

**Análisis del efecto esperado en la demanda de la potencial implementación de un cobro por congestión y una restricción vehicular basada en variables ambientales.
Un caso de estudio para Medellín**

**Estudiante:
Sebastian Monterrosa Garces**

**Asesores:
Juan Pablo Ospina Zapata
Gustavo García Cruz**

**Universidad EAFIT
Maestría En Economía Aplicada
Escuela de Finanzas Economía y Gobierno
Medellin - Colombia
2024**

Análisis del efecto esperado en la demanda de la potencial implementación de un cobro por congestión y una restricción vehicular basada en variables ambientales. Un caso de estudio para Medellín

Resumen

El presente estudio evalúa el efecto esperado en la demanda de implementar de manera combinada un sistema de cobro por congestión y restricciones ambientales en la Zona Urbana de Aire Protegido (ZUAP) de Medellín. A través de datos asociados obtenidos para usuarios de vehículos privados y la estimación de modelos Logit binomiales, se analizan los factores que influyen en la elección de carros y motos como modos de transporte. Los resultados sugieren que un incremento del 10% en el costo total del viaje podría reducir en 19.7% y 19.9% los viajes en carro y moto, respectivamente, lo cual implica una reducción de 6 mil viajes en carro y 7 mil en moto hacia la ZUAP. También se encuentra que la aplicación del cobro por congestión y las restricciones de movilidad por medidas ambientales llevan a una reducción de alrededor de 48 mil viajes en la ZUAP, lo cual implicaría que se podría generar un recaudo anual por un valor por 87 mil millones de los vehículos que estaría dispuestos a pagar por circular en la zona analizada.

1. Introducción

La congestión vehicular y la contaminación atmosférica representan desafíos críticos en las grandes ciudades alrededor del mundo, generando pérdidas económicas significativas, afectando la salud pública y deteriorando la calidad de vida de sus habitantes. Estos problemas se ven exacerbados por el crecimiento poblacional y la urbanización acelerada, lo que aumenta la demanda de transporte y ejerce presión sobre la infraestructura existente. Por tanto, es crucial desarrollar estrategias efectivas de gestión de la demanda vehicular que contribuyan a mitigar estos impactos negativos y promover una movilidad urbana sostenible.

En este contexto, la implementación de medidas como cobros por congestión y restricciones vehiculares basadas en criterios ambientales ha ganado atención en la literatura académica y en la práctica de políticas públicas. Entre los autores que han trabajado se tiene a **Bernardo et al., (2021; Bocarejo et al., (2018; Litman, (2023)** quienes han demostrado que estas estrategias pueden influir en el comportamiento de los usuarios, incentivando el uso de modos de transporte más sostenibles y reduciendo el uso del vehículo privado. Sin embargo, la efectividad de estas medidas puede variar según el contexto local y la forma en que se implementan, lo que destaca la necesidad de análisis específicos que consideren las particularidades de cada ciudad.

Este estudio se enfoca en analizar el impacto potencial de la implementación combinada de cobros por congestión y restricciones ambientales, estudiando el caso de Medellín (Colombia). Los datos utilizados provienen de una encuesta realizada en 2023 en el marco de una consultoría promovida por C40 Cities, con más de 1000 registros iniciales, lo cual aporta información actualizada y pertinente sobre las preferencias y comportamientos de los usuarios en relación con el transporte privado, de igual manera la encuesta origen destino de la ciudad para el año 2017. En términos metodológicos se estiman modelos Logit binomiales para identificar los factores clave que influyen en la elección del modo de transporte. Además, se calculan elasticidades precio de la demanda para determinar los cambios en el volumen vehicular y el recaudo potencial derivado de los cobros por congestión resultante de las medidas de gestión de la demanda vehicular.

La contribución principal de esta investigación radica en ofrecer nueva evidencia sobre los efectos potenciales del uso conjunto de políticas de gestión de la demanda vehicular relacionadas con cobros por congestión y restricciones ambientales. Al combinar ambas estrategias, se logra una sinergia que amplifica la efectividad en la gestión de la demanda vehicular y equilibra aspectos económicos y ambientales. Los resultados obtenidos proporcionan un punto de partida para la formulación de políticas públicas más eficientes y equitativas, orientadas a reducir la congestión, mejorar la calidad del aire y promover una movilidad urbana sostenible. Como caso de estudio, se presenta la Zona Urbana de Aire Protegido (ZUAP) de Medellín, una ciudad que enfrenta un gran desafío en términos de congestión y calidad del aire. La aplicación de este análisis en Medellín permite considerar las características locales y ofrecer recomendaciones de gestión de la demanda vehicular para otras ciudades.

La estructura del documento es como sigue. Después de esta introducción, en la sección 2 se presenta una revisión de la literatura relacionada con la gestión de la demanda vehicular en diferentes ciudades del mundo. La sección 3 describe la metodología empleada, incluyendo la base de datos utilizada y el modelo econométrico empleado. En la sección 4 se presenta a Medellín y el caso de estudio de la zona analizada. La sección 5 se describen los datos utilizados y estadísticas descriptivas. En la sección 6 se describen los resultados relacionados con las estimaciones econométricas, cálculos de demanda vehicular y recaudo. Finalmente, en la sección 7 se presentan las conclusiones y recomendaciones.

2. Revisión de literatura

La congestión urbana genera enormes pérdidas económicas, sociales y medioambientales a nivel mundial, con un costo estimado de €200 mil millones en la Unión Europea y US\$ 151 mil millones en Estados Unidos (European Commission, 2020). En América Latina, Bogotá, Lima, Ciudad de México y Río de Janeiro figuran entre las ciudades más congestionadas del mundo, una situación agravada por el aumento de la motorización y la reducción del uso del transporte público (INRIX, 2023). Desde un punto de vista de la economía del transporte, la oferta y demanda de transporte son cruciales para entender el problema de la congestión y sus externalidades negativas (contaminación, ruido, incrementos en los tiempos de desplazamiento, entre otras). En particular, la literatura ha resaltado diferentes medidas de la gestión de la demanda de transporte para mitigar la congestión.

La gestión de la demanda en el transporte busca influir en los comportamientos de los usuarios y mejorar la eficiencia en el uso de los recursos (Litman, 2013; Mendieta & Perdomo, 2008). De acuerdo con Litman (2023) entre las estrategias de gestión de la demanda de transporte se tienen, por ejemplo, la mejora de las opciones de transporte, incentivos financieros, planificación y desarrollo del uso del suelo, y programas de divulgación e implementación. En particular, Litman (2023) menciona que estrategias de cobros por congestión y restricciones de circulación por aspectos ambientales son las más aplicadas para gestionar la demanda vehicular.

El cobro por congestión consiste en imponer tarifas a los vehículos que circulan en zonas de alta congestión, especialmente durante las horas de máxima demanda, con el objetivo de desincentivar el uso del carro en estas áreas y reducir el tráfico, mejorando así los tiempos de viaje. Además, los ingresos generados por estas tarifas suelen destinarse a mejorar el transporte público y los modos no motorizados (Lehe, 2019; Selmoune et al., 2020). Varios autores han explorado los cobros por congestión utilizando distintas metodologías, como la elaboración de encuestas y posterior modelación de la demanda, estimación de características como tecnología, área de acción, apoyo público (Wang et al., 2021), estimación de sensibilidades al gasto (García et al., 2016.) o la operación. En estas investigaciones se encuentra que el cobro por congestión es efectivo llegando a disminuir la congestión en las grandes ciudades y por ende sus externalidades, como el tráfico excesivo y la mala calidad del aire (Anas & Lindsey, 2011; Axsen & Wolinetz, 2021; Baranzini et al., 2021; Bocarejo et al., 2018; Cal y Mayor, 2019; D'artagnan consulting, 2018; de Palma

& Lindsey, 2011; Fall, 2022; Gibson & Carnovale, 2015; Hidalgo et al., 2018; Lehe, 2019; Oliveira et al., 2019; Selmoune et al., 2020).

Respecto a las restricciones de circulación basadas en criterios ambientales, tienen como objetivo mejorar la calidad del aire en las ciudades, imponiendo restricciones de movilidad en ciertas zonas y de acuerdo con ciertas especificaciones en los vehículos que transitan. En diferentes ciudades alrededor del mundo se implementan medidas para disminuir las emisiones de fuentes móviles, este tipo estrategia se emplea frecuentemente en ciudades como complemento a las Zonas de Bajas Emisiones (ZBE) y puede incluir tarifas por contaminación. Para determinar las características óptimas de la restricción de circulación basada en criterios ambientales, los modelos de simulación de tránsito destacan por su capacidad de calcular los kilómetros recorridos, una unidad de medida clave para evaluar los efectos de emisión de contaminantes. Esta herramienta permite proyectar con mayor precisión el impacto de la reducción de emisiones, al relacionar la distancia recorrida por vehículos y la antigüedad del parque automotor, facilitando así la estimación de los beneficios ambientales derivados de estas restricciones. En la ciudad de Medellín se terminó que los vehículos mayores a 15 años de antigüedad deberán salir de circulación en el centro de la ciudad, (C40 Cities & IDOM, 2023). Esta estrategia demuestra ser versátil en la gestión de la demanda, ya que suele tener una mayor aceptabilidad pública en comparación con los cobros por congestión pues son percibidos como más efectiva para reducir la contaminación (Bernardo et al., 2021). A nivel mundial, ciudades como Milán y Londres han implementado estas medidas con resultados favorables en la reducción de la contaminación del aire.

Como mencionan Carran-Fletcher et al (2020) y Fageda (2022) la gestión eficaz de la demanda se logra mediante la combinación de estrategias orientadas a mejorar la eficiencia del transporte. Los autores también sostienen que, aunque los cobros por congestión y las restricciones de circulación basadas en criterios ambientales tienen objetivos diferentes, su integración podría resultar en una mayor efectividad para mejorar la movilidad en las zonas objetivo. Los autores concluyen que la combinación de estrategias, como los peajes urbanos y las zonas de bajas emisiones (ZBE), es la opción preferida al analizar las preferencias de diversos grupos poblacionales. Este enfoque equilibrado entre los beneficios ambientales y la reducción de la congestión también podría aumentar la aceptación pública, en comparación con la implementación exclusiva de peajes o ZBE. Sin embargo, actualmente existe limitada evidencia sobre la coordinación efectiva entre estos dos enfoques (ver Apéndice A). Entre los estudios que analizan la combinación de estrategias de gestión de la demanda vehicular, se destaca Basso et al., (2021) Estos autores confirmaron la eficacia de una estrategia híbrida que combina el sistema "pico y placa" con restricciones de circulación fundamentadas en criterios ambientales. En algunas ciudades combinan los cobros por congestión con restricciones de circulación de tipo ambiental, con el fin de mejorar la eficiencia general (Fageda, 2022). Por otra parte, Bernardo et al., (2021) menciona que Londres y Estocolmo implementaron una zona de bajas emisiones (ZBE) basada en precios en 2019 y 2020 respectivamente, adicional al del cobro por congestión existente. En el caso Milán, se inició con la consolidación de la zona de bajas emisiones y posteriormente instaurando cobros por congestión en subzonas que cumplan con ciertas características, como número de

viajes o un área mínima. Fageda et al.(2022) compararon las medidas de precios, como los cobros por congestión, frente a las restricciones de circulación basadas en aspectos ambientales, incluyendo las zonas de bajas emisiones. A pesar de esta conclusión, no se encontraron estudios que evaluaran de manera exhaustiva los resultados principales de una implementación conjunta de ambas estrategias. En el Apéndice A, se encuentra una síntesis de estudios sobre estrategias de gestión de la demanda.

La combinación de cobros por congestión y las restricciones de circulación basadas en criterios ambientales no solo puede resolver cuestiones de aceptabilidad pública, sino también promover una movilidad más sostenible. Es crucial diseñar una estructura técnica que se adapte a las características específicas de cada territorio y asegurar que las inversiones en beneficios económicos apoyen la aceptación pública al ser distribuidas equitativamente entre el transporte público y los modos de transporte no motorizados (Bernardo et al., 2021; Fageda, 2022). Estas estrategias, que incluyen el cobro por congestión y las restricciones vehiculares, han sido ampliamente estudiadas y propuestas como soluciones efectivas en la planificación urbana, para abordar los retos de movilidad y calidad del aire en entornos urbanos, sin embargo, existe una carencia en los estudios que evalúen la implementación conjunta de estas medidas dentro de un marco integrado. Aunque ciudades como Londres y Milán han comenzado a implementar enfoques combinados de cobro por congestión y restricciones ambientales, la investigación sobre sus efectos sinérgicos y las dinámicas derivadas de su aplicación conjunta aún es limitada. En este sentido, este trabajo de investigación busca abordar esta brecha, evaluando los efectos y beneficios de la implementación de una estrategia integrada que combine cobros por congestión y restricciones ambientales. Con ello, se espera no solo contribuir al debate académico y práctico sobre políticas de transporte, sino también ofrecer herramientas para el diseño de soluciones más efectivas que mejoren la movilidad urbana y la sostenibilidad ambiental

3. Metodología y datos

La metodología para determinar la demanda vehicular y evaluar los efectos de la implementación de un cobro por congestión, restricciones de circulación basados en criterios ambientales y su implementación conjunta se estructurará en tres etapas:

- 1) cálculo de la demanda derivada a partir del cobro por congestión,
- 2) cálculo de la demanda derivada a partir de las restricciones por aspectos ambientales, y
- 3) cálculo de la demanda derivada de la combinación de ambas estrategias de manera simultánea.

Para analizar los cobros por congestión, se pueden emplear diversos modelos que determinen la demanda potencial. Una alternativa común utilizada en la literatura debido a su poder de predicción, son los modelos de probabilidad, como por ejemplo el modelo Logit binomial. Estos modelos permiten evaluar la probabilidad de elegir la mejor opción entre diferentes alternativas de transporte en función de variables tales como: los costos asociados al viaje, el tiempo de viaje y características socioeconómicas. Así mismo, la estimación de estos modelos permite calcular las elasticidades precio de la demanda, las cuales dan una aproximación sobre la manera en la cual las tarifas resultantes del cobro por congestión influyen en las decisiones de

elección modal de los usuarios. En otras palabras, con los modelos de probabilidad es posible evaluar la sensibilidad de los viajes en carro ante variaciones en el costo de su uso, así como, es posible modelar la elección discreta de los individuos entre distintas alternativas de transporte. La función de probabilidad del modelo Logit binomial se basa en la utilidad percibida de cada alternativa de transporte, la cual depende de las características socioeconómicas del individuo y variables de las alternativas de transporte (carro o moto) (ver Figura 1). La estructura del modelo Logit binomial es la siguiente, ver Ecuación 1

Ecuación 1. Probabilidad de elección

$$\text{Prob}(Y_{ij} = 1) = \frac{e^{(\beta'X_{ij})}}{1+e^{(\beta'X_{ij})}} = \frac{e^{V_{ij}}}{1+e^{V_{ij}}}$$

donde, Y es igual 1 si el individuo *i* elige desplazarse a la zona medioambiental protegida por el medio de transporte *j* (*j*=carro, moto), mientras que es 0 si elige desplazarse a la zona medioambiental protegida en otro medio de transporte (transporte público, bicicleta o caminar). X_{ij} representa el vector de variables explicativas de las características de los individuos (género, estrato socioeconómico, ingreso mensual y ocupación) y de variables de las alternativas de transporte (tiempo de viaje, costo del combustible y costos de estacionamiento). Y β corresponde a un vector de coeficientes a estimar (ver Figura 1).

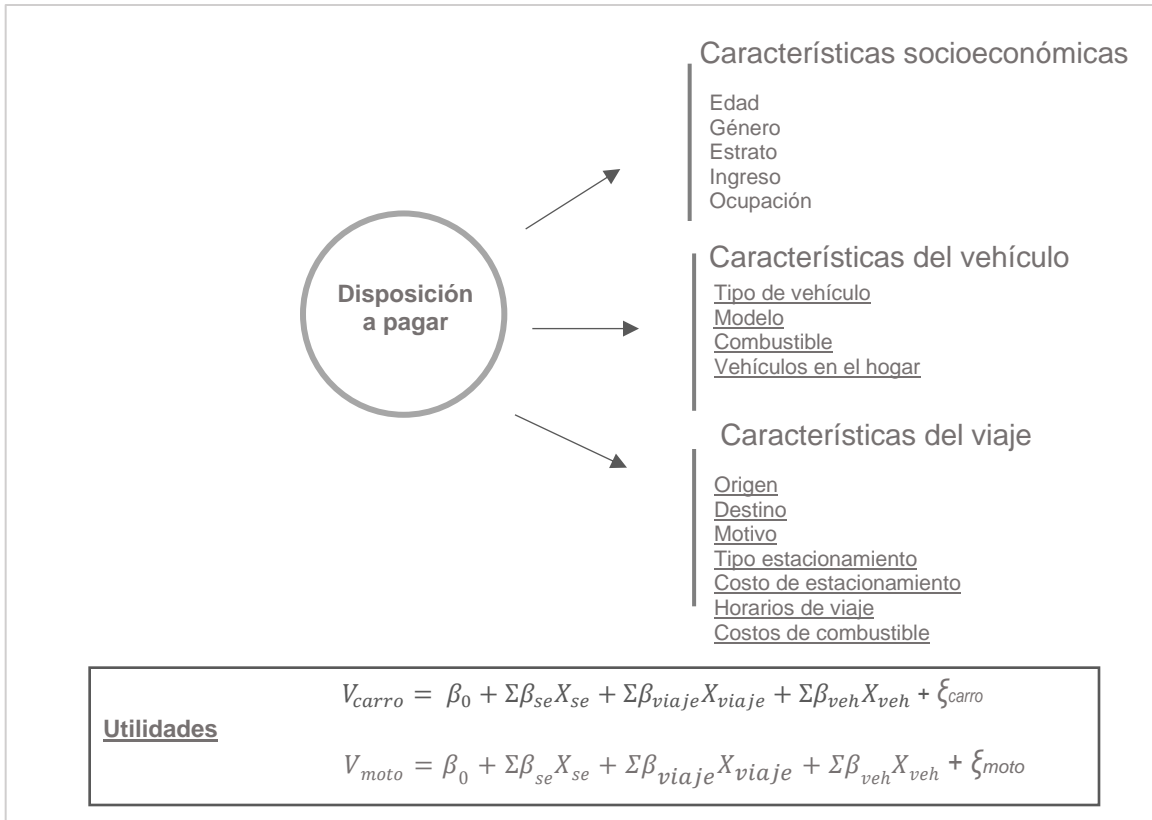


Figura 1. Modelo de elección discreta Cobro por congestión
 Fuente Elaboración propia

Donde:

- V_{carro} y V_{moto} : son las utilidades percibidas al elegir carro o moto, respectivamente.
- β_0 es el término constante que captura la utilidad base no explicada por las variables del modelo.
- $\Sigma\beta_{se}X_{se}$: representa la suma de los productos entre los coeficientes estimados β_{se} y el vector de variables socioeconómicas X_{se} , como ingreso, edad y género.
- $\Sigma\beta_{viaje}X_{viaje}$: es la suma de los productos entre los coeficientes β_{viaje} y el vector de variables relacionadas con el viaje X_{viaje} , como tiempo y costo de viaje, o motivo del desplazamiento.
- $\Sigma\beta_{veh}X_{veh}$: corresponde a la suma de los productos entre los coeficientes β_{veh} y el vector de características del vehículo X_{veh} , como antigüedad o tipo de combustible.
- ξ_{carro} y ξ_{moto} : es el término de error aleatorio que captura factores no observados que afectan la utilidad.

Con los coeficientes β estimados a partir de las funciones de utilidad en el modelo Logit binomial, y utilizando las probabilidades de elección calculadas a partir de dicho modelo, se procede a

estimar las elasticidades promedio precio de la demanda para cada modo de transporte j =carro, moto (\bar{E}_j). Estas elasticidades se calculan mediante la siguiente expresión, ver Ecuación 2:

Ecuación 2. Elasticidad costo de la demanda

$$\bar{E}_j = \hat{\beta}_{\text{costos } j} \bar{X}_{\text{costos } j} (1 - \bar{P}_j),$$

donde, $\hat{\beta}_{\text{costos } j}$ es el coeficiente estimado para la variable costos en el medio de transporte j , $\bar{X}_{\text{costos } j}$ es el valor promedio de la variable de costos, y \bar{P}_j es la probabilidad promedio de elección de la alternativa de transporte j (carro o moto). Esta fórmula permite cuantificar la sensibilidad de la demanda ante cambios en los atributos del servicio, reflejando cómo varía la probabilidad de elección frente a modificaciones en variables como el costo del viaje. Una vez calculadas las elasticidades, se implementa un modelo predictivo para proyectar el cambio en la demanda vehicular ante la introducción de un impuesto Pigouviano, diseñado para internalizar las externalidades negativas asociadas al uso del transporte privado, como la congestión y la contaminación. En este modelo, las elasticidades estimadas se aplican a la demanda base, ajustando los costos percibidos por los usuarios según la magnitud del impuesto propuesto. Finalmente, para calcular el volumen total de vehículos que dejarían de circular debido al cobro por congestión para cada modo de transporte j (DCC_j), se utiliza la Ecuación 3:

Ecuación 3. Vehículos que dejan de circular debido al cobro por congestión

$$DCC_j = D_{\text{base } j} \times (1 - p_j),$$

donde, $D_{\text{base } j}$ representa la demanda base para cada modo de transporte j (carro o moto), p_j es el porcentaje de conductores en la categoría que optarán por no seguir utilizando su vehículo.

Para el análisis de la demanda bajo restricciones de circulación por criterios ambientales, se emplean datos relacionados con los vehículos y estudios de caso previos que permiten comprender la efectividad de diferentes alternativas asociadas a esta restricción. Estas pueden incluir restricciones en la circulación basadas en la antigüedad del vehículo, el número de kilómetros recorridos o las emisiones producidas. Para identificar estas restricciones se lleva a cabo un análisis de la composición del parque automotor en la zona de estudio, identificando las características de los vehículos que se ven afectados por las restricciones. A partir de esta información, se calcula el volumen de vehículos que dejarían de circular en la zona objetivo, evaluando las diferentes alternativas y sus efectos. Este análisis permite identificar las restricciones más efectivas para reducir la congestión y las emisiones contaminantes, de acuerdo con los objetivos planteados (ver Figura 2). En este sentido, el volumen total de vehículos que dejarían de circular debido a las restricciones ambientales para cada modo de transporte j (DRA_j) se calcula con la Ecuación 4:

Ecuación 4. Vehículos que dejan de circular debido a las restricciones vehiculares por aspectos ambientales

$$DRA_j = D_{\text{base } j}(p_{>15\text{años } j}),$$

donde, D_{base_j} representa la demanda base para cada modo de transporte $j = \text{carro, moto}$ y $p_{>15\text{años}}$ es el porcentaje de propietarios con vehículos con una antigüedad mayor a 15 años. Las características y el nivel de emisiones de los vehículos son fundamentales para estimar su incidencia en las externalidades relacionadas con la calidad del aire. Según el Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire (PIGECA, 2021), los vehículos con más de 15 años de antigüedad generan significativamente más emisiones que aquellos con una antigüedad de entre 10 y 15 años. Esta diferencia en las emisiones subraya la necesidad de implementar medidas específicas para mitigar el impacto ambiental de los vehículos más antiguos en la zona de estudio (ver Figura 2).

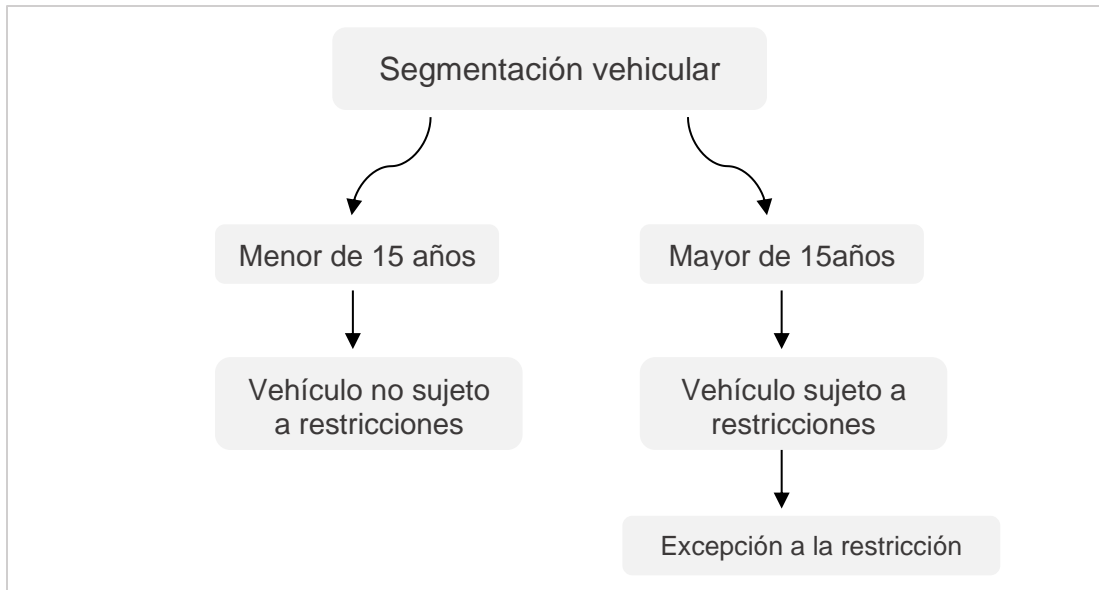


Figura 2. Estructura Restricción de circulación de tipo ambiental
Fuente Elaboración propia

Para evaluar la combinación de estrategias de cobro por congestión y restricciones ambientales, el análisis se enfoca en agregar las demandas resultantes de cada medida por separado. Inicialmente, se emplea un modelo Logit binomial para calcular la demanda potencial tras la implementación del cobro por congestión. Posteriormente, se analiza la disminución de la demanda vehicular tras aplicar restricciones basadas en la antigüedad del parque automotor. Finalmente, ambas estimaciones se combinan para determinar la demanda total derivada de la aplicación conjunta de ambas estrategias. Este enfoque permite evaluar cómo la integración de cobros por congestión y restricciones de circulación basadas en criterios ambientales puede reducir la congestión vehicular y sus externalidades, al tiempo que fortalece la movilidad sostenible mediante la financiación proveniente de los ingresos generados por la medida de tarificación. En síntesis, la demanda de vehículos en la zona después de considerar la aplicación de cobros por congestión y restricciones ambientales para cada modo de transporte (DZ_j), se calcula como:

$$DZ = D_{base_j} - DCC_j - DRA_j$$

Respecto al recaudo de recursos por las medidas implementadas, se calcula utilizando la demanda total que se generaría en la zona analizada y los valores obtenidos de estudios previos realizados por las administraciones de la ciudad. Con esta estimación, se espera cuantificar y planificar estos recursos, destinándolos especialmente hacia la movilidad activa y el desarrollo del transporte público. En cuanto a las excepciones, se aplicarán las mismas que rigen en la ciudad para la medida de pico y placa, contenidas en el Decreto 0102 de 2024, las cuales estaban vigentes durante la recolección de información. Por esta razón, no se cuantificarán en este análisis.

Datos:

En este estudio se utilizan diferentes fuentes de información, incluyendo los datos de la Encuesta Origen-Destino (EOD) de 2017, la encuesta realizada por **C40 Cities y la consultora IDOM, 2023**, el Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT) en 2023, y mapas (shapefiles) del Plan de Ordenamiento Territorial, con el objetivo de analizar la demanda de transporte en la ZUAP. Es importante destacar que la unidad de observación en este estudio son los viajes. En el contexto del transporte, los viajes se definen como los desplazamientos realizados entre un punto de origen y un punto de destino, para lo cual se pueden utilizar diferentes modos de transporte o uno solo. Cada viaje representa una interacción entre las decisiones del usuario, las características del modo de transporte elegido y las condiciones del entorno. Para este estudio se toman los viajes que se realizan por trabajo o estudio, denominados viajes obligados.

La EOD ofrece una visión detallada de los movimientos de transporte en la ciudad, permitiendo un análisis preciso de los patrones de movilidad. De acuerdo con esta encuesta se registran aproximadamente 68,000 viajes diarios en la ZUAP por trabajo o estudio, valor que corresponde a la variable de demanda base (D_{base}) en las ecuaciones 3, 4 y 5 presentadas anteriormente. Por su parte, la encuesta realizada por la empresa IDOM se lleva a cabo en la ZUAP a 1,211 usuarios de modos de transporte privado motorizado, recopilando información sobre características socioeconómicas, características del vehículo (modelo, cilindraje, tipo de combustible, entre otras), hábitos de viaje, preferencias modales y percepciones sobre las restricciones de movilidad a la ZUAP. A esta base de datos se le realizó un proceso de depuración eliminando valores atípicos y faltantes, resultando en una base de datos de 1,073 observaciones. De estas encuestas filtradas, 225 correspondían a usuarios que se movilizaban en carro (47%) y 258 usuarios de moto (53%). Los datos del RUNT para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) permitieron categorizar los vehículos según su antigüedad, aportando una visión detallada del parque automotor en la ZUAP. Un resumen de las principales variables recopiladas se presenta en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Estadísticas descriptivas de las variables utilizadas en el análisis

Variable	Descripción Categoría	Carros	Motos
Genero	Masculino	83.1%	84.9%
	Femenino	16.9%	15.1%
Ocupación	Empleado	48.0%	35.3%
	Estudiante	52.0%	64.7%
Ingreso	Bajo	68.9%	91.1%
	Medio	26.2%	8.9%
	Alto	4.9%	
Edad (años)		41	36
Edad	Joven (<= 18 años)	0.44%	0.39%
	Adulto Joven (<= 35 años)	34.67%	5.4%
	Adulto (<= 55 años)	54.67%	43%
	Adulto Mayor (<= 75 años)	10.22%	5.8%
	Anciano (> 75 años)		0.39%
Hora de viaje	Horas de máxima demanda	49.33%	53.49%
	Horas Valle	50.67%	46.51%
Paga parqueadero en el destino	Si	24.9%	22.5%
	No	75.1%	77.5%

Fuente Elaboración propia

De acuerdo con la tabla 1, un viajero promedio que se desplaza por trabajo o estudio a la ZUAP en carro es un hombre adulto entre 19 y 55 años, de ingresos bajos y sus desplazamientos a la zona analizada los realiza tanto en horarios valle como de alta demanda. Por su parte, los usuarios de motos que realizan viajes a la ZUAP, son también en su mayoría hombres en edades entre 35 y 55 años, la mayoría son de ingresos bajos y se desplazan con mayor proporción a la zona analizada en horarios de alta demanda vehicular.

El costo total del viaje es una variable crucial en los estudios de transporte porque influye directamente en la decisión de los usuarios al elegir un modo de transporte. Un costo de viaje elevado puede desincentivar el uso de vehículos privados y fomentar alternativas más económicas, siendo especialmente relevante en el diseño de políticas como el cobro por congestión. Aunque el tiempo de viaje también es importante, en ciertos contextos puede tener una influencia menor o incluso omitirse del análisis si las diferencias de tiempo son mínimas o si los usuarios muestran mayor sensibilidad a los costos que al tiempo. En este estudio los costos de viaje corresponden a los gastos que hacen los usuarios por el parqueadero y combustible para un usuario promedio en viajes entre semana, en la Tabla 2 se reportan los costos y tiempos de viaje distinguiendo entre carro y motos. Se observa que un usuario promedio que se desplaza en carro, se gasta en promedio \$694,000 en parqueadero y combustible, mientras que el usuario en moto se gasta \$256,000

en promedio. En cuanto a los tiempos de viaje, se tiene que un usuario en carro tarda 51 min en promedio, mientras que un usuario en moto tarda 42 min.

Tabla 2. Costos y tiempos de viaje promedio

Variable/ Vehículo	Carro	Moto
Costos	\$ 694,500	\$ 256,000
Tiempo	51 min	42 min

Fuente Elaboración propia

En términos de los viajes realizados en la ZUAP, la EOD reporta que durante la hora pico de la mañana (6:30 a.m. - 7:30 a.m.) se realizan 15,652 viajes en carro y moto desde o hacia la ZUAP, lo que representa el 11.55% de los viajes totales del día en esta área. Adicionalmente, los volúmenes de carros y motos observados en la ZUAP en ese mismo periodo corresponden al 5.68% del volumen diario. Con base en la información obtenida de los aforos vehiculares, se corroboró que la hora pico de la tarde presenta un mayor flujo vehicular en comparación con la hora pico de la mañana, tal como lo sugiere la EOD. El tráfico durante la tarde está dominado principalmente por motos y carros, con una participación significativamente menor de camiones y buses, ver Figura 3 (A).

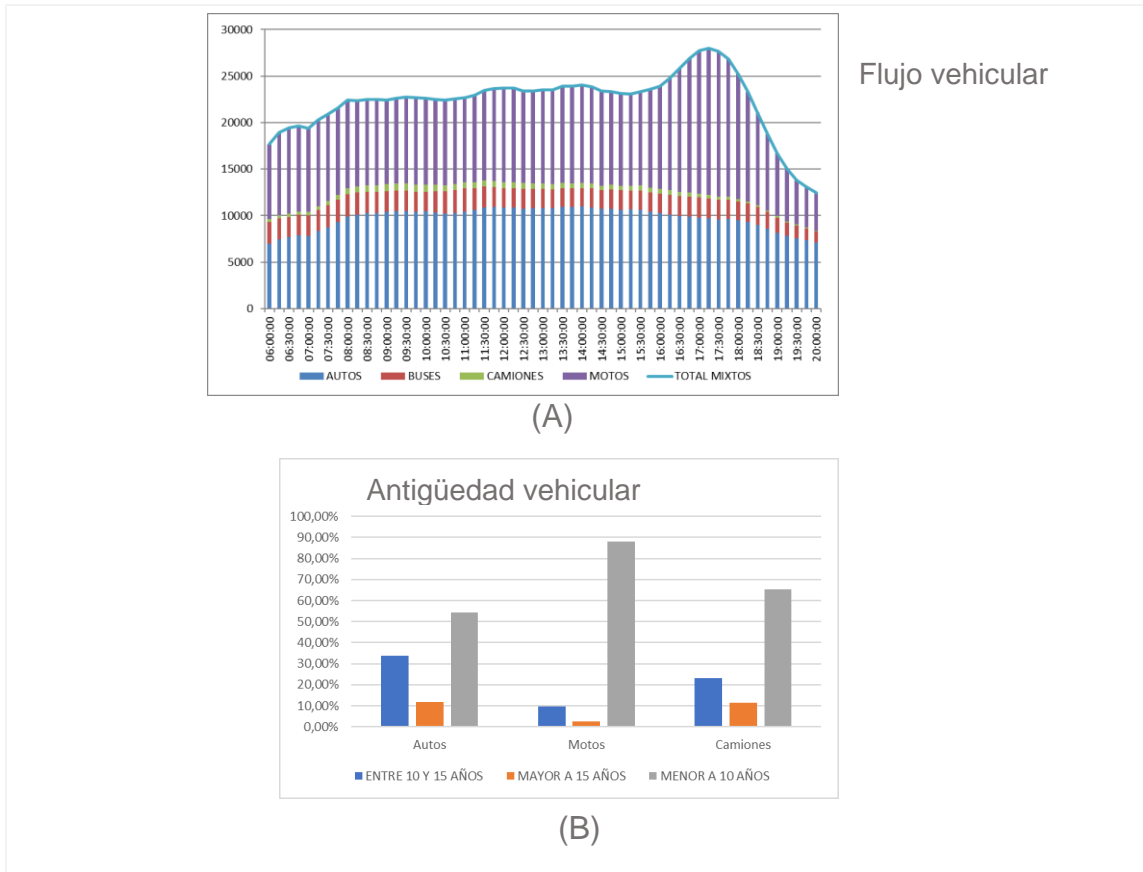


Figura 3. Esquema movilidad y calidad del aire
Fuente Elaboración a partir de IDOM y C40, 2023

Para analizar la antigüedad del parque automotor en la ZUAP, se empleó la categorización utilizada por C40 e IDOM en 2023 durante su consultoría, dividiendo los vehículos en tres categorías: menores de 10 años, entre 10 y 15 años, y mayores de 15 años. Los resultados indican que el 40% de los automóviles tienen más de 10 años, de los cuales un 10% supera los 15 años (ver Figura 3 (B)). En el caso de las motos, alrededor del 10% tiene entre 10 y 15 años. En cuanto a los camiones, un 20% se encuentra en el rango de 10 a 15 años y un 10% supera los 15 años. Estos datos destacan la necesidad de políticas para la renovación vehicular y la implementación de restricciones ambientales en la ZUAP.

3.1. Medellín y la ZUAP

El caso de estudio se enfoca en la Zona Urbana de Aire Protegido (ZUAP) de Medellín (Colombia), una iniciativa establecida por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) mediante la Resolución Metropolitana 2231 de 2018. La ZUAP fue diseñada como una estrategia clave para abordar los crecientes

problemas de contaminación atmosférica en la región, caracterizada por altos índices de polución que afectan la salud de los habitantes. Esta zona, ubicada en el centro de Medellín, abarca un área de 2 km² en el centro de Medellín, extendiéndose desde la calle 44 (Avenida San Juan) hasta la calle 58 (Echeverry), y desde la carrera 46 (Avenida Oriental) hasta la carrera 57 (Avenida el Ferrocarril) (ver Figura 4) Según el inventario de emisiones en el 2018, los vehículos motorizados emiten el doble en casi todos los contaminantes criterio respecto al promedio de emisiones del Vale de Aburrá

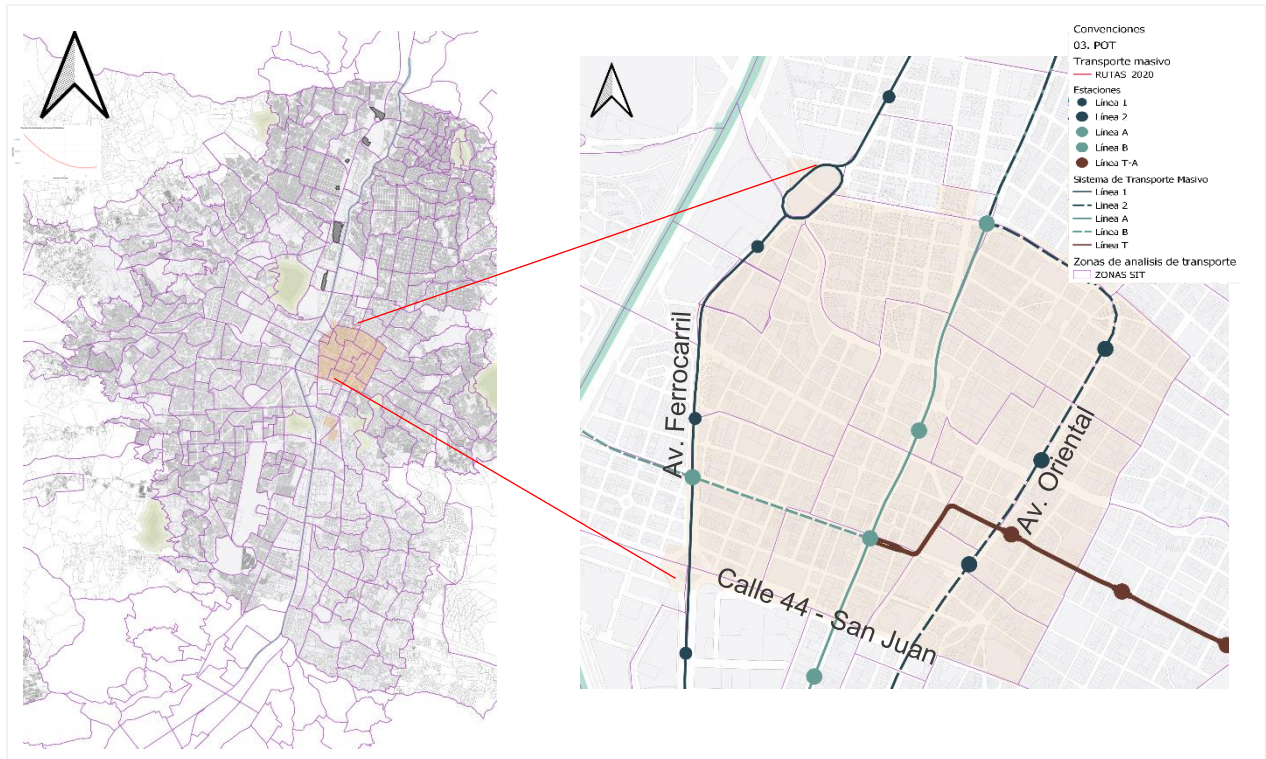


Figura 4. Zona ZUAP Medellín Análisis Movilidad
Fuente Elaboración propia basado en POT 2014

El carácter comercial predominante de la ZUAP genera un alto volumen de tráfico, donde el reparto modal está liderado por el transporte público 64%, seguido del transporte privado con 20% y la movilidad activa con 16%. En este contexto, los carros y motos representan un total de aproximadamente 68,000 viajes diarios, evidenciando la significativa participación de los vehículos privados en la movilidad de la zona. Las principales arterias viales, como la Avenida San Juan, Avenida Colombia, Avenida Ferrocarril y Avenida Oriental, facilitan el flujo vehicular, pero soportan una carga considerable debido al tránsito intenso. Aunque existen infraestructuras para la movilidad no motorizada, estas se ven frecuentemente comprometidas por la actividad comercial, lo que limita su efectividad; en particular, las ciclorrutas enfrentan problemas de

conectividad. Es crucial señalar que el tráfico en la ZUAP no solo incluye vehículos con origen o destino en la zona, sino también aquellos que la atraviesan o realizan viajes internos.

4. Resultados

En esta sección se presentan los hallazgos derivados de la estimación de los modelos econométricos y los procesos empleados para analizar la disposición de los usuarios a cambiar el vehículo privado ante la implementación combinada de medidas de gestión de la demanda.

4.1. Estimación del modelo Logit binomial para cobro por congestión

Se estimaron modelos Logit binomiales para analizar la elección de los modos de transporte carro y moto en la ZUAP. Para cada modo, se seleccionó el modelo que presentó el mejor ajuste estadístico. Los resultados de los modelos estimados se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Estimaciones del modelo Logit binomial de elección de modos de transporte

Variables	P(Y=carro)	P(Y=moto)
Costos	-0.430** (0.040)	-0.637*** (0.002)
Mujer (=1)	0.356 (0.523)	-0.542 (0.266)
Edad	-0.010 (0.484)	0.025 (0.015)
Tiempo de viaje	-0.095 (0.757)	-0.004 (0.363)
Ingreso Medio	1.255** (0.027)	0.742 (0.337)
Ingreso Alto	0.218 (0.792)	
Parqueadero en destino (=1)	1.584** (0.012)	1.121** (0.035)
Empleado (=1)		0.926** (0.011)
Constante	7.305** (0.017)	7.892*** (0.001)
Elasticidades	-1.97	-1.99
AIC	210.64	231.6
Pseudo R ²	0.109	0.100

Notas: entre paréntesis se encuentra los P-valores. La categoría base para la variable de ingreso es ingreso bajo. *** p < 0.01; ** p < 0.05; * p < 0.1

Los resultados muestran que el coeficiente del costo total del viaje es negativo y estadísticamente significativo, lo cual implica que los usuarios son sensibles a los costos asociados, como se ha evidenciado

en la literatura (Ortúzar y Willumsen, 2011). Analizando los valores de las elasticidades por medio de transporte, los resultados muestran que para el caso de usuarios de carros la elasticidad es de -1.97, mientras que para moto es de -1.99, lo cual indica que la sensibilidad a los costos asociados al viaje es mayor para este último medio de transporte.

El ingreso medio presenta un coeficiente positivo y estadísticamente significativo en la elección de modo de transporte carro, sugiriendo que los usuarios con ingresos medios tienen una mayor propensión a elegir el carro en comparación con otros niveles de ingreso. Esto refleja que este segmento valora la comodidad y flexibilidad del vehículo privado y puede absorber los costos asociados. El pago por parqueadero en destino tiene un coeficiente positivo y estadísticamente significativo tanto en carro como en moto, lo que implica que los usuarios que pagan por estacionamiento en su destino tienen una mayor probabilidad de usar el carro o moto. Esto puede deberse a que han internalizado el costo del parqueadero como parte necesaria de su desplazamiento y valoran la conveniencia que ofrece movilizarse en transporte privado. Las variables de género y edad no resultaron significativas en los modelos, lo que sugiere que, en este contexto, no hay diferencias importantes por género y edad en la elección del modo de transporte.

El cálculo de DCC se basa en aplicar las elasticidades precio de la demanda a los volúmenes de viajes actuales. Para carros y motos, se utilizaron elasticidades de -1.97 y -1.99, respectivamente. Con un incremento del 10% en el costo total del viaje debido al cobro por congestión, se estima una reducción porcentual del 19.7% para carros y 19.9% en moto. Los cálculos reflejan que ambos modos de transporte son igualmente sensibles a cambios en los costos. Para el cálculo del número de viajes que se reduciría por la implementación de un cobro por congestión, se tiene el siguiente procedimiento, utilizando la Ecuación 3:

$$DCC_j = Dbase_j \times (1 - p_j),$$

- $Dbase_{carro} = 30,600$ viajes diarios
- $E_{carro} = -1.97$
- $Dbase_{moto} = 37,400$ viajes diarios
- $E_{moto} = -1.99$

$$\text{Reducción Porcentual Carros} = |-1.97 \times 0.10| = 0.197 = 19.7\%$$

$$DCC_{carro} = 30.600 \times 0.197 = 6032 \text{ viajes que no usarían el carro}$$

$$\text{Reducción Porcentual motos} = |-1.99 \times 0.10| = 0.199 = 19.9\%$$

$$DCC_{motos} = 37.400 \times 0.199 = 7443 \text{ viajes que no usarían el carro}$$

Los resultados muestran, que un incremento en 10% en el costo de viaje debido al cobro por congestión, llevaría a una disminución de 6032 viajes en carro y de 7443 viajes en moto.

4.2. Estimación de reducción vehicular por determinantes ambientales

Para DRA, se consideró el porcentaje de vehículos con más de 15 años de antigüedad: 17% para carros y 4% para motos. Aplicando estos porcentajes a los volúmenes base, se obtiene una reducción de 5202 viajes en carro y 1496 viajes en moto. Esto evidencia que las restricciones ambientales afectan más a los carros que a las motos, dado que la flota de motos es más nueva y, por lo tanto, menos impactada por estas medidas. Estos cálculos se hicieron de acuerdo con la Ecuación 4:

$$DRA_j = Dbase_j(p_{>15años_j}),$$

Porcentaje de vehículos con más de 15 años:

- Carros: 17%
- Motos: 4%

$$DCC_{carro} = 30.600 \times 0.17 = 5202 \text{ viajes que no usarían el carro}$$

$$DCC_{motos} = 37.400 \times 0.04 = 1496 \text{ viajes que no usarían la moto}$$

4.3. Reducción de volumen vehicular ZUAP

La reducción total de viajes en la ZUAP (DZ) es la suma de DCC y DRA para cada modo de transporte. En total, se reduciría el flujo vehicular en 11,234 para carro y 8939 para moto. Los viajes restantes serían 19,366 en carro y 28,461 para motos. Estos resultados indican que, aunque ambas medidas contribuyen a la reducción del uso de vehículos privados, el cobro por congestión tiene un impacto más uniforme entre carros y motos, mientras que las restricciones ambientales afectan significativamente más a los carros debido a la mayor antigüedad de su flota. Los anteriores cálculos se obtuvieron utilizando la Ecuación 5:

$$DZ = Dbase - DCC_j - DRA_j$$

$$DZ = 30,600 - (6032 + 5202) + 37,400 - (7443 + 1496) = 47,827$$

4.4. Recaudo

Asumiendo que los vehículos que continúan circulando pagarán el cobro por congestión, se estima el monto recaudado considerando tarifas diferenciadas para carros y motos durante todo el día. Basado en el estudio de Cal y Mayor (2019) y ajustado a valor presente 2024, se establecen tarifas de 9,900 pesos para carros y 5,600 pesos para motos. Considerando que 19,366 carros y 28,461 motos continúan circulando diariamente en la Zona Urbana de Aire Protegido (ZUAP), el recaudo anual se calcularía de la siguiente manera, suponiendo una aplicación de 250 días al año:

Recaudo anual = $351,000,000 \times 250 = 87,750,000,000$ pesos

Este monto significativo podría destinarse a mejorar la infraestructura de movilidad activa en la ZUAP, incluyendo la construcción de ciclorutas, peatonalizaciones, y otras medidas destinadas a fomentar modos de transporte sostenibles. La inversión en estas áreas no solo contribuiría a reducir la congestión vehicular y las emisiones contaminantes, sino que también promovería una movilidad más saludable y equitativa para los habitantes de Medellín. Es crucial que la distribución de estos fondos se realice de manera equitativa y transparente, priorizando las áreas con mayor necesidad de infraestructura para movilidad activa y garantizando que los beneficios lleguen a todos los segmentos de la población. Además, al asociar el recaudo generado con mejoras en el transporte público y la infraestructura para movilidad activa, se potencia la aceptación pública de las medidas implementadas y se incentiva aún más el cambio modal hacia opciones de transporte más sostenibles. Además, deberá contemplarse los costos de implementación y medidas de control asociados, como campañas de sensibilización social y controles en territorio para garantizar un flujo vehicular con mejoras en sus tiempos de viaje.

Los resultados indican que la implementación combinada de cobros por congestión y restricciones ambientales podría reducir el uso de vehículos privados en la ZUAP, contribuyendo a disminuir la congestión y las emisiones contaminantes. La alta elasticidad precio de la demanda sugiere que los usuarios son muy sensibles a cambios en los costos, lo que respalda la efectividad de las medidas económicas para gestionar la demanda vehicular.

El uso exclusivo de una sola estrategia de gestión puede ser insuficiente. Los cobros por congestión suelen generar oposición social al ser percibidos como medidas restrictivas. Por su parte, las restricciones ambientales, aunque mejoran la calidad del aire, no logran una reducción considerable en la congestión vehicular. Estudios previos, como los realizados por IDOM y C40 (2023), indican que las restricciones ambientales solo reducen en un 5% los kilómetros recorridos, ya que los vehículos más contaminantes no representan una proporción significativa del volumen total.

Al combinar ambas estrategias, se mejora tanto la percepción pública como la eficacia de las medidas. De acuerdo con Fageda (2022), la combinación se percibe como una medida más justa y orientada a la salud de los usuarios. Además, el recaudo generado por el cobro por congestión puede invertirse en mejorar el transporte público y la infraestructura para movilidad activa, incentivando aún más el cambio modal hacia opciones más sostenibles.

Este análisis proporciona una base sólida para la formulación de políticas públicas orientadas a reducir la congestión y mejorar la calidad del aire en Medellín. La combinación de cobros por congestión y restricciones ambientales emerge como una estrategia efectiva y justa, con el potencial de transformar la movilidad urbana y promover una ciudad más sostenible.

5. Conclusiones y recomendaciones de política

La presente investigación ha logrado analizar de manera integral el efecto potencial que puede tener la implementación combinada de un sistema de cobro por congestión y restricciones ambientales sobre los usuarios del vehículo particular en la Zona Urbana de Aire Protegido (ZUAP) de Medellín, desde una perspectiva económica. A través de la estimación de modelos logit binomiales y el cálculo de elasticidades precio de la demanda, se han identificado factores clave que influyen en la elección de vehículos privados, específicamente carros y motos, y se han proyectado los efectos de las medidas propuestas sobre la demanda vehicular y la congestión en la zona.

En primer lugar, los resultados de los modelos logit binomiales revelan que tanto el costo total del viaje como el pago por parqueadero en destino son variables significativamente negativas y positivas, respectivamente, en la elección de carros y motos. Esto indica que un aumento en los costos totales del viaje disminuye la probabilidad de optar por el vehículo privado, mientras que el pago por estacionamiento incrementa la utilidad percibida de su uso. Además, la elasticidad precio de la demanda estimada, de -1.97 para carros y -1.99 para motos, sugiere que la demanda es altamente elástica respecto al costo, lo que respalda la efectividad de medidas económicas como los cobros por congestión para gestionar la demanda vehicular.

Aunque los resultados obtenidos son prometedores, es importante reconocer algunas limitaciones de este estudio. La falta de variables que capturen aspectos más específicos como la percepción de seguridad, la disponibilidad real de transporte público alternativo y factores culturales podría haber afectado la significancia de los resultados del modelo. Además, la posible multicolinealidad entre variables socioeconómicas y costos asociados podría haber sesgado algunas estimaciones. Para futuras investigaciones, se recomienda incorporar variables adicionales que reflejen mejor las preferencias y restricciones de los usuarios, así como realizar análisis longitudinales que permitan observar cambios en el comportamiento modal a lo largo del tiempo tras la implementación de las medidas.

Asimismo, se sugiere explorar el impacto de otras estrategias complementarias, como incentivos para el uso compartido de vehículos y mejoras en la calidad y cobertura del transporte público, que podrían potenciar aún más los beneficios de las medidas de gestión de la demanda. La integración de estudios cualitativos, como entrevistas y grupos focales, también podría proporcionar una comprensión más profunda de las motivaciones y barreras que enfrentan los usuarios al cambiar de modo de transporte.

La implementación combinada de cobros por congestión y restricciones ambientales en la ZUAP de Medellín demuestra ser una estrategia eficaz para reducir la congestión vehicular y las emisiones contaminantes, promoviendo una movilidad más sostenible y saludable. Los hallazgos de este estudio proporcionan una base sólida para la formulación de políticas públicas orientadas a gestionar la demanda vehicular de manera eficiente, equilibrando los aspectos económicos y ambientales. La generación de recursos a través de estas medidas permite financiar mejoras en la infraestructura de movilidad activa, incentivando el uso de modos de transporte alternativos y contribuyendo al bienestar general de la población. Este enfoque integrado no

solo aborda las problemáticas actuales de congestión y calidad del aire, sino que también sienta las bases para un desarrollo urbano más equitativo y sostenible en Medellín.

6. Referencias

Anas, A., & Lindsey, R. (2011). Reducing urban road transportation externalities: Road pricing in theory and in practice. *Review of Environmental Economics and Policy*, 5(1), 66–88. <https://doi.org/10.1093/reep/req019>

Axsen, J., & Wolinetz, M. (2021). Taxes, tolls and ZEV zones for climate: Synthesizing insights on effectiveness, efficiency, equity, acceptability and implementation. *Energy Policy*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112457>

Baranzini, A., Carattini, S., & Tesauro, L. (2021). Designing Effective and Acceptable Road Pricing Schemes: Evidence from the Geneva Congestion Charge. *Environmental and Resource Economics*, 79(3), 417–482. <https://doi.org/10.1007/s10640-021-00564-y>

Basso, L. J., Montero, J. P., & Sepúlveda, F. (2021). A practical approach for curbing congestion and air pollution: Driving restrictions with toll and vintage exemptions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 148, 330–352. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.02.011>

Bernardo, V., Fageda, X., & Flores-Fillol, R. (2021). Pollution and congestion in urban areas: The effects of low emission zones. *Economics of Transportation*, 26–27. <https://doi.org/10.1016/j.ecotra.2021.100221>

Bocarejo, J. P., Lopez Ghio, R., & Blanco, A. (2018). Políticas de tarificación por congestión.

C40 Cities, & IDOM. (2023). Medidas De Gestión De La Demanda De Transporte (Mgd) Dentro De La Zona Urbana De Aire Protegido – Zuap Del Centro De Medellín.

Carran-Fletcher, A., Joseph, C., Thomas MRCagney, F., & Philbin, S. (2020). Research Report 661 Travel demand management: strategies and outcomes (Issue April). www.nzta.govt.nz

Cal y Mayor. (2019). evaluación del impacto socioeconómico, de movilidad y ambiental medidas de gestión de demanda para automóviles y motocicletas presentación ejecutiva.

D'artagnan consulting. (2018). Review of international road pricing initiatives, previous reports and technologies for demand management purposes For Ministry of Transport Final report Review of international road pricing schemes, previous reports and technologies.

de Palma, A., & Lindsey, R. (2011). Traffic congestion pricing methodologies and technologies. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(6), 1377–1399. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.02.010>

Fageda, X. (2022). Price versus Quantity Measures to deal with Pollution and Congestion in Urban Areas: A Political Economy Approach. *Anuario Calderoniano*, 15, 449–470. <https://doi.org/10.13039/501100011033>

Fall, A. N. (2022). Analysis of social acceptability in the implementation of a congestion pricing area in Senegal. *Multimodal Transportation*, 1(4). <https://doi.org/10.1016/j.multra.2022.100036>

García, Jhon., Esteban, C., Alejandro, P., & Corrales, A. (2016). Congestión vehicular en Medellín : una posible solución desde la economía. 1, 175–207.

Gibson, M., & Carnovale, M. (2015). The effects of road pricing on driver behavior and air pollution. *Journal of Urban Economics*, 89, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2015.06.005>

Hidalgo, D., Laurens, N., Ortiz, J., & Serrano, J. (2018). Medidas de gestión de la demanda de transporte en ciudades de América Latina. In Editor CAF.

INRIX. (2023). INRIX Global Traffic Scorecard. INRIX Research, February, 1–44. <https://media.bizj.us/view/img/10360454/inrix2016trafficscorecarden.pdf>

Lehe, L. (2019). Downtown congestion pricing in practice. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 100, 200–223. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.020>

Litman, T. A. (2013). Understanding transport demands and elasticities: how prices and other factors affect travel behavior. Victoria Transport Policy Institute, 1–76. <http://www.vtpi.org/elasticities.pdf>

Mendieta, J. C., & Perdomo, J. A. (2008). fundamentos de economía del transporte: teoría, metodología y análisis de política (Universidad Andes).

Oliveira, L. K., Souza, S. L., Cardoso, L., Bessa Junior, J. E., Oliveira, R. L. M., & Bracarense, L. S. F. P. (2019). Is congestion pricing an urban mobility solution to Brazilian cities? *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 13(2), 302–316. <https://doi.org/10.4090/juee2019.v13n2.302316>

Selmoune, A., Cheng, Q., Wang, L., & Liu, Z. (2020). Influencing Factors in Congestion Pricing Acceptability: A Literature Review. In *Journal of Advanced Transportation* (Vol. 2020). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2020/4242964>

Wang, X., Rodríguez, D. A., & Mahendra, A. (2021). Support for market-based and command-and-control congestion relief policies in Latin American cities: Effects of mobility, environmental health, and city-level factors. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 146, 91–108. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.12.004>

7. Apéndice

Apéndice A

Síntesis de estudios sobre medidas de gestión de la demanda

Apéndice A. Síntesis de estudios relacionados

Autor y año	Tipo de estrategia GD	Objetivo del documento	Datos y Métodos	Resultados principales
Baranzini, Carattini, & Tesauro (2021)	Cobros por congestión	Analizar las opciones de diseño y la aceptabilidad pública del peaje por congestión de Ginebra, Suiza.	Modelo de elección discreta (logit). Datos de encuestas a 1500 residentes en Ginebra, Suiza,	Hallazgos sobre la aceptabilidad pública de los cargos por congestión en Ginebra, evaluando cómo la divulgación de la efectividad de estas políticas afecta las preferencias de los residentes respecto al diseño de dichos cargos
Wang et al. (2021)	Cobros por congestión	Examinar los factores que influyen en el apoyo público a las políticas de alivio de congestión en ciudades latinoamericanas, centrándose en los efectos de la movilidad, la salud ambiental y la aceptación	Modelos de elección discreta (logit). 8178 residentes de 11 ciudades en 10 Latino Americana (Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, México, Panamá, Perú, Uruguay y Venezuela)	Las características individuales, como ser usuario de automóvil privado, y los costos y beneficios personales de las políticas de alivio de la congestión predicen significativamente el apoyo a esas políticas.
Bocarejo, López Ghio, & Blanco (2018)	Cobros por congestión	Explorar los efectos potenciales y consideraciones para implementar políticas de tarificación de congestión en Bogotá, Ciudad de México y Santiago.	Regresión de Poisson, y modelos de demanda directas y Modelos de elección discreta(logit). Se utilizan datos de encuestas Origen destino	Los principales resultados de este documento incluyen el impacto potencial de la tarificación de congestión en la reducción de la congestión, los beneficios económicos esperados y la generación potencial de ingresos fiscales en Bogotá, Ciudad de México y Santiago.
Gibson & Carnovale (2015)	Cobro por congestión	Examinar el impacto de la tarificación vial en el comportamiento de los conductores y la contaminación del aire.	Modelos de panel para estimar el efecto de la tarificación vial en el tráfico y la contaminación del aire. Utiliza datos de flujos vehiculares obtenida en Milán, Italia	Evidencia de sustitución intertemporal y espacial en respuesta a la tarificación vial, reducciones sustanciales en la contaminación del aire y grandes ganancias en el bienestar.
Fall (2022)	Cobros por congestión	Analizar la aceptabilidad social de implementar una zona de tarificación de congestión en la ciudad de Dakar en Senegal y sus implicaciones en las políticas de transporte.	Modelo de regresión y modelo de elección discreta (logit). Para los datos contaban con encuestas (n= 649) en Dakar, Senegal	La percepción social de la congestión y la efectividad del transporte público son factores cruciales para la aceptabilidad del peaje urbano. la implementación del peaje urbano podría tener efectos positivos en las políticas de transporte.
Ramos, Cantillo, Arellana, &	Cobro por congestión	Desarrollar una herramienta de análisis de la demanda para evaluar el comportamiento de los usuarios de automóviles	Modelo de elección discreta (logit). Los datos provenientes de una encuesta de preferencias declaradas que elaboraron	La tarificación vial redujo el uso de automóviles y aumentó el uso del

Sarmiento (2017)		frente a una política de cobro por congestión en Medellín	(n=1098) en Medellín, Colombia.	transporte público, según el análisis de elasticidad de la demanda.
Oliveira, Souza, Cardoso, Bessa Junior, Oliveira, & Bracarense (2019)	Cobro por congestión	explorar las características y la aceptabilidad pública de la tarificación de congestión como solución para mitigar la congestión en las ciudades brasileñas	Simulación de tránsito, Belo Horizonte, Brasil	Factores como la asignación de ingresos, equidad y transparencia en la gestión del sistema pueden influir en la aceptabilidad de la tarificación de congestión
García et al., (2016)	Cobro por congestión	diagnosticar el grado de congestión vehicular de la ciudad de Medellín (Colombia) y proponer alternativas que den solución a dicho problema desde la óptica de la teoría económica	Modelo de elección discreta (logit). Datos de información secundaria de una encuesta local.	En la medida que aumenta el nivel de gasto en transporte, la probabilidad de usar transporte privado disminuye, mientras que la probabilidad de utilizar transporte público aumenta
(Cal y Mayor, 2019)	Cobro por congestión	Evaluar el impacto socioeconómico, de movilidad y ambiental derivable de la aplicación de diferentes medidas de gestión de demanda para automóviles y motocicletas en la ciudad de Medellín	Modelo elección discreta (Logit). Encuestas Preferencias declaradas n = 3,460 (1780 autos) en Medellín, Colombia.	El mejor escenario sería la aplicación de un cobro por congestión y ampliar la medida de pico y placa, con una reducción de viajes del orden del 20% para motos y el 10% para automóviles
(C40 Cities & IDOM, 2023)	Restricciones de circulación basadas en aspectos ambientales	Evaluar alternativas de restricciones basadas en aspectos ambientales a partir de una matriz multicriterio en la Zona Urbana de Aire Protegido de Medellín	Simulación de tránsito a nivel macro. Encuestas a vehículos 1149 (571 autos)	El análisis multicriterio realizado en el estudio identificó como mejor alternativa la restricción de circulación a vehículos de más de 10 años y transporte de carga de más de 15 años de antigüedad. Esta medida resulta beneficiosa en la reducción de emisiones contaminantes, aunque no muestra una mejora significativa en la congestión vehicular.
Barahona, Gallego, & Montero (2019)	Restricciones de circulación basadas en aspectos ambientales	Examinar la efectividad de las restricciones de conducción específicas para vehículos antiguos en la reducción de la contaminación del aire y la promoción del uso de carros más limpios.	Modelos de mercado	Estas restricciones impactan significativamente la composición de la flota y las emisiones de vehículos. La estrategia debería tener una estructura de prohibición completa con exenciones.
Fageda, Flores-Fillol, & Theilen (2022)	Cobros por congestión, Restricciones de circulación basadas en aspectos ambientales, Zonas de	analiza la prevalencia de mecanismos basados en la cantidad sobre mecanismos basados en el precio para	Regresión probit, los datos empleados pertenecen a áreas urbanas en la UE y el Reino Unido con una población superior a 300,000	Prevalencia de medidas basadas en la cantidad sobre medidas basadas en el precio en ciudades de altos ingresos. Una solución alternativa, pragmática y poderosa podría implicar la aplicación de

	bajas emisiones y combinación de estrategias	mitigar la contaminación y congestión en áreas urbanas	habitantes durante el período 2008-2020	sistemas híbridos que combinen esquemas de cantidad y precio.
Bernardo, Fageda, & Flores-Fillol (2021)	Cobros por congestión, Restricciones de circulación basadas en aspectos ambientales, Zonas de bajas emisiones y combinación de estrategias	El objetivo principal es estimar la efectividad de las ZBE para reducir la contaminación y mitigar la congestión en áreas urbanas,	Modelo de efectos fijos de ciudad. Utiliza datos sobre congestión y contaminación de TomTom. Se analizan 130 ciudades de 19 países diferentes durante el período de 2008 a 2016	Los principales resultados de este documento son que las zonas de bajas emisiones (ZBE) son efectivas para reducir la contaminación, especialmente en ciudades altamente contaminadas, pero no tienen un impacto claro en mitigar la congestión. La efectividad de las ZBE puede variar dependiendo del tamaño del área restringida y la rigurosidad de la medida.
Basso, Montero, & Sepúlveda (2021)	Cobros por congestión, Restricciones de circulación basadas en aspectos ambientales, Zonas de bajas emisiones y combinación de estrategias	Analizar la implementación de restricciones de conducción con peajes urbanos y antigüedad como una solución práctica para reducir la congestión y la contaminación del aire en las ciudades	Modelo estático de congestión con consideraciones de contaminación. Datos provenientes de la Encuesta Origen Destino de Santiago de Chile y Encuesta de Vehículos de 2015 del Instituto Nacional de Estadísticas	Los principales resultados del documento incluyen los beneficios netos de alrededor de 1.2 mil millones de dólares al año, con un 58% proveniente de un tráfico más ligero y un 42% de un aire más limpio.

Fuente Elaboración propia