics*, 1 (2), 133-141.
- Foster, C. 1975. "A note on the distributional effects of road pricing: a coment." *Journal of Transport Economics and Policy*, 9, 186-187.
- Giuliano, G. 1992. "An assessment of the political acceptability of congestion pricing." *Transportation*, 19, 335-358.
- Giuliano, G. 1994. "Equity and fairness consideration of congestion pricing." En: *Curbing Gridlock: Peak Period Fees to Relieve Traffic Congestion*. Transportation Research Board.
- GIZ. 2012. *Reducing Carbon Emissions through Transport Demand Management Strategies*. Beijing. Disponible en: http://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/B_Technical-Documents/GIZ_SUTP_TD_Reducing-Carbon-Emissions-through-TDM-Strategies_EN.pdf.
- Golob, T. 2001. "Joint models of attitude and behaviour in evaluation of the San Diego I-15 congestion pricing project." *Transportation Research A*, 35, 495-514.
- Google. 2015. *Google Maps*. Fecha de acceso: 19 de septiembre de 2015 (<https://www.google.com/maps/@4.6482975,-74.107807,11z./data=!5m1!1e1>).
- GTZ. 2009. "Gestión de la demanda de transporte". Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. Disponible en: http://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/H_Training-Material/GIZ_SUTP_TM_Transportation-Demand-Management_ES.pdf.
- Gu, Z., Z. Liu, Q. Cheng y M. Saberi. 2018. "Congestion Pricing Practices and Public Acceptance: A Review of Evidence." *Case Studies on Transport Policy*. Elsevier.
- Harsman, B. 2001. "Urban road pricing acceptance." Presentado en el seminario IMPRINT-EUROPE en Bruselas. Disponible en: http://www.movinginalivableregion.ca/wp-content/uploads/2013/06/urban_road_pricing_acceptance.pdf.
- Hau, T. D. K. 1992. "Economic fundamentals of road pricing: a diagrammatic analysis". Vol. 1070, World Bank Publications.
- INEGI. 2007. "Encuesta Origen Destino 2007. Base de datos y manuales". México D.F.
- INEGI. 2007a. "Encuesta Origen Destino 2007: Tu respuesta es el mejor camino". México D.F.
- Jakobsson, C., S. Fujii y T. Gärling. 2000. "Determinant of private car use acceptance of road pricing." *Transport Policy*, 7, 153-158.
- Jang, T. 2005. "Count Data Models for Trip Generation." *Journal of Transportation Engineering*, 131 (5), 444-450.
- Jones, P. 1991. "Gaining public transport support for road pricing through a package approach." *Traffic Engineering and Control*, 32, 194-196.
- Jones, P. 1998. "Urban road pricing: Public acceptability and barriers to implementation." En: K.

- B. Verhoef (Ed.), *Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment*.
- Jones, P. 2001. "Addressing equity concerns in relation to road user charging." Trondheim, Noruega.
- Jones, P. T. Grosvenor y D. Wofinden. 1996. "Public attitudes to transport policy and the environment." *Summary Report to the Department of Transport*.
- Langmyhr, T. 1997. "Managing equity: The case of road pricing." *Transport Policy*, 4, 25-39.
- Levinson, D. 2010. "Equity effects of road pricing: A review." *Transport Reviews*, 30 (1), 33-57.
- Litman, T. 1996. "Using road pricing revenue: Economic efficiency and equity considerations." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1558, 24-28.
- Mahendra, A. 2004. *Congestion Pricing in Cities of the Developing World: Exploring Prospects in Mexico City* (Doctoral Dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Mahendra, A. 2008. "Vehicle restrictions in four Latin American cities: Is congestion pricing possible?" *Transport Reviews*, Volume 28, Issue 1, pp. 105-133.
- McMullen, B. S., K. Nakahara, S. Biswas, L. Zhang y D. Valluri. 2008. *Techniques for assessing the socio-economic effects of vehicle mileage fees. Final Report*. Oregon State University. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/1a2f/2e6c12d83a16ad6c587ceffb2e07301a33d3.pdf>.
- Medina, C. A. y C. E. Vélez. 2011. "Aglomeración económica y congestión vial: los perjuicios por racionamiento del tráfico vehicular". Banco de la República.
- Miller, J. y M. Vela. 2013. "Are Environmentally Related Taxes Effective?", IDB Working Paper Series; 467. Washington, D.C.: BID. Disponible en: <https://www.cbd.int/financial/mainstream/idb-tax.pdf>.
- Miller, S. y R. Wilson. 2015. "Parking Taxes as a Second-Best Congestion Pricing Mechanism." IDB Working Paper Series N° IDB-WP-614. Washington, D.C.: BID. Disponible en: <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/7290/Parking-Taxes-as-a-Second-Best-Congestion-Pricing-Mechanism.pdf?sequence=1>.
- Ortuzar, J. D. y L. G. Willumsen. 2011. *Modelling Transport*. Wiley.
- Owen, R., A. Sweeting, S. Clegg, C. Musselwhite y G. Lyons. 2008. *Public Acceptability of Road Pricing*. Final Report for Department for Transport.
- Parry, I. 2011. "Reforming the Tax System to Promote Environmental Objectives: An Application to Mauritius", IMF Working Paper, WP/11/124.
- Pigou, A. C. 2005. *The Economics of Welfare*. New York: Cosimo Classics.
- Pike, E. 2010. "Congestion charging: challenges and opportunities." ICCT.
- Prud'homme, R. y J. P. Bocarejo. 2005. "The London congestion charge: A tentative economic appraisal." *Transport Policy*, 12 (3), 279-287.
- Rajé, F. 2003. "The impact of transport on social exclusion processes with specific emphasis on road user charging." *Transport Policy*, 10, 321-338.
- Revista Planeo. 2012. "Las Autopistas, los desplazamientos y la movilidad: Santiago de Chile". Santiago.
- Rivasplata, C. 2013. "Congestion pricing for Latin America: Prospects and constraints." *Research in Transportation Economics*, 40, 56-65.
- Rodríguez, P. y E. Behrentz. 2009. "Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá, a través de mediciones directas". Universidad de los Andes. Bogotá.
- Santos, G., H. Behrendt, L. Maconi, T. Shirvani y A. Teytelboym. 2010a. "Part I: Externalities and economic policies in road transport." *Research in Transportation Economics* 28, 1: 2-45.
- Santos, G., H. Behrendt y A. Teytelboym. 2010b. "Part II: Policy instruments for sustainable road transport." *Research in Transportation Economics* 28, 1: 46-91.
- Schlag, B. y U. Teubel. 1997. "Public acceptability of transport pricing." *IATSS Research*, 21, 134-142.

- Scott Cato, M. 2009. *Green Economics: An Introduction to Theory, Policy, and Practice*. London: Earthscan.
- Secretaría de Energía. s/f. “Sistema de Información Energética”. Fecha de acceso: 7 de agosto de 2015 (<http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas>).
- Secretaría del Medio Ambiente, Ciudad de México. 2012. Inventario de emisiones contaminantes y de efecto invernadero 2012.
- Secretaría del Medio Ambiente, Ciudad de México. 2015. “Hoy no circula”. Fecha de acceso: 2 de diciembre de 2015 (<http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sedema/index.php/verificacion-hoy-no-circula/hoy-no-circula>).
- Sheldon, R., M. Scott y P. Jones. 1993. “London congestion charging: Explanatory social research among London residents”. *Proceedings 21st PTRC Summer Annual Meeting Seminar L*, 129-145.
- Sigma Gestión de Proyectos-Systra. 2013. “Estado del arte de las medidas de gestión de la demanda a nivel mundial”. Bogotá.
- Small, K. 1992. “Using the revenues from congestion pricing.” *Transportation*, 19, 359-381.
- Steer Davies Gleave. 2009. “Tarificación vial por congestión para la Ciudad de Santiago”. Santiago de Chile: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de Chile. Disponible en: <http://transporte-tsp.blogspot.com.ar/2011/05/tarificacion-vial-por-congestion-para.html>.
- Steer Davies Gleave. 2012. *Encuesta de Movilidad para Bogotá, 2011. Tomo II - Informe Final de Consultoría*. Bogotá.
- Steer Davies Gleave. 2012a. *Encuesta de Movilidad para Bogotá, 2011. Manual de Uso de Base de Datos Encuesta Domiciliaria*.
- Timilsina, G. y H. Dulal. 2008. “Fiscal Policy Instruments for Reducing Congestion and Atmospheric Emissions in the Transport Sector: A Review.” Policy Research Working Paper 4652.
- Tyler, N., J. A. Bohórquez, J. P. B. Suescún y J. M. Velásquez. 2013. “Cobro de congestión en ciudades colombianas.” University College London-Universidad de los Andes.
- Unidad de Planeación Minero Energética. 2015. “Unidad de Planeación Minero Energética, Sistema de información de Petróleo y Gas Colombiano”. Fecha de acceso: 7 de agosto de 2015 (http://www.upme.gov.co/GeneradorConsultas/Consulta_Indicador.aspx?IdModulo=3&ind=8).
- Unión temporal SDG-PHR-AKIRIS. 2014. “Elaborar los estudios, diseños y estructuración técnica, financiera y legal del proyecto cobros por congestión para la ciudad de Bogotá”. Bogotá.
- Universidad Alberto Hurtado, SECTRA. 2012. *Encuesta Origen Destino de Viajes. Base de Datos*. Santiago de Chile.
- Universidad Alberto Hurtado, SECTRA. 2012a. *Encuesta Origen Destino de Viajes. Informe de Difusión*. Santiago de Chile.
- Universidad Santiago de Chile, Departamento de Física. 2014. “Actualización y sistematización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana. Informe final”. Santiago de Chile.
- Velib. Mairie de Paris. 2010. “How it works?” Fecha de acceso: 20 de septiembre de 2015 (<http://en.velib.paris.fr/How-it-works>).
- Verhoef, E., P. Nijkamp y P. Rietveld. 1997. “The social feasibility of road pricing: a case study for Randsta Area.” *Journal of Transport Economics and Policy*, 31, 255-276.

Anexo 1

Estadísticas descriptivas variables que se emplean en modelos de uso del automóvil

CUADRO A1. Estadísticas descriptivas variables en el modelo de uso diario del automóvil por hogar – Bogotá

Variable	Promedio	Desviación	Observaciones	Mínimo	Máximo
Número de personas	3,65	1,41	1.713	1	12
Número de personas con ingreso	1,93	0,90	1.713	1	9
Número de vehículos	1,39	0,65	1.713	1	6
Número de trabajadores	1,8	1,01	1.713	0	9
Número de estudiantes	0,92	0,98	1.713	0	5
Número de licencias de conducir	1,62	1,11	1.713	0	6
Número de viajes en automóvil	5,2	3,73	1.713	1	39
Valor del tiempo (US\$/min.)	0,11	0,09	1.713	0,0038	0,46
Ingreso del hogar (US\$/mes)	1.677,36	1.215,73	1.713	148,94	4.449,39
Tiempo de viaje en automóvil (min./día)	214,44	159,66	1.713	10	1.047
Distancia de viaje en automóvil (km/día)	29,60	26,30	1.713	0,78	211,6
Costo asociado al combustible (US\$/día)	4,36	3,87	1.713	0,11	31,16
Costo de estacionamiento (US\$/día)	1,65	4,76	1.713	0	100
Costo de operación (US\$/ día)	9,44	8,57	1.713	0,20	105,08
Log_costo_km	-1,40	0,86	1.713	-3,55	2,03
Log_distancia_viaje	1,59	0,94	1.713	-2,25	4,28

Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de Steer Davies Gleave (2012a).

Nota: Valores monetarios de 2011.

CUADRO A2. Estadísticas descriptivas variables en el modelo de uso diario del automóvil por hogar – Santiago

Variable	Promedio	Desviación	Observaciones	Mínimo	Máximo
Número de personas	3,59	1,50	2.609	1,00	11,00
Número de personas con ingreso	1,81	0,90	2.609	1,00	7,00
Número de vehículos	1,34	0,62	2.609	1,00	6,00
Número de trabajadores	1,11	1,09	2.609	0,00	7,00
Número de estudiantes	1,68	0,90	2.609	0,00	6,00
Número de licencias de conducir	1,78	0,88	2.609	0,00	7,00
Número de viajes en automóvil	4,92	3,76	2.609	1,00	30,00
Valor del tiempo (US\$/min.)	0,14	0,15	2.609	0,01	2,64
Ingreso del hogar (US\$/mes)	2.471,52	2.400,31	2.609	151,70	30.404,63
Tiempo de viaje en automóvil (min./día)	117,07	78,94	2.609	10,00	645,00
Distancia de viaje en automóvil (km/día)	33,82	35,67	2.609	1,00	646,60
Costo asociado al combustible (US\$/día)	2,06	2,17	2.609	0,06	39,41
Costo de estacionamiento (US\$/día)	0,42	1,58	2.609	0,00	24,64
Costo de operación (US\$/día)	3,68	3,88	2.609	0,11	70,38
Log_costo_km	-8,55	0,87	2.609	-11,09	-4,98
Log_distancia_viaje	1,97	0,91	2.609	-1,17	5,78

Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de la Universidad Alberto Hurtado, SECTRA (2012).

Nota: Valores monetarios de 2012.

CUADRO A3. Estadísticas descriptivas variables en el modelo de uso diario del automóvil por hogar – Ciudad de México

Variable	Promedio	Desviación	Observaciones	Mínimo	Máximo
Número de personas	3,55	1,44	6.961	1	8
Número de vehículos	1,52	0,77	6.961	1	6
Número de trabajadores	1,86	0,99	6.961	0	7
Número de estudiantes	0,49	0,76	6.961	0	5
Número de viajes en automóvil	3,80	2,45	6.961	1	23
Valor del tiempo (US\$/min.)	0,08	0,11	6.961	0,02	4,80
Ingreso del hogar (US\$/mes)	1.715,68	2.257,09	6.961	189,82	75.930,14
Tiempo de viaje en automóvil (min./día)	157,81	116,21	6.961	0	1.370
Distancia de viaje en automóvil (km/día)	33,89	28,56	6.961	0,086	273,464
Costo asociado al combustible (US\$/día)	1,98	1,67	6.961	0,007	16,01
Costo de estacionamiento (US\$/día)	0,48	2,04	6.961	0	60,74
Costo de operación (US\$/ día)	3,54	2,99	6.961	0,014	28,59
Log_costo_km	0,13	0,35	6.961	-0,88	2,17
Log_distancia_viaje	0,85	0,39	6.961	-1,37	1,86

Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de INEGI (2007).

Nota: Valores monetarios de 2007.

Anexo 2

Otros modelos de uso del automóvil

Bogotá

```
. reg log_dist_viaje log_costo_km_viaje viajesprivado ingreso_valor trabajadores,robust
```

Linear regression

Number of obs = 1712
 F(4, 1707) = 139,67
 Prob > F = 0,0000
 R-squared = 0,4043
 Root MSE = ,72806

log_dist_viaje	Coef.	Robust Std. Err.	t	P > t	[95% Conf. Interval]	
log_costo_km_viaje	-,8298044	,0358864	-23,12	0,000	-,9001904	-,7594185
viajesprivado	-,1906085	,0104058	-18,32	0,000	-,211018	-,1701989
ingreso_valor	1,62e-07	1,12e-08	14,51	0,000	1,40e-07	1,84e-07
trabajadores	-,1167479	,0194446	-6,00	0,000	-,1548856	-,0786101
_cons	7,359524	,2488134	29,58	0,000	6,871513	7,847535

```
. reg log_dist_viaje log_costo_viaje_km ingreso_valor_millones licenciacarro trabajadores veh_total
```

Source	SS	df	MS
Model	100,049906	5	20,0099812
Residual	1419,04973	1707	,831312086
Total	1519,09964	1712	,887324554

Number of obs = 1713
 F(5, 1707) = 24,07
 Prob > F = 0,0000
 R-squared = 0,0659
 Adj R-squared = 0,0631
 Root MSE = ,91176

(continúa en la página siguiente)

(continuación)

	Coef.	Std. Err.	t	P > t	[95% Conf. Interval]	
log_dist_v~e						
log_costo_~m	-,2793809	,0297581	-9,39	0,000	-,3377472	-,2210147
ingreso_va~s	,0266144	,0125939	2,11	0,035	,0019134	,0513154
licenciaca-o	-,0953013	,0216804	-4,40	0,000	-,1378243	-,0527783
trabajadores	-,0253438	,023538	-1,08	0,282	-,0715101	,0208224
veh_total	-,0271451	,0391001	-0,69	0,488	-,1038343	,0495441
_cons	3,450908	,1921419	17,96	0,000	3,07405	3,827767

Santiago

. reg log_distancia_viaje log_costo_viaje_km_final viajes_carro veh_propio ingresosfinal trabaja alguna_licencia

Source	SS	df	MS	
Model	735,382355	6	122,563726	Number of obs = 2609 F(6, 2602) = 222,54 Prob > F = 0,0000 R-squared = 0,3391 Adj R-squared = 0,3376 Root MSE = ,74213
Residual	1433,05246	2602	,550750368	
Total	2168,43481	2608	,831455067	

	Coef.	Std. Err.	t	P > t	[95% Conf. Interval]	
log_distancia_viaje						
log_costo_viaje_km_final	-,7232371	,0216191	-33,45	0,000	-,7656295	-,6808448
viajes_carro	-,1726853	,0055512	-31,11	0,000	-,1835705	-,1618001
veh_propio	,1454077	,0286473	5,08	0,000	,0892338	,2015815
ingresofinal	2,87e-07	1,54e-08	18,68	0,000	2,57e-07	3,17e-07
trabaja	-,1000049	,014465	-6,91	0,000	-,1283691	-,0716407
alguna_licencia	,0562606	,0205049	2,74	0,006	,0160531	,0964682
_cons	5,404533	,1116375	48,41	0,000	5,185625	5,62344

. reg log_distancia_viaje log_costo_km_viaje viajes_carro veh_propio ingresoshogar personas_num alguna_licencia, robust

Linear regression

Number of obs = 2609
F(6, 2602) = 140,16
Prob > F = 0,0000
R-squared = 0,3219
Root MSE = ,82802

	Coef.	Robust Std. Err.	t	P > t	[95% Conf. Interval]	
log_distancia_vi~e						
log_costo_km_viaje	-,6239149	,0262228	-23,79	0,000	-,6753346	-,5724953
viajes_carro	-,2081562	,0083306	-24,99	0,000	-,2244915	-,1918208
veh_propio	,2788917	,0300257	9,29	0,000	,2200151	,3377684

(continúa en la página siguiente)

(continuación)

log_distancia_vi~e	Coef.	Robust Std. Err.	t	P > t	[95% Conf. Interval]	
ingresohogar	2,69e-07	2,23e-08	12,05	0,000	2,25e-07	3,13e-07
personas_num	-,0578616	,0119811	-4,83	0,000	-,0813551	-,0343682
alguna_licencia	,0735714	,0235892	3,12	0,002	,0273158	,119827
_cons	7,418849	,066244	111,99	0,000	7,288952	7,548745

. reg log_distancia_viaje log_costo_km_viaje viajes_carro veh_propio ingresohogar trabaja alguna_licencia,robust

Linear regression

Number of obs = 2609
F(6, 2602) = 147,70
Prob > F = 0,0000
R-squared = 0,3336
Root MSE = ,82081

log_distancia_vi~e	Coef.	Robust Std. Err.	t	P > t	[95% Conf. Interval]	
log_costo_km_viaje	-,6526256	,0262371	-24,87	0,000	-,7040732	-,601178
viajes_carro	-,2064961	,0083283	-24,79	0,000	-,2228268	-,1901654
veh_propio	,2658757	,029576	8,99	0,000	,2078808	,3238706
ingresohogar	2,75e-07	2,21e-08	12,49	0,000	2,32e-07	3,19e-07
trabaja	-,1342261	,0165932	-8,09	0,000	-,1667633	-,1016888
alguna_licencia	,0695404	,0222123	3,13	0,002	,0259848	,113096
_cons	7,293231	,0647603	112,62	0,000	7,166245	7,420218

. reg log_distancia_viaje log_costo_viaje_km_final viajes_carro veh_propio trabaja estudia ingresofinal

Source	SS	df	MS	Number of obs = 2609 F(6, 2602) = 228,13 Prob > F = 0,0000 R-squared = 0,3447 Adj R-squared = 0,3432 Root MSE = ,73898		
Model	747,491295	6	124,581883			
Residual	1420,94352	2602	,546096663			
Total	2168,43481	2608	,831455067			

log_distancia_viaje	Coef.	Std. Err.	t	P > t	[95% Conf. Interval]	
log_costo_viaje_km_final	-,7250077	,0215158	-33,70	0,000	-,7671975	-,6828179
viajes_carro	-,171114	,0054767	-31,24	0,000	-,1818531	-,160375
veh_propio	,1622219	,0259326	6,26	0,000	,1113713	,2130724
trabaja	-,0941382	,0142478	-6,61	0,000	-,1220765	-,0661999
estudia	,0924844	,0169515	5,46	0,000	,0592446	,1257241
ingresofinal	2,77e-07	1,54e-08	17,91	0,000	2,46e-07	3,07e-07
_cons	5,333293	,1121774	47,54	0,000	5,113327	5,553259

Ciudad de México

. reg log_distancia_viaje log_costo_km_viaje fingresome uso_auto estudiante trabaj veh_hogar

Source	SS	df	MS			
Model	241,478469	6	40,2464115	Number of obs = 6961		
Residual	799,944508	6954	,115033723	F(6, 6954) = 349,87		
Total	1041,42298	6960	,149629738	Prob > F = 0,0000		
				R-squared = 0,2319		
				Adj R-squared = 0,2312		
				Root MSE = ,33917		

log_distan~e	Coef.	Std. Err.	t	P > t	[95% Conf. Interval]	
log_costo_~e	-,6359944	,014868	-42,78	0,000	-,6651403	-,6068486
fingresome	2,79e-06	1,53e-07	18,19	0,000	2,49e-06	3,09e-06
uso_auto	-,0478575	,0013936	-34,34	0,000	-,0505893	-,0451257
estudiante	-,0226109	,005492	-4,12	0,000	-,033377	-,0118448
trabaj	-,0024645	,0042754	-0,58	0,564	-,0108456	,0059165
veh_hogar	,0082853	,005804	1,43	0,153	-,0030923	,019663
_cons	1,108004	,0129774	85,38	0,000	1,082564	1,133443

. reg log_distancia_viaje log_costo_km_viaje fingresome uso_auto trabaj veh_hogar

Source	SS	df	MS			
Model	239,52866	5	47,9057319	Number of obs = 6961		
Residual	801,894317	6955	,115297529	F(5, 6955) = 415,50		
Total	1041,42298	6960	,149629738	Prob > F = 0,0000		
				R-squared = 0,2300		
				Adj R-squared = 0,2294		
				Root MSE = ,33955		

log_distan~e	Coef.	Std. Err.	t	P > t	[95% Conf. Interval]	
log_costo_~e	-,6280314	,0147586	-42,55	0,000	-,6569627	-,5991001
fingresome	2,74e-06	1,53e-07	17,92	0,000	2,44e-06	3,04e-06
uso_auto	-,0481991	,0013927	-34,61	0,000	-,0509292	-,045469
trabaj	-,0012448	,00427	-0,29	0,771	-,0096153	,0071256
veh_hogar	,0068728	,0058005	1,18	0,236	-,0044979	,0182436
_cons	1,098456	,0127832	85,93	0,000	1,073397	1,123515

(continúa en la página siguiente)

(continuación)

. reg log_distancia_viaje log_costo_km_viaje uso_auto trabaj veh_hogar

Source	SS	df	MS			
Model	202,513247	4	50,6283117	Number of obs = 6961		
Residual	838,90973	6956	,120602319	F(4, 6956) = 419,80		
Total	1041,42298	6960	,149629738	Prob > F = 0,0000		
				R-squared = 0,1945		
				Adj R-squared = 0,1940		
				Root MSE = ,34728		

log_distan~e	Coef.	Std. Err.	t	P > t	[95% Conf. Interval]	
log_costo_~e	-,5230087	,0138528	-37,75	0,000	-,5501645	-,495853
uso_auto	-,0410773	,0013651	-30,09	0,000	-,0437534	-,0384012
trabaj	,0083096	,0043329	1,92	0,055	-,0001843	,0168034
veh_hogar	,022944	,0058611	3,91	0,000	,0114545	,0344335
_cons	1,069586	,0129697	82,47	0,000	1,044162	1,095011

Anexo 3

Definición de curvas para la determinación de la tarificación por congestión

Las curvas empleadas para la determinación de la tarificación por congestión se describen de este modo:

- **Curva de costo individual $I(q)$**

$$I(q) = \text{Costo}_{km} + tv = \text{Costo}_{km} + \left(\frac{1}{s(q)}\right)v = \text{Costo}_{km} + \left(\frac{1}{\alpha - \beta q}\right)v \quad (1)$$

Donde:

Variable	Unidades	Definición
Costo_{km}	US\$/km	Suma del costo de operación y del tiempo empleado en viajar un kilómetro en automóvil
v	US\$/h	Valor del tiempo
t	h	Tiempo de viaje
$s(q)$	km/h	Función de velocidad de circulación determinada por la demanda q de la vía
α	km/h	Velocidad a flujo libre
β		Tasa de reducción de velocidad con relación a la demanda de la zona
q	Veh.-km	Demanda de viajes en la zona

- **Curva de costo marginal social $S(q)$**

$$I(q) = S(q) = I(q) + I'(q) * q \quad (2)$$

Donde:

$I'(q)$: Derivada de la función de costo individual

- **Curva de demanda $D(q)$**

$$D(q) = q_0 + m * q \quad (3)$$

Donde:

m : pendiente de la curva de demanda

Anexo 4

Estimación de curvas para la determinación de la tarificación por congestión

ECUACIONES CURVAS – BOGOTÁ

Función de costo individual

$$I(q) = 0,25 + \left(\frac{1}{40 - 0,036 * q} \right) * 11,24$$

Función de costo social

$$S(q) = 0,25 + \left(\frac{1}{40 - 0,036 * q} \right) * 11,24 + \frac{0,40 * q}{(40 - 0,036 * q)^2}$$

Función de demanda

$$D(q) = 1,45 - 0,00083 * q$$

ECUACIONES CURVAS – SANTIAGO

Función de costo individual

$$I(q) = 0,22 + \left(\frac{1}{40 - 0,008 * q} \right) * 11,15$$

Función de costo social

$$S(q) = 0,22 + \left(\frac{1}{40 - 0,008 * q} \right) * 8,2 * 1,35 + \frac{0,09 * q}{(40 - 0,008 * q)^2}$$

Función de demanda

$$D(q) = 1,32 - 0,00023 * q$$

ECUACIONES CURVAS – CIUDAD DE MÉXICO

Función de costo individual

$$I(q) = 0,11 + \left(\frac{1}{40 - 0,014 * q} \right) * 7,62$$

Función de costo social

$$S(q) = 0,11 + \left(\frac{1}{40 - 0,014 * q} \right) * 7,62 + \frac{0,11 * q}{(40 - 0,014 * q)^2}$$

Función de demanda

$$D(q) = 1,21 - 0,00020 * q$$

Anexo 5

Análisis de sensibilidad: caso de Bogotá

Sensibilidad frente a la velocidad

GRÁFICO A1. Sensibilidad de la tarifa frente a la velocidad promedio de circulación

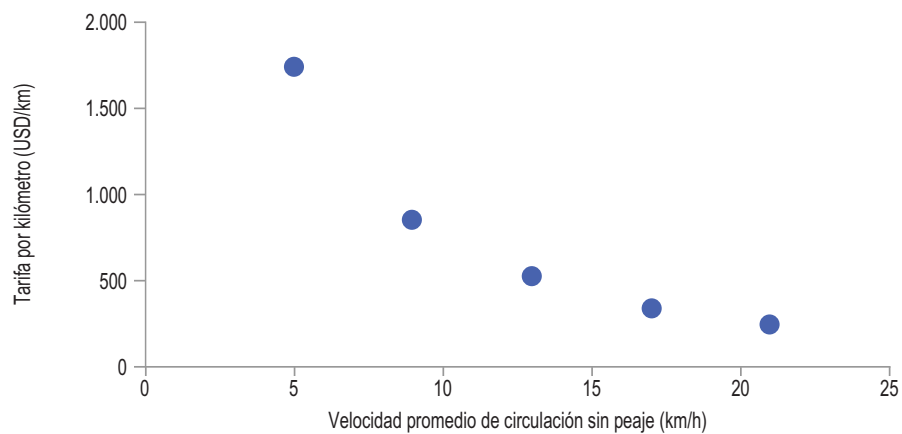


GRÁFICO A2. Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente a la velocidad promedio de circulación

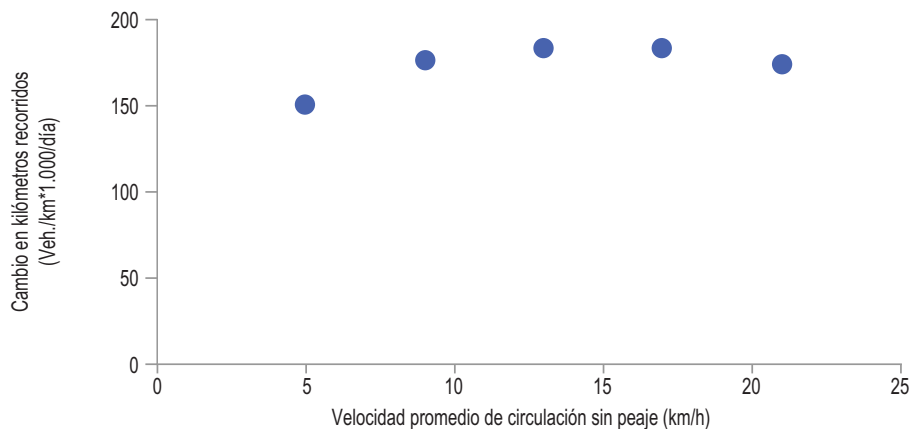


GRÁFICO A3. Sensibilidad del costo de congestión frente a la velocidad promedio de circulación

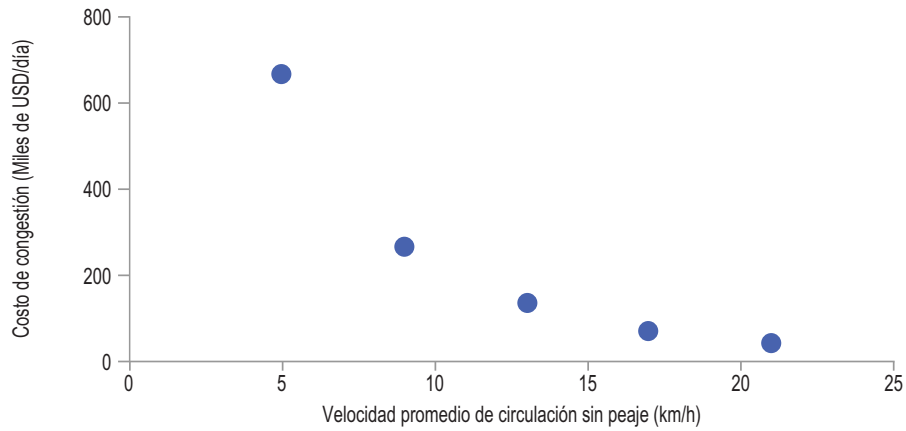


GRÁFICO A4. Sensibilidad de la recaudación frente a la velocidad promedio de circulación

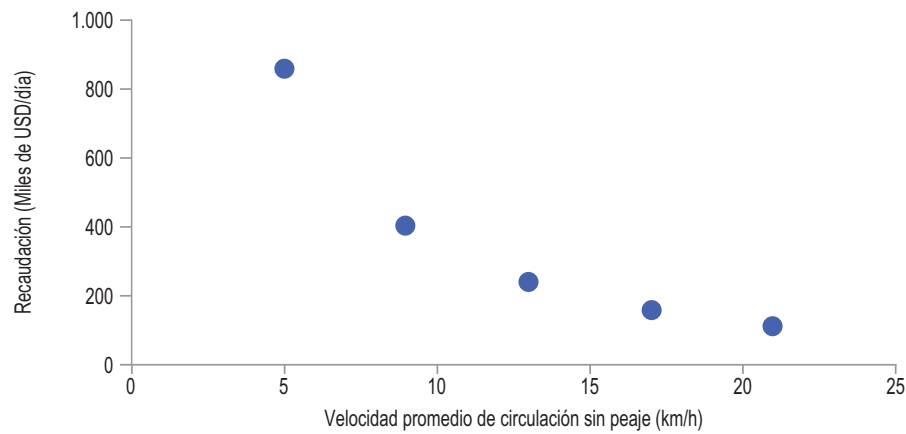
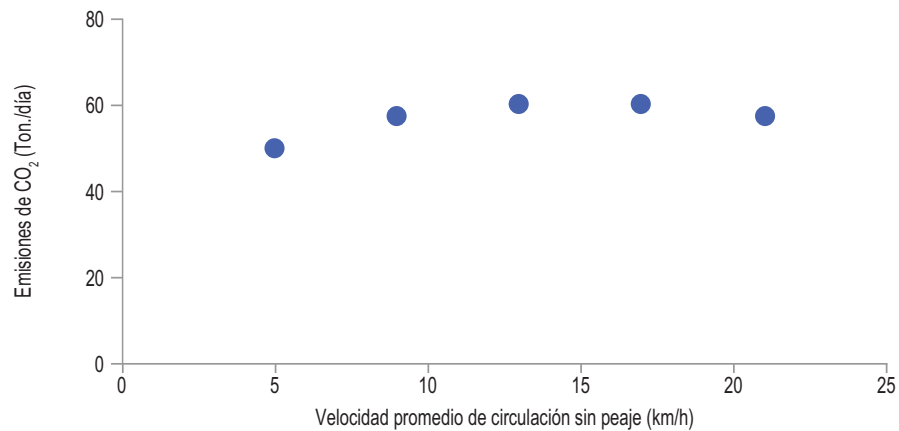


GRÁFICO A5. Sensibilidad de la reducción de emisiones de CO₂ frente a la velocidad promedio de circulación



Sensibilidad frente al valor del tiempo

GRÁFICO A6. Sensibilidad de la tarifa frente al valor del tiempo

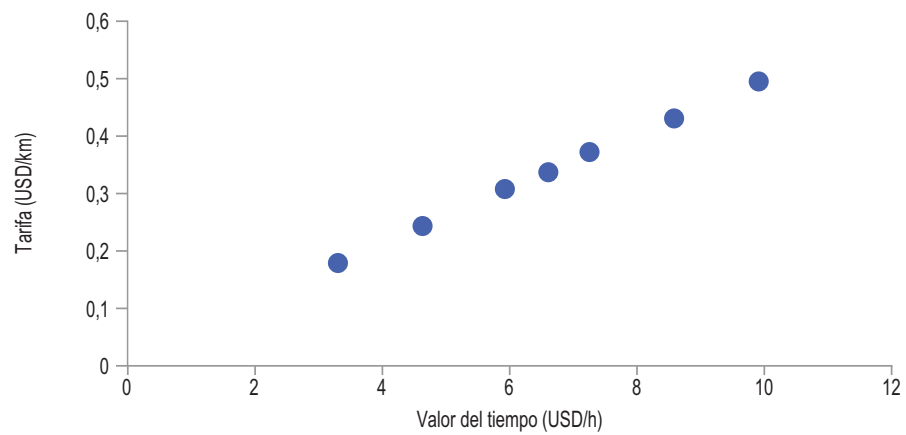


GRÁFICO A7. Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente al valor del tiempo

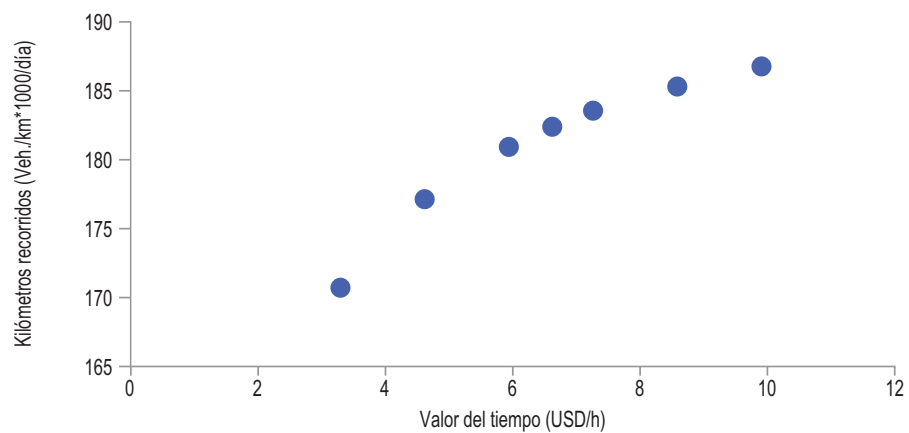


GRÁFICO A8. Sensibilidad del cambio en la velocidad frente al valor del tiempo

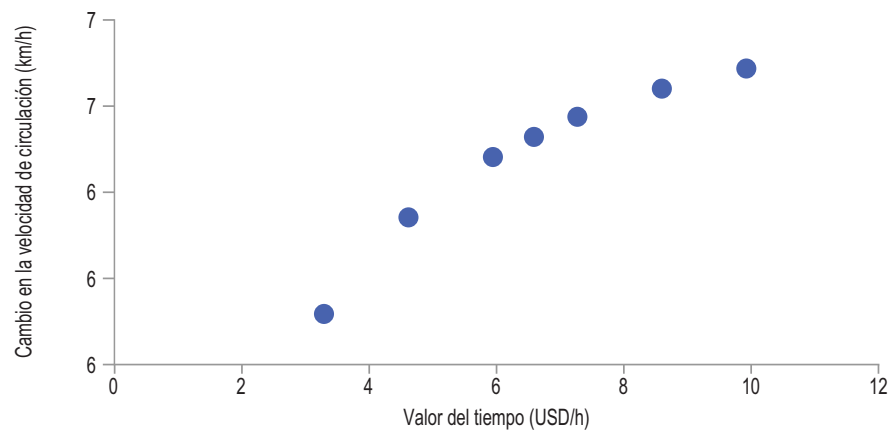


GRÁFICO A9. Sensibilidad del costo de congestión frente al valor del tiempo

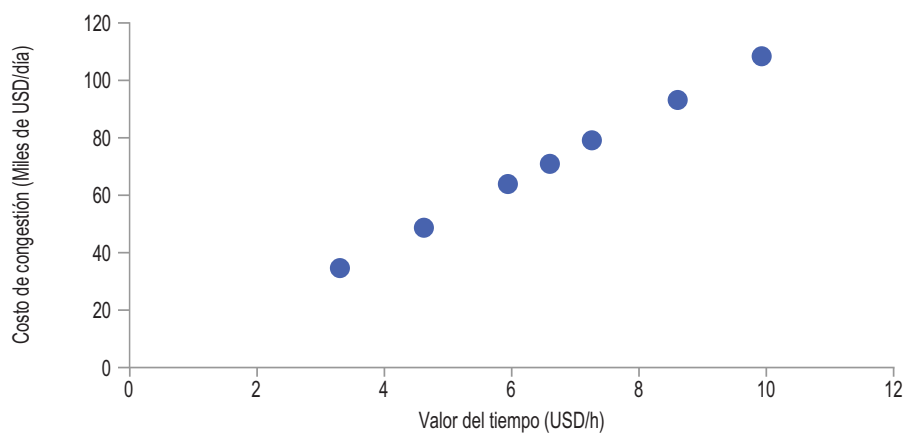


GRÁFICO A10. Sensibilidad de la recaudación frente al valor del tiempo

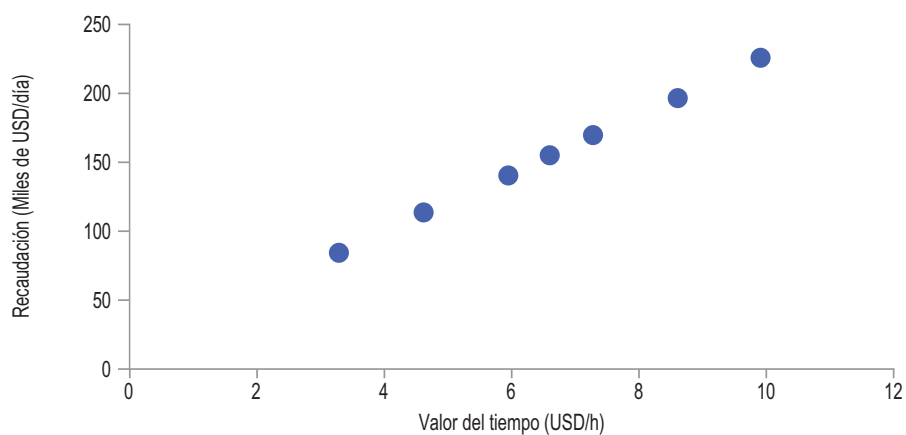
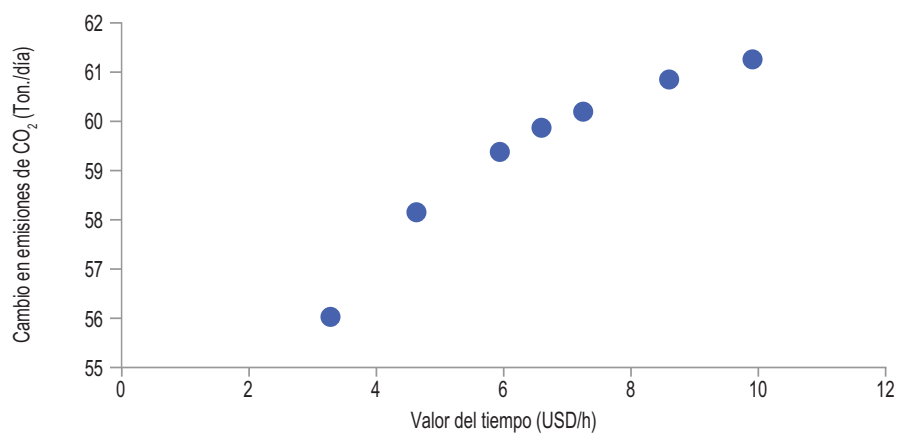


GRÁFICO A11. Sensibilidad del cambio en emisiones de CO₂ frente al valor del tiempo



Sensibilidad frente a la elasticidad

GRÁFICO A12. Sensibilidad de la tarifa frente a la elasticidad

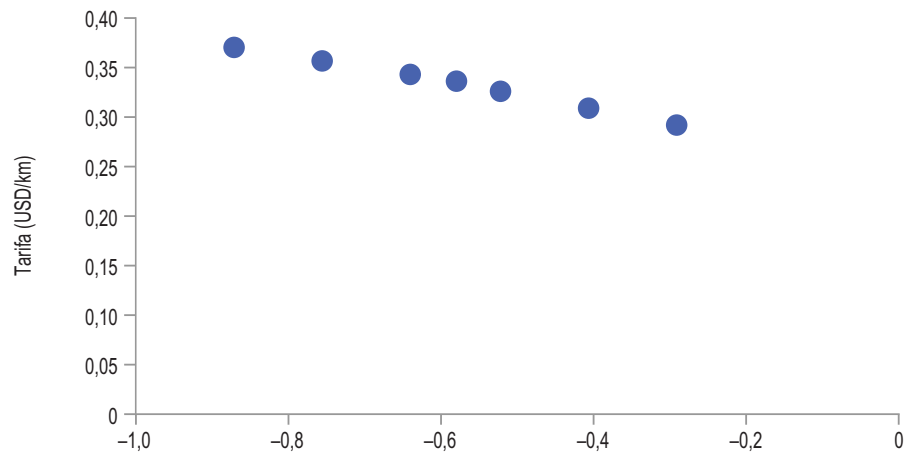


GRÁFICO A13. Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente a la elasticidad

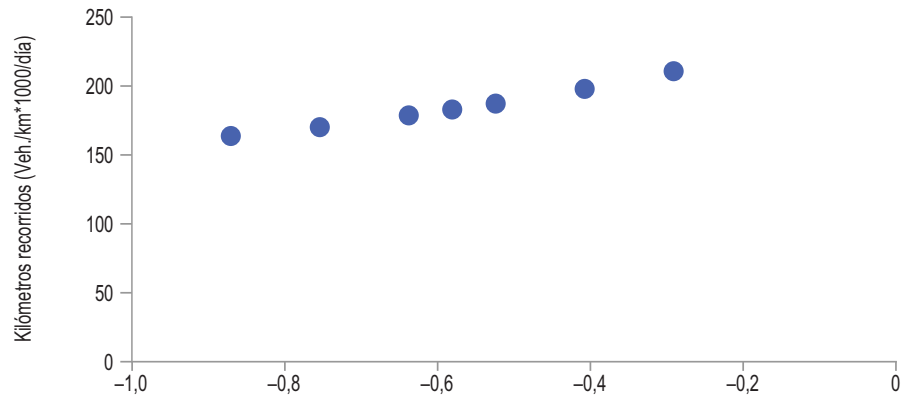


GRÁFICO A14. Sensibilidad del cambio en la velocidad frente a la elasticidad

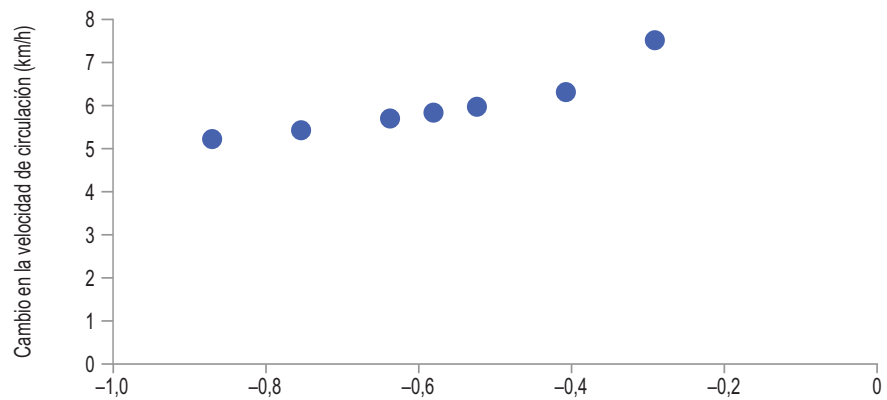


GRÁFICO A15. Sensibilidad del costo de la congestión frente a la elasticidad

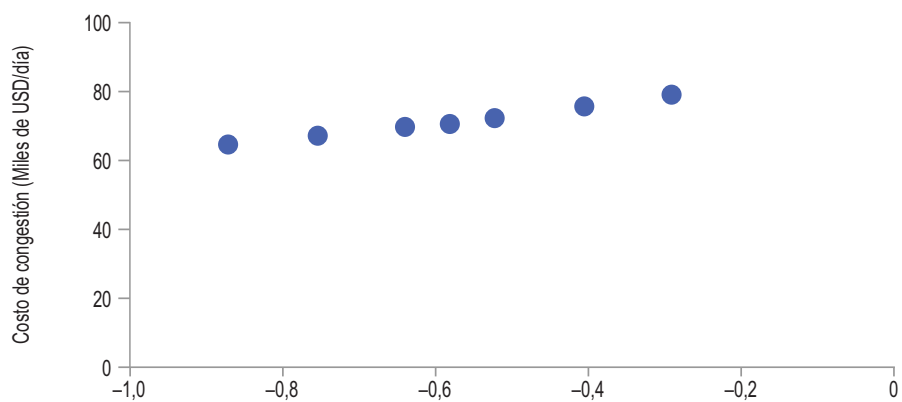


GRÁFICO A16. Sensibilidad de la recaudación frente a la elasticidad

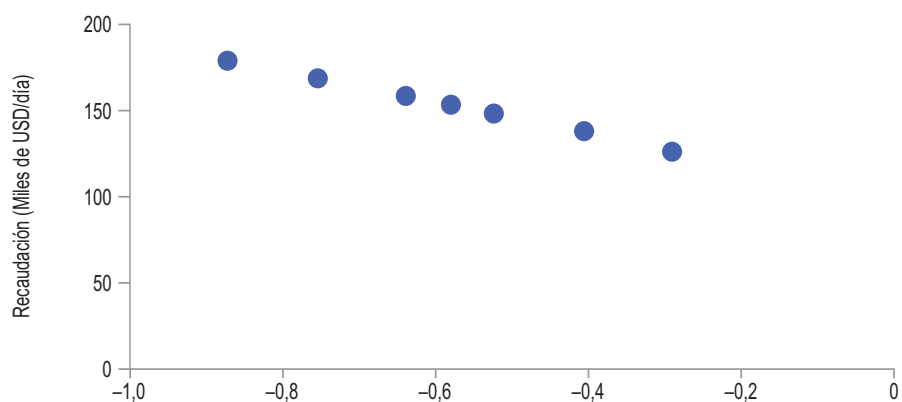
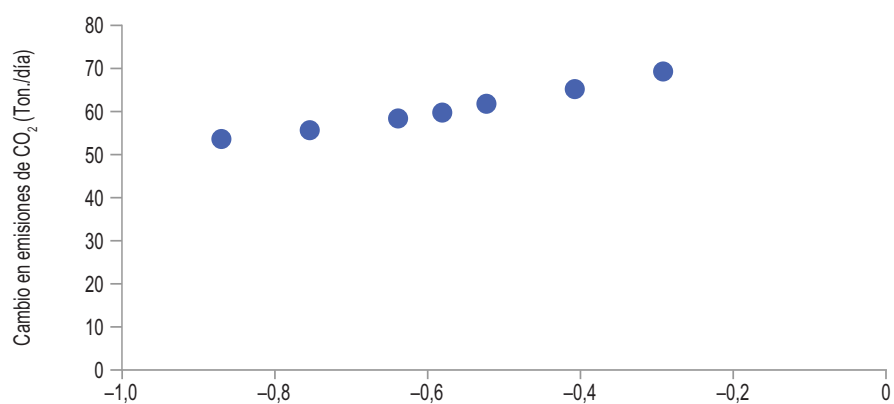


GRÁFICO A17. Sensibilidad del cambio en emisiones de CO₂ frente a la elasticidad



Anexo 6

Análisis de sensibilidad: caso de Santiago

Sensibilidad frente a la velocidad

GRÁFICO A18. Sensibilidad de la tarifa frente a la velocidad promedio de circulación

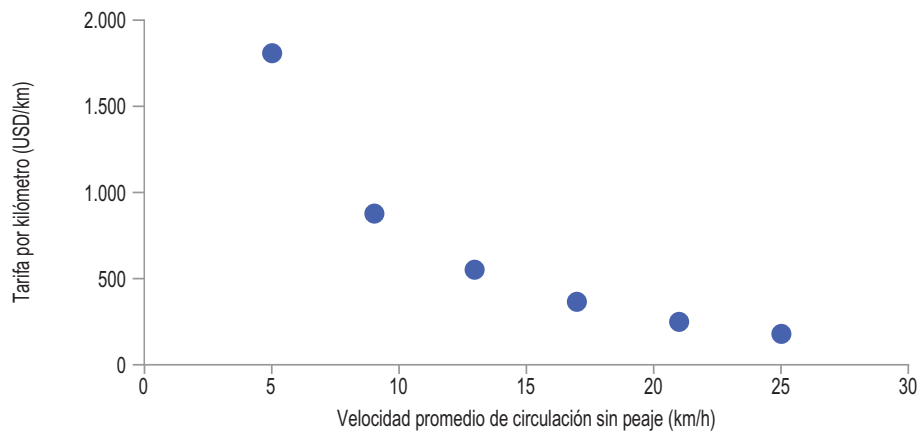


GRÁFICO A19. Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente a la velocidad promedio de circulación

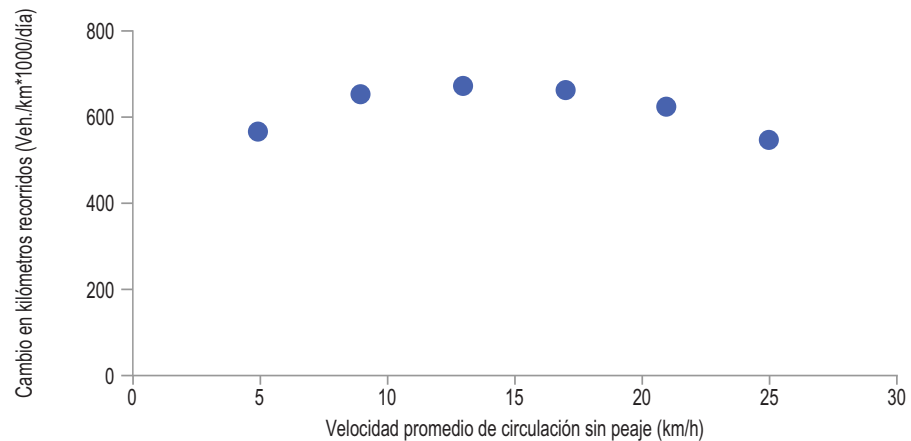


GRÁFICO A20. Sensibilidad del costo de congestión frente a la velocidad promedio de circulación

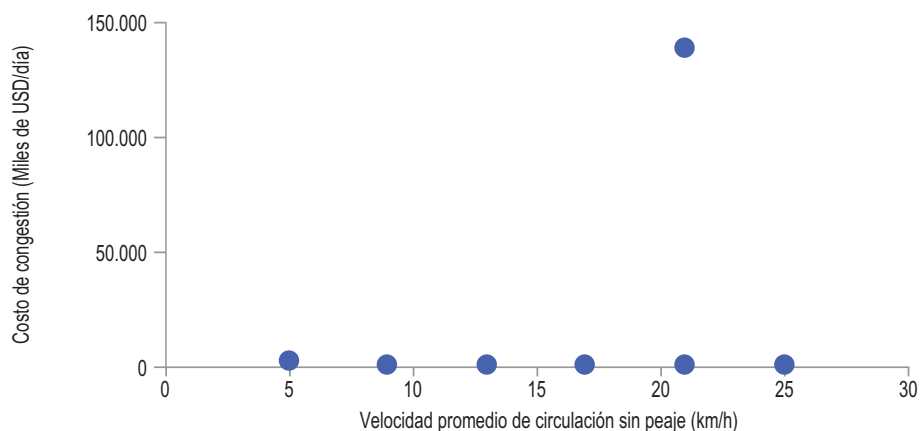


GRÁFICO A21. Sensibilidad de la recaudación frente a la velocidad promedio de circulación

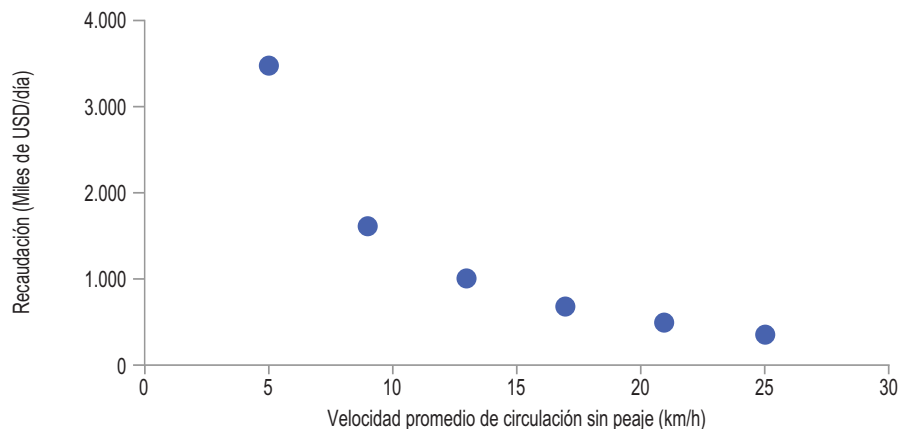
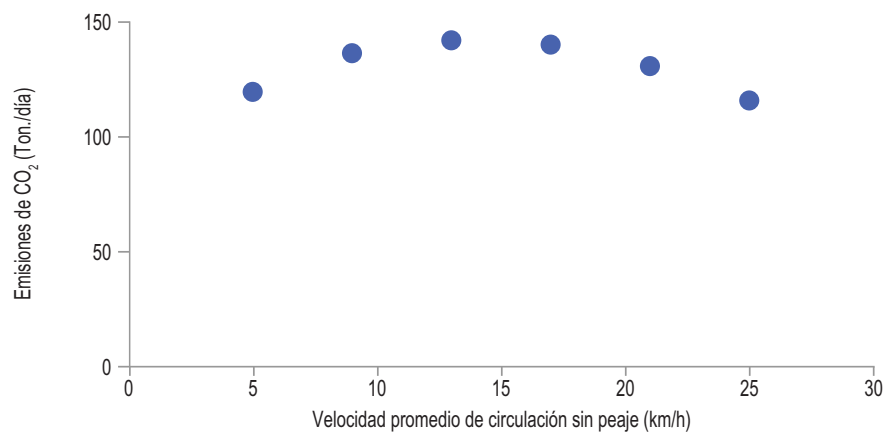


GRÁFICO A22. Sensibilidad de la reducción de emisiones de CO₂ frente a la velocidad promedio de circulación



Sensibilidad frente al valor del tiempo

GRÁFICO A23. Sensibilidad de la tarifa frente al valor del tiempo

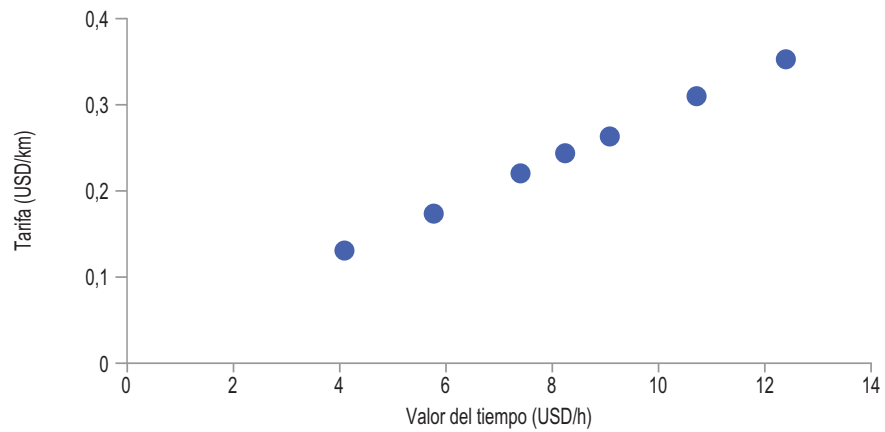


GRÁFICO A24. Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente al valor del tiempo

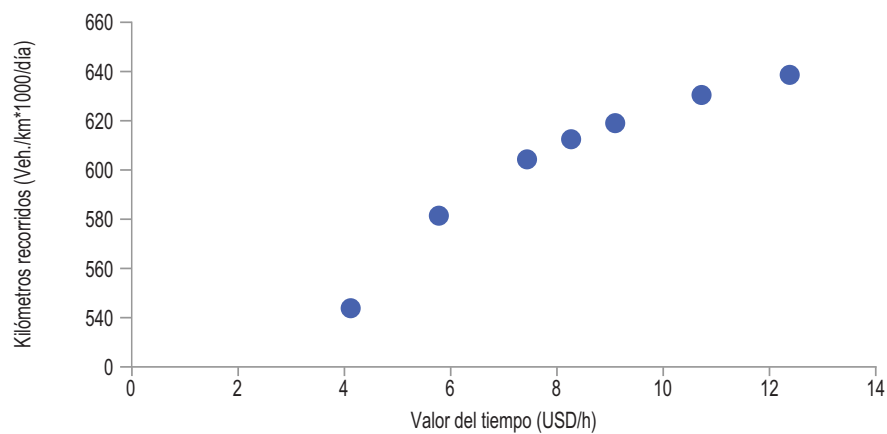


GRÁFICO A25. Sensibilidad del cambio en la velocidad frente al valor del tiempo

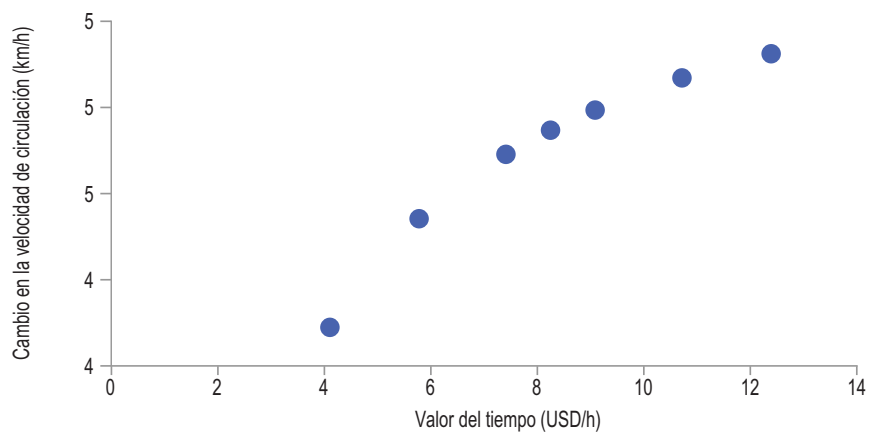


GRÁFICO A26. Sensibilidad del costo de congestión frente al valor del tiempo

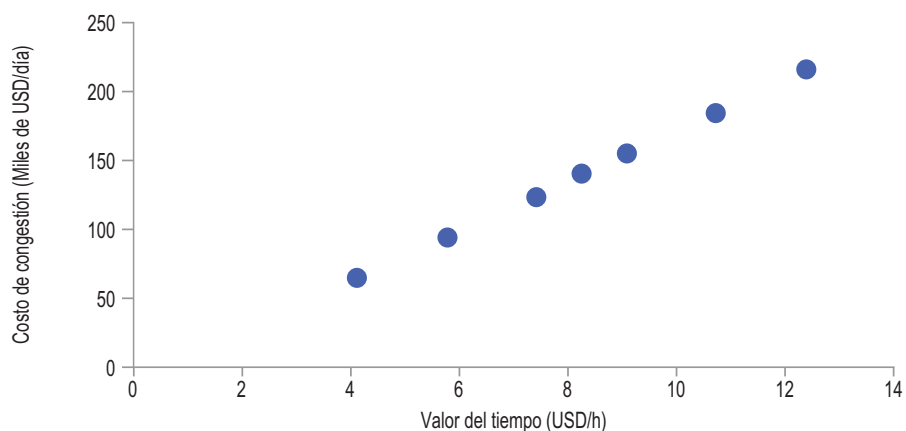


GRÁFICO A27. Sensibilidad de la recaudación frente al valor del tiempo

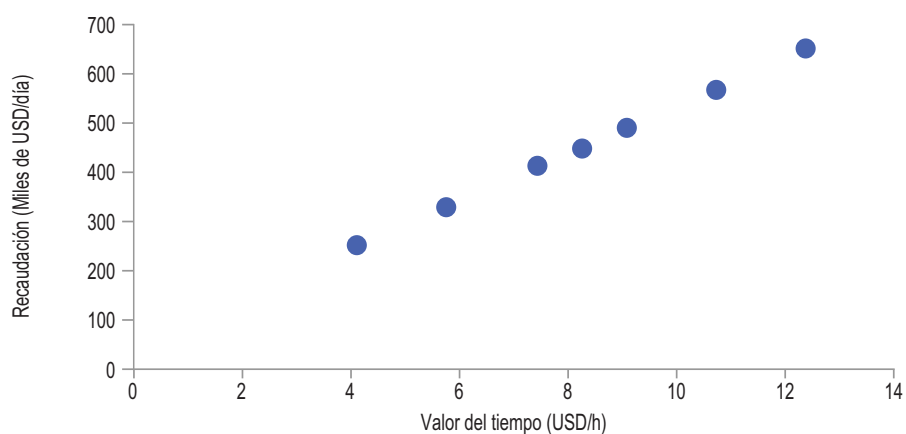
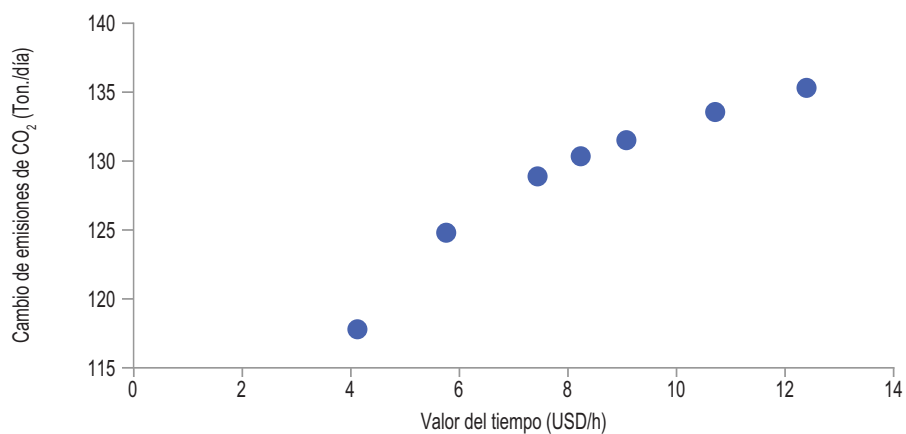


GRÁFICO A28. Sensibilidad del cambio en emisiones de CO₂ frente al valor del tiempo



Sensibilidad frente a la elasticidad

GRÁFICO A29. Sensibilidad de la tarifa frente a la elasticidad

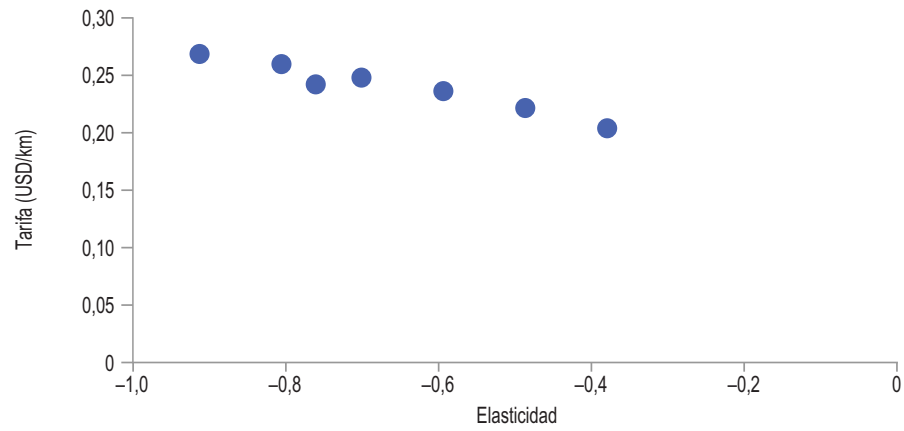


GRÁFICO A30. Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente a la elasticidad

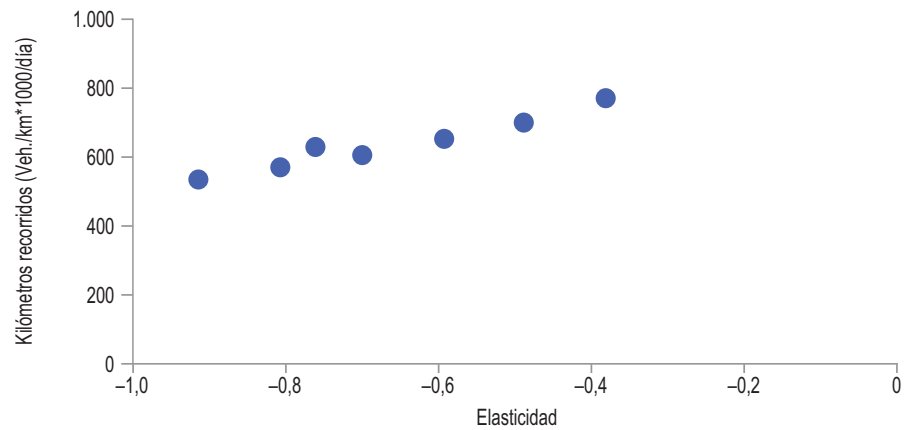


GRÁFICO A31. Sensibilidad del cambio en la velocidad frente a la elasticidad

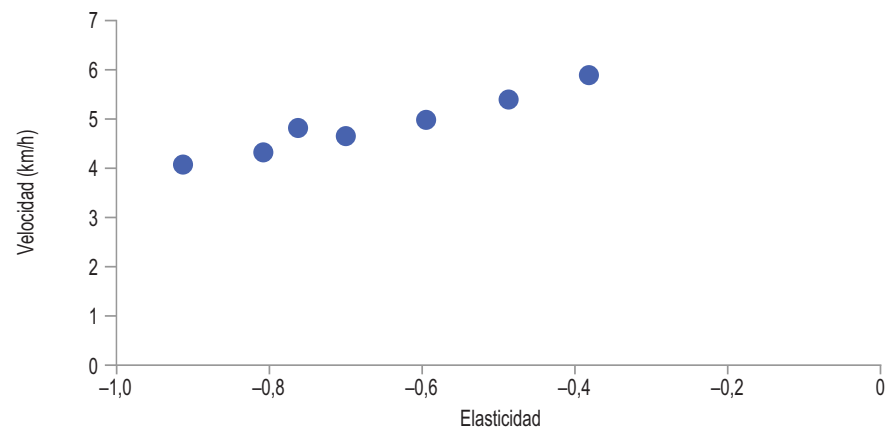


GRÁFICO A32. Sensibilidad del costo de congestión frente a la elasticidad

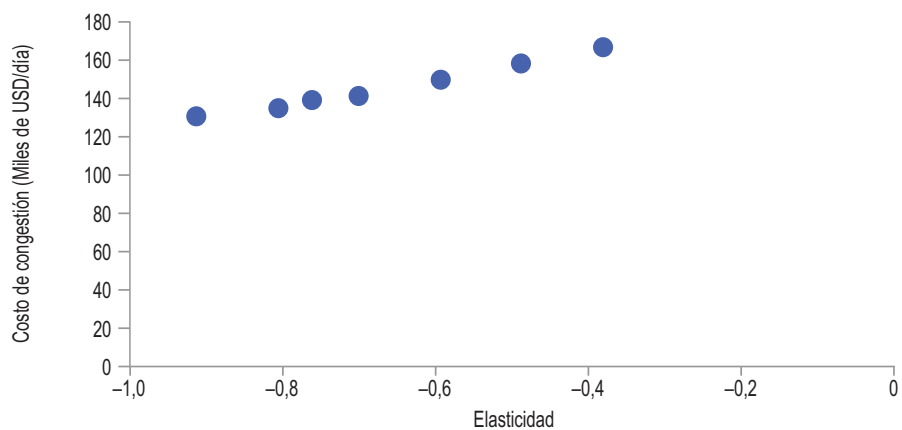


GRÁFICO A33. Sensibilidad de la recaudación frente a la elasticidad

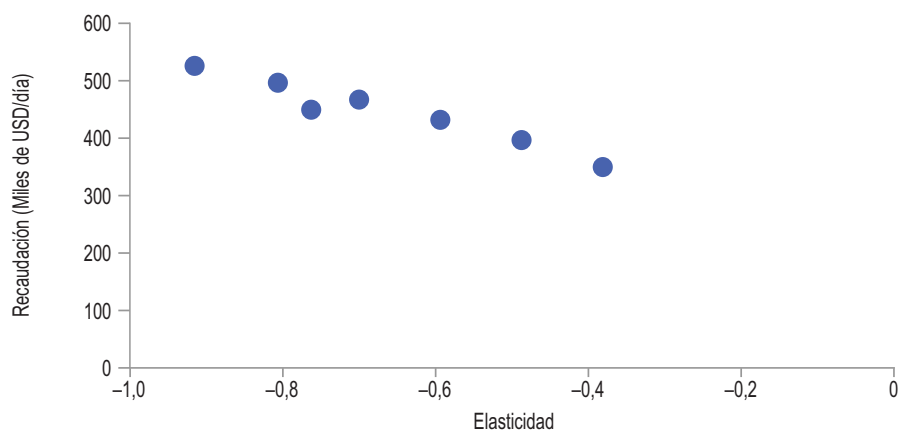
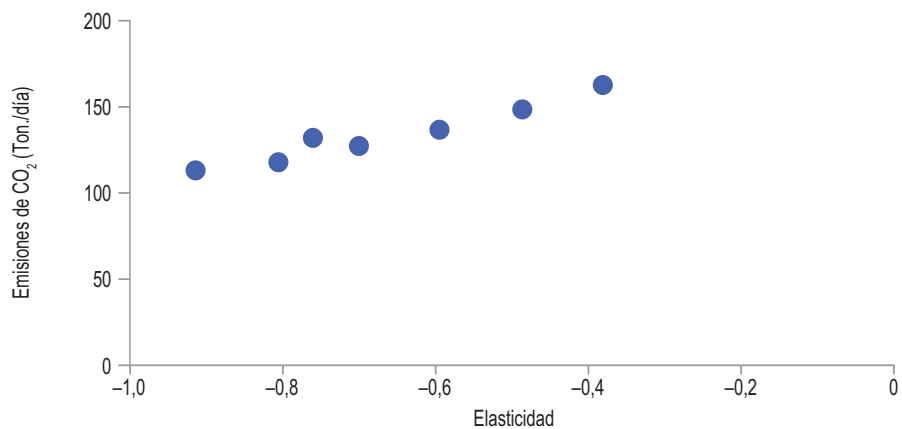


GRÁFICO A34. Sensibilidad del cambio en emisiones de CO₂ frente a la elasticidad



Anexo 7

Análisis de sensibilidad: caso de Ciudad de México

Sensibilidad frente a la velocidad

GRÁFICO A35. Sensibilidad de la tarifa frente a la velocidad promedio de circulación

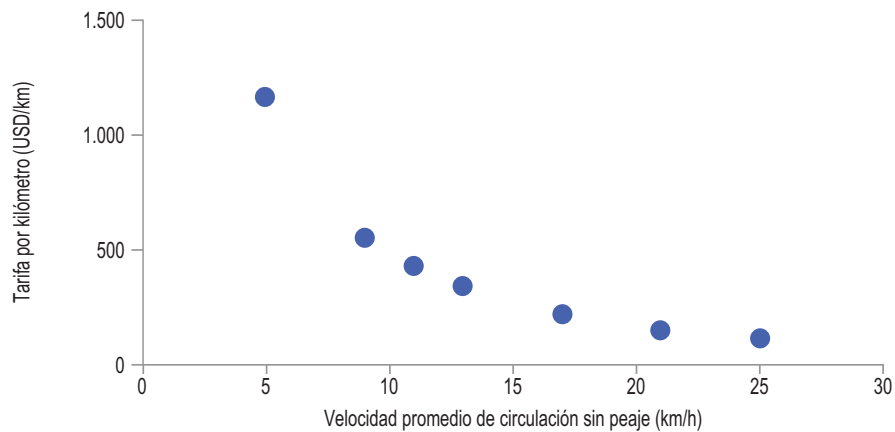


GRÁFICO A36. Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente a la velocidad promedio de circulación

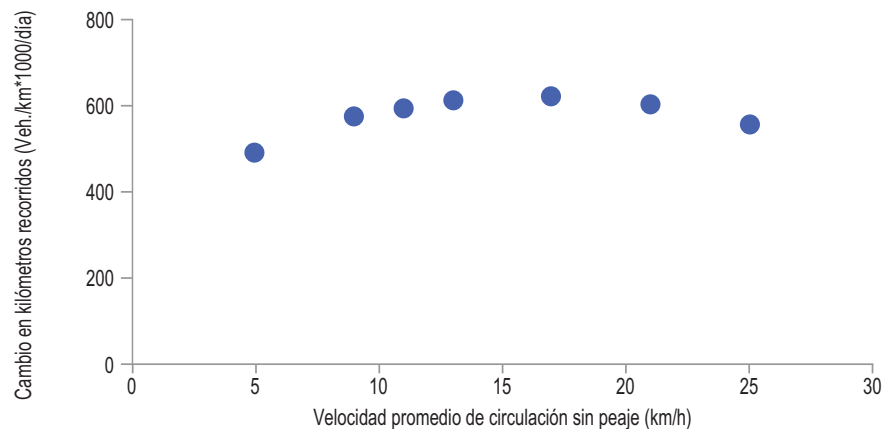


GRÁFICO A37. Sensibilidad del costo de congestión frente a la velocidad promedio de circulación

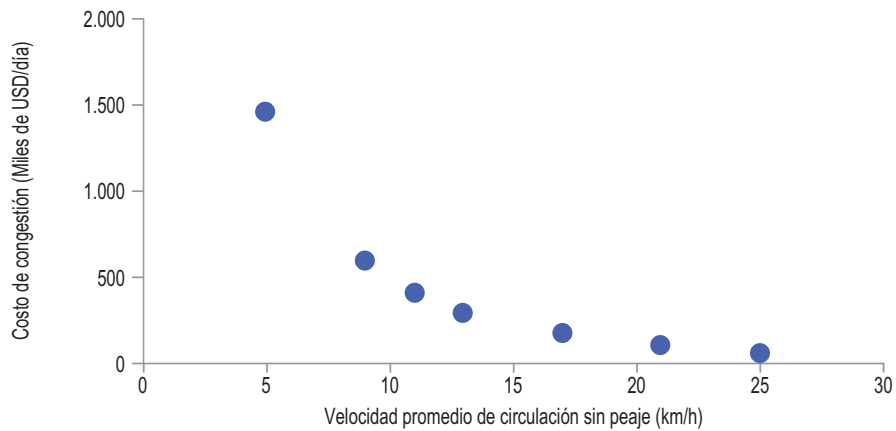


GRÁFICO A38. Sensibilidad de la recaudación frente a la velocidad promedio de circulación

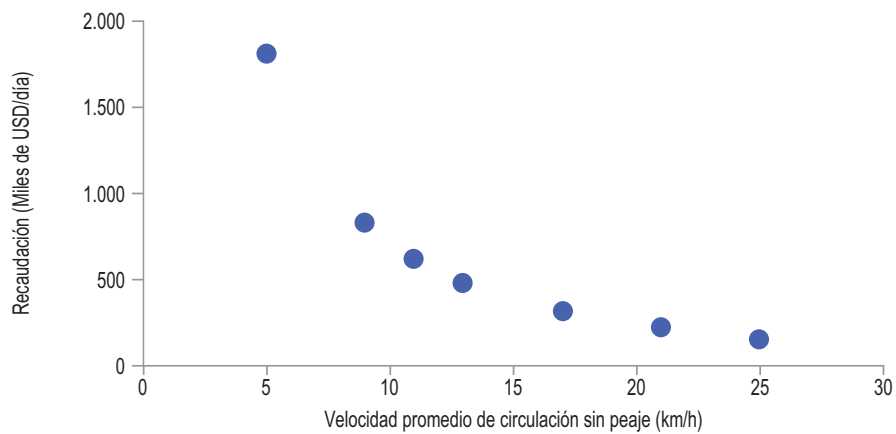
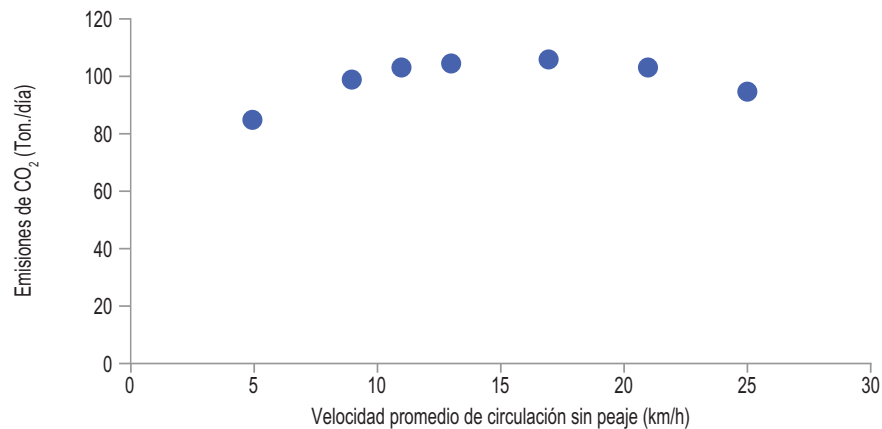


GRÁFICO A39. Sensibilidad de la reducción de emisiones de CO₂ frente a la velocidad promedio de circulación



Sensibilidad frente al valor del tiempo

GRÁFICO A40. Sensibilidad de la tarifa frente al valor del tiempo

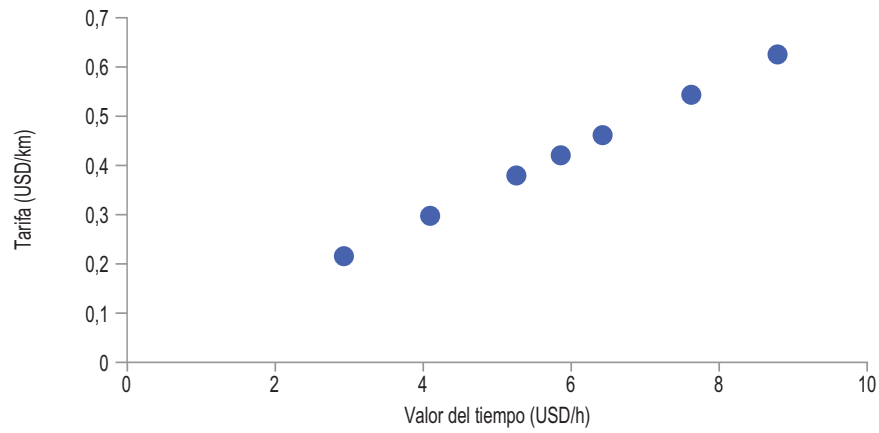


GRÁFICO A41. Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente al valor del tiempo

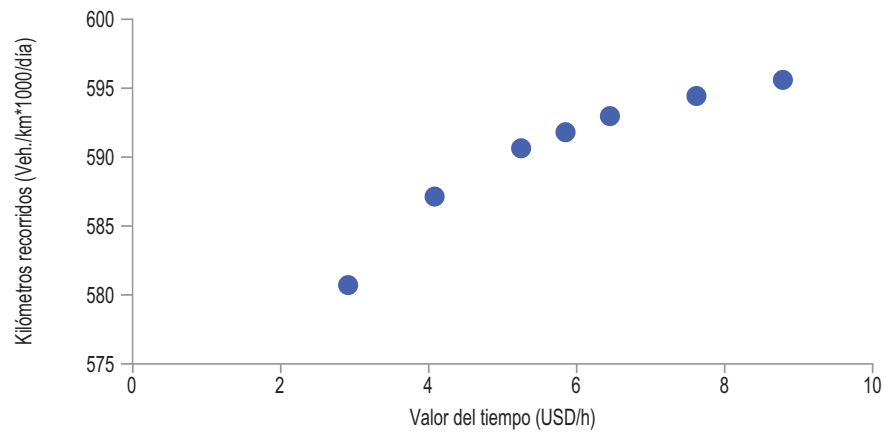


GRÁFICO A42. Sensibilidad del cambio en la velocidad de circulación frente al valor del tiempo

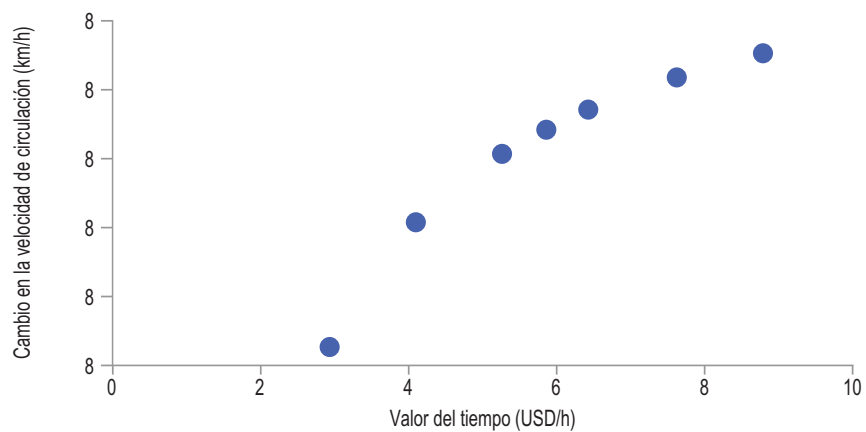


GRÁFICO A43. Sensibilidad del costo de congestión frente al valor del tiempo

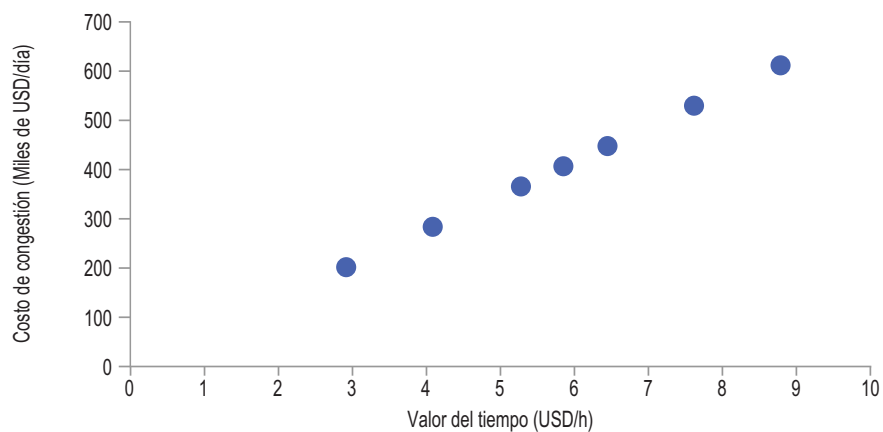


GRÁFICO A44. Sensibilidad de la recaudación frente al valor del tiempo

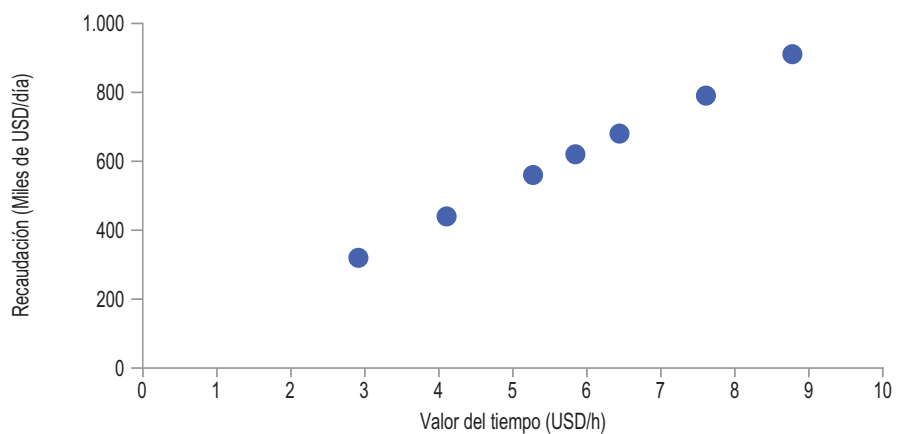
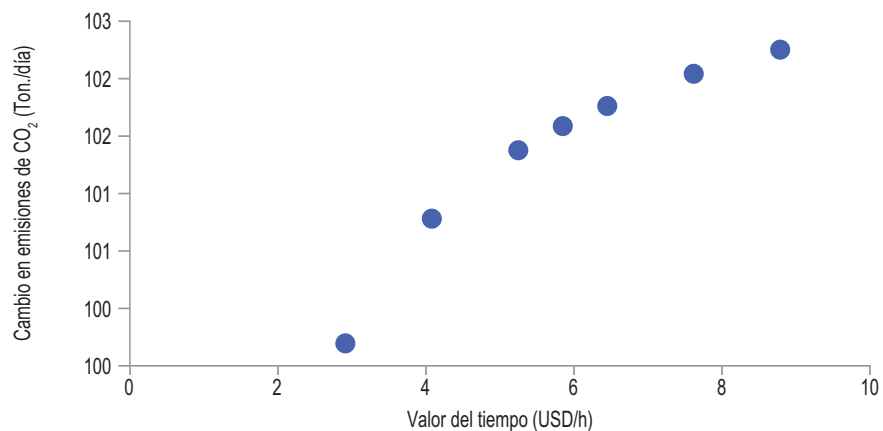


GRÁFICO A45. Sensibilidad de la reducción de emisiones de CO₂ frente al valor del tiempo



Sensibilidad frente a la elasticidad

GRÁFICO A46. Sensibilidad de la tarifa frente a la elasticidad

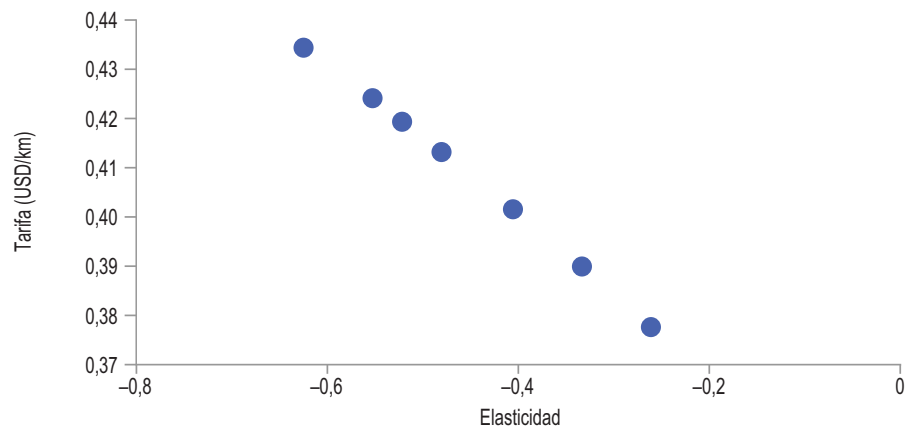


GRÁFICO A47. Sensibilidad del cambio en kilómetros recorridos frente a la elasticidad

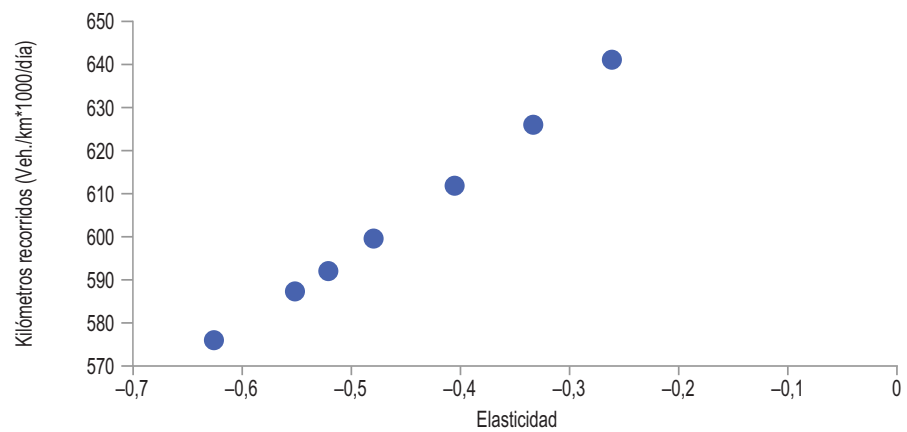


GRÁFICO A48. Sensibilidad del cambio en la velocidad frente a la elasticidad

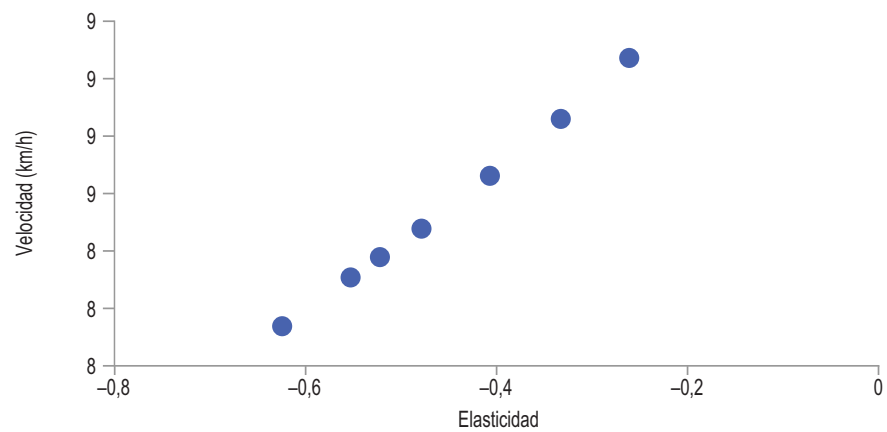


GRÁFICO A49. Sensibilidad del costo de la congestión frente a la elasticidad

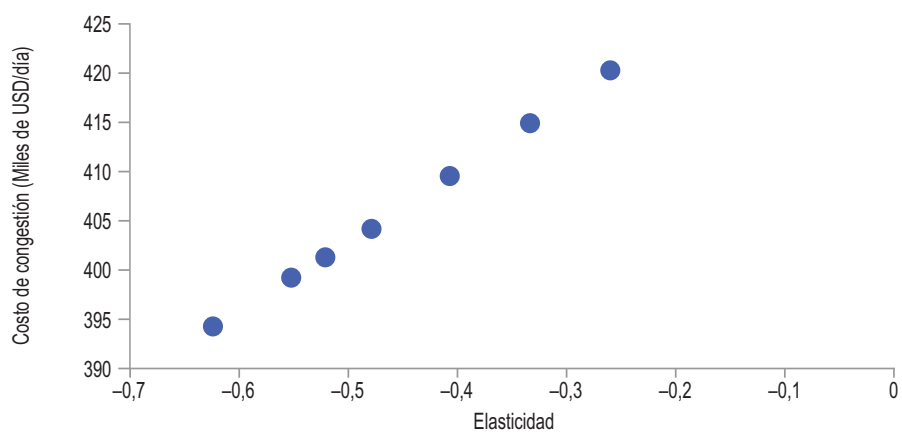


GRÁFICO A50. Sensibilidad de la recaudación frente a la elasticidad

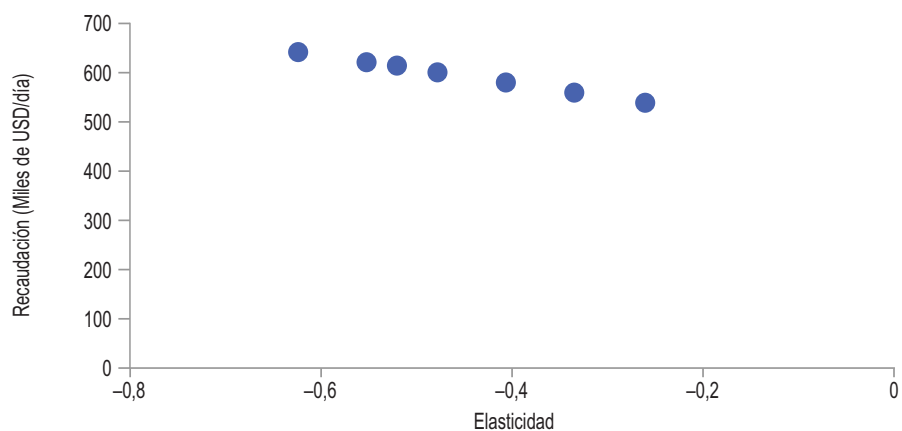


GRÁFICO A51. Sensibilidad del cambio en emisiones de CO₂ frente a la elasticidad

