Asistencia técnica para el diseño de tasas por contaminación atmosférica y cobros por emisiones de gases efecto invernadero a nivel subnacional

Informe Tarea 3

Identificación y Diseño de Instrumentos Económicos y Análisis Costo – Beneficio

30 de abril de 2018

The World Bank – Econometría S.A.

Technical Assistance for the Design of Air Pollution Charges and GHG Emission Levies at the Sub-National Level

Contrato 7183732

Supervisión del Contrato

Ernesto Sánchez Triana – Banco Mundial
Pablo Benítez – Banco Mundial

Econometría Consultores

Guillermo Rudas – Director Consultoría

Equipo de Econometría Consultores

Beatriz Elena Arenas
Óscar Rodríguez
Ángela Solanilla Uricoechea
Tito Ávila
Santiago Hernández
María José Libreros

Equipo de Área Metropolitana del Valle de Aburrá – AMVA

Ana Zuleima Orrego
Tatiana Marcela Mosquera
Zoraida Piedrahíta

INFORME TAREA 3

IDENTIFICACIÓN Y DISEÑO DE INSTRUMENTOS ECONÓMICOS Y ANÁLISIS COSTO – BENEFICIO

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1 4

ANTECEDENTES DE INSTRUMENTOS ECONÓMICOS PARA EMISIONES ATMOSFÉRICAS EN COLOMBIA 4

CAPÍTULO 2 7

COSTOS DE RENOVACIÓN DEL PARQUE AUTOMOTOR Y RESPUESTA A SEÑALES DE PRECIO. MODELO DE ANÁLISIS 7

2.1 Modelo para simular decisiones en fuentes móviles 8

2.2 Escenario *business-as-usual* (BAU) 9

2.3 Escenario después de aplicar instrumentos económicos 13

CAPÍTULO 3 17

SIMULACIÓN DE INSTRUMENTOS ECONÓMICOS A FUENTES MÓVILES EN ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ 17

3.1 Efecto de tasas por $PM_{2.5}$ aplicadas sin otro instrumento económico 18

3.2 Efecto de tasas por emisión aplicadas con otros instrumentos económicos 20

3.2.1 Subsidio a la tasa de interés 20

3.2.2 Subsidio a la desintegración (chatarrización) de vehículos 22

3.2.3 Reducción del arancel a vehículos nuevos 23

3.2.4 Reducción del IVA a los vehículos nuevos 23

3.3 Efectos de tasas y subsidios en prevención de muertes prematuras 24

3.4 Efecto de instrumentos económicos sobre otros gases emitidos por fuente móviles 29

CAPÍTULO 4 31

ANÁLISIS BENEFICIO/COSTO DE LOS RESULTADOS ESPERADOS CON LOS INSTRUMENTOS ECONÓMICOS EN FUENTES MÓVILES 31

4.1 Modelo teórico de costos de mitigación de emisiones en fuentes móviles 31

4.2 Estimación de costos de mitigación de emisiones de $PM_{2.5}$ en fuentes móviles del Valle de Aburrá 35

4.3 Análisis Beneficio/Costo y determinación de la tarifa por emisiones 38

CAPÍTULO 5 46

PRINCIPALES LIMITACIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 46

5.1 Principales supuestos y sus limitaciones 46

5.2 Estimación del efecto de la contaminación sobre la salud de las personas 46

5.3 Valor económico de la vida y de la prevención de muertes prematuras .. 47

5.4 Respuesta de los propietarios de vehículos a las tasas y los subsidios 48

5.5 Principales conclusiones del análisis Beneficio / Costo 49

5.6 Recomendaciones generales 50

BIBLIOGRAFÍA CITADA 52

ANEXO I - CARACTERÍSTICAS DE CADA TIPO DE VEHÍCULO, SEGÚN SU EDAD 53

ANEXO II - VALOR, COSTOS DE OPERACIÓN E INGRESOS DE CADA DE VEHÍCULO TIPO, SEGÚN SU EDAD 56

ANEXO III - EFECTO INDIRECTO DE LAS TASAS A $PM_{2.5}$ Y OTROS INSTRUMENTOS ECONÓMICOS SOBRE LAS EMISIONES DE OTROS CONTAMINANTES GENERADAS POR FUENTES MÓVILES EN EL VALLE DE ABURRÁ 61

ANEXO IV - SÍNTESIS DE VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL VALLE DE ABURRÁ 66

ANEXO V - RESULTADOS DE COMBINAR LAS TASAS A LA EMISIÓN DE $PM_{2.5}$ CON OTROS INSTRUMENTOS ECONÓMICOS (SUBSIDIOS) 67

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 4.1 - Muertes evitadas y beneficio económico de reducir emisiones de $PM_{2.5}$ .. 39

Cuadro 4.2 - Análisis Beneficio/Costo - Escenario Moderado: Tasa de $60/gramo y 5,02 muertes evitadas por tonelada de $PM_{2.5}$ reducida 44

Cuadro 4.3 - Análisis Beneficio/Costo - Escenario Moderado: Tasa de $120/gramo y 10,04 muertes evitadas por tonelada de $PM_{2.5}$ reducida 45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - AMVA. Distribución de los vehículos según edad - inventario de fuentes móviles (2015) 10

Figura 2.2 - AMVA - Emisiones y concentración de $PM_{2.5}$ y de otros GEI causadas por fuentes móviles (12 tipos de vehículos) en Escenario *BAU* (2018-2030) 11

Figura 2.3 - Modelo de simulación por vehículo – Escenario *Business-as-usual* 13

Figura 2.4 - Modelo de simulación de instrumentos económicos en fuentes móviles ... 14

Figura 3.1 - Efecto de distintas tarifas de tasas por PM2.5 sobre las emisiones anuales de fuentes móviles (2020 – 2025 – 2030) 19

Figura 3.2 - Efecto esperado de tasas sobre emisiones y concentración de $PM_{2.5}$ 20

Figura 3.3 - Efecto esperado de la tasa retributiva y el subsidio al crédito, sobre las emisiones y la concentración de $PM_{2.5}$ 21

Figura 3.4 - Efecto esperado de la tasa retributiva y el subsidio a la chatarrización de vehículos viejos, sobre las emisiones y la concentración de $PM_{2.5}$ 22

Figura 3.5 - Efecto esperado de la tasa retributiva y la reducción del arancel a vehículos nuevos, sobre las emisiones y la concentración de $PM_{2.5}$ 23

Figura 3.6 - Efecto esperado de la tasa retributiva y la reducción del IVA a vehículos nuevos, sobre las emisiones y la concentración de $PM_{2.5}$ 24

Figura 3.7 - Número de muertes prematuras prevenidas como Efecto esperado de las tasas retribtivas a $PM_{2.5}$ ($60/gramo) 26

Figura 3.8 - Número de muertes prematuras prevenidas como Efecto esperado de las tasas retribtivas a $PM_{2.5}$ ($120/gramo) 28

Figura 3.9 - Efecto esperado de tasas a $PM_{2.5}$ y subsidios sobre emisiones de CO_2 30

Figura 4.1 - Estimación de costos unitarios (marginales) de reducir emisiones de fuentes moviles 33

Figura 4.2 - Costos marginales y totales de reducción de emisiones de fuentes móviles al aplicar una tasa al $PM_{2.5}$ 36

Figura 4.3 - Valor presente del costo marginal de reducción de emisiones de $PM_{2.5}$ en fuentes móviles 38

Figura 4.4 - Beneficios y costos de reducir emisiones con tasas a las emisiones de $PM_{2.5}$ (Sin subsidios) 40

Figura 4.5 - Beneficios y costos de reducir emisiones con tasas a $PM_{2.5}$ de $120/gramo y descuento de 9 puntos en la tasa del crédito 42

INTRODUCCIÓN

Por solicitud del Banco Mundial, Econometría Consultores presta asistencia técnica al Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) para apoyar el desarrollo de las líneas de acción del Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire (PIGECA), en el contexto de las iniciativas sobre tasas por contaminación del aire y el establecimiento de mercados de cupos de emisión de gases efecto invernadero (GEI) que viene impulsando el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (MADS). Como lo plantea el PIGECA, el AMVA busca implementar instrumentos económicos que reduzcan la exposición de la población del Valle de Aburrá a la contaminación del aire por factores primarios y secundarios de fuentes fijas y móviles[1]. De esta manera, se otorga a los regulados mayor autonomía y flexibilidad para decidir cómo alcanzar los objetivos de calidad del aire, se crean incentivos para la aplicación de tecnologías costo-efectivas de reducción de contaminación, se reduce la carga de información sobre los reguladores y se generan fuentes de ingresos para las autoridades competentes[2].

El presente informe corresponde al reporte de la Tarea 3 de la consultoría, orientada a identificar y diseñar instrumentos económicos para incentivar una mejora en la calidad del aire en el AMVA y realizar análisis costo - efectividad y costo - beneficio de dichos instrumentos. A partir de las acciones enunciadas por el AMVA en el eje temático 10 del PIGECA (*Sistema de cargas y beneficios a agentes en función de su aporte positivo o negativo a la calidad del aire*)[3], se identificó un conjunto limitado de instrumentos económicos, en distintas escalas y coberturas de aplicación, susceptibles de ser sometidos a un análisis costo-beneficio y costo-efectividad, para ser puestos a consideración del AMVA, del MADS y el Banco Mundial. Para el desarrollo de esta tarea, se aplicó la metodología y se obtuvieron los resultados que se presentan en el presente informe.

En la primera sección se presenta un análisis somero de los antecedentes y el estado actual de la formulación y aplicación de instrumentos económicos para incidir en los niveles de emisión de contaminantes criterio y en la reducción de emisiones de GEI. En particular, se reseñan los incentivos tributarios a tecnologías limpias que existen en el país, los avances que se han logrado en relación con tasas retributivas por emisiones de GEI y de contaminantes criterio, el impuesto al carbono y el Plan Nacional de Mercado de Cupos de

[1] Teniendo en cuenta la mayor afectación de la calidad del aire en el Valle de Aburrá y dado el énfasis del AMVA en el plan de reconversión vehicular, este trabajo se enfocó en el análisis de las fuentes móviles.
[2] AMVA, *Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire – PIGECA* (2017). Ver Eje Temático 10: Sistema de cargas y beneficios a agentes en función de su aporte positivo o negativo a la calidad del aire (Capítulo 6, p. 37, versión del 4 de julio de 2017).
[3] Ver Capítulo 1 del presente informe.

Emisión de GEI. Igualmente, se ilustra de manera preliminar las interacciones potenciales que pueden existir entre estos diversos instrumentos tanto a nivel nacional como a nivel subregional.

En la segunda sección se presentan el modelo de simulación que se construyó para el análisis de los instrumentos económicos objeto de análisis y aplicado a fuentes móviles de emisión. El modelo parte de identificar la estructura de ingresos y costos según las distintas edades del parque automotor, así como los niveles de emisión de $PM_{2.5}$ y GEI proyectados en un escenario *business-as-usual*, antes de aplicar las medidas del PIGECA. A partir de este escenario y teniendo en cuenta los costos de operación y de renovación del parque automotor, se simularon los efectos de los instrumentos económicos sobre la relación beneficio/costo de los operadores del parque, así como los potenciales efectos sobre las decisiones de renovación del mismo. Dado el acceso a información específica que suministró el AMVA a esta consultoría con suficiente nivel de detalle para cada tipo de vehículo, fue posible construir escenarios de aplicación de cada instrumento de manera ajustada a las condiciones específicas del contexto subnacional del Área. De esta forma, se logró una simulación diferenciada del efecto esperado de cada instrumento sobre las emisiones de cada tipo de vehículo y, de manera diferenciada, según la edad del parque automotor actualmente vigente.

En la siguiente sección se presentan los distintos parámetros que se seleccionaron para simular el efecto potencial de cada uno de los instrumentos económicos a analizar, combinando cargos a las emisiones contaminantes bajo la forma de tasas retributivas con beneficios a quienes disminuyan dichas emisiones. Se simula la aplicación de cargos o tasas proporcionales con las emisiones de $PM_{2.5}$ con diversas modalidades de subsidios para disminuir los costos de renovación al particular que tome la decisión de desintegrar (chatarrizar) su vehículo, así como descuentos en las tasas de interés del crédito para adquirir un vehículo nuevo. Por último, se simulan los potenciales beneficios tributarios del orden nacional (reducción de aranceles e IVA) que estimularían la renovación del parque automotor. Para cada uno de estos instrumentos se identificaron distintos escenarios de aplicación, así como sus efectos sobre el nivel de emisiones en términos de su contribución a las metas de calidad el aire del PIGECA, con sus efectos sobre la reducción de muertes prematuras, así como a la reducción de CO_2, NO_x, SO_2 y carbón negro, de manera consistente con los objetivos de país fijados en la COP 21.

Tomando como referencia los resultados de las simulaciones y combinándolos con la valoración económica de la calidad del aire realizada en la tarea anterior de esta consultoría[4], se procedió al análisis de la relación beneficio/costo de los distintos escenarios de aplicación de los instrumentos económicos seleccionados. En la cuarta sección se presentan los resultados de esta evaluación. Se parte de identificar los costos marginales de reducir las emisiones de $PM_{2.5}$ según el tipo de fuente, simulando la respuesta de cada tipo de fuente al cambio en sus costos y beneficios que se induciría a distintos niveles de aplicación de cada uno de los instrumentos seleccionados. Se identifica así el costo de reducir las emisiones en que incurrirían los propietarios de vehículos al tomar sus decisiones como respuesta a cada señal económica enviada por el regulador, teniendo en cuenta tanto los cargos por contaminar (tasas) como los beneficios que obtienen al disminuir las emisiones. Este costo se contrasta con el beneficio social de estas medidas, expresado como el valor agregado adicional que obtendría la economía al prevenir muertes prematuras generadas por la pérdida de calidad del aire. Adicionalmente, se estiman los recaudos a favor de la autoridad por concento de los cargos que se establecen, así como los egresos en que incurriría para beneficiar a quienes tomen las decisiones compatibles con las metas del PIGECA.

Por último, en la quinta sección se hace un recuento de los principales supuestos aplicados en este análisis, así como de las limitaciones que pueden derivarse de los mismos. Y, a partir de allí y retomando las principales conclusiones del análisis de la relación beneficio/costo de las medidas evaluadas, se formulan algunas recomendaciones generales sobre la aplicación de estos resultados para tomar decisiones de política pública en el contexto subregional.

[4] Ver Econometría, AMVA, Banco Mundial. 2017. *Estimación de costos económicos de la contaminación del aire en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá - Escenario business-as-usual* (Informe Tarea 2)

Capítulo 1

ANTECEDENTES DE INSTRUMENTOS ECONÓMICOS PARA EMISIONES ATMOSFÉRICAS EN COLOMBIA

La legislación colombiana tiene una amplia trayectoria legislativa en términos de definición de instrumentos económicos de política ambiental. Sin embargo, la implementación de los mismos ha sido bastante limitada.

Desde la expedición del Código de los Recursos Naturales en 1974 se introdujo un antecesor del actual principio del contaminador – pagador. En efecto, dicho Código estableció la posibilidad de que el Gobierno Nacional fijara lo que se denominaron tasas retributivas del servicio de eliminación o control de las consecuencias nocivas derivadas de la utilización directa o indirecta de la atmósfera, los cuerpos de agua o el suelo para depositar todo tipo de desechos o desperdicios, aguas negras o servidas, humos y vapores o sustancias nocivas generadas por actividades las lucrativas. Esta norma fue modificada por la Ley 99 de 1993, introduciendo algunos cambios de fondo, dentro de los que se destacan los siguientes:

- Se eliminó la relación que establecía el Código entre el pago de estas tasas y la prestación del servicio de *eliminación o control* de las consecuencias nocivas de las actividades reguladas. En contraste, la nueva norma establece que estas tasas se generan exclusivamente porque esas actividades generan consecuencias nocivas. De esta forma, se responde a querellas jurídicas que argumentaban el no pago de estas tasas, ante la ineficacia de las autoridades ambientales al prestar el servicio de eliminación o control de la contaminación.
- Se modificó el carácter condicional que establecía el Código en el sentido de que esas actividades "podrán sujetarse" al pago de las tasas definidas por el Gobierno Nacional, por el carácter obligatorio que establece la nueva ley cuando fija que esas actividades "se sujetarán" al pago de las mismas.
- La nueva ley amplía la cobertura de las tasas a actividades no lucrativas, dejando además explícito que se incluyen no sólo las actividades económicas lucrativas, sino también a las de servicios que pueden ser no lucrativas.

- De esta forma, la norma actual establece que "la utilización directa o indirecta de la atmósfera, del agua y del suelo, para introducir o arrojar desechos o desperdicios agrícolas, mineros o industriales, aguas negras o servidas de cualquier origen, humos, vapores y sustancias nocivas que sean resultado de actividades antrópicas o propiciadas por el hombre, o actividades económicas o de servicio, sean o no lucrativas, se sujetará al pago de tasas retributivas por las consecuencias nocivas de las actividades expresadas" (Lay 99 de 1993, Art. 42)
- Por último, define un sistema y un método para que sea aplicado por el Gobierno Nacional para definir las tarifas de esas tasas, cumpliendo así con este requisito establecido por la Constitución Política de 1991 con posterioridad a la expedición del Código de 1974.

A pesar de esta larga trayectoria jurídica, el avance en la aplicación de esta norma ha sido mucho más lento. A pesar de la amplia cobertura que establece la ley para sujetarse al pago de estas tasas, desde la creación de la nueva institucionalidad ambiental con la ley 1993 ellas sólo se han reglamentado para vertimientos puntuales a los cuerpos de agua. De todas formas, especialmente a raíz de los compromisos adquiridos por Colombia en relación con el cambio climático, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible viene trabajando en la reglamentación de estas tasas, pero especialmente orientadas hacia emisiones de gases efecto invernadero. No obstante, a la fecha no se conoce que este proceso de reglamentación haya salido a la luz pública.

Otra decisión asociada a las emisiones de gases fue el establecimiento, a partir del segundo semestre de 2017, del impuesto al carbono. Este impuesto se estableció para todos los combustibles fósiles, con excepción del carbón propiamente dicho, a una tarifa del equivalente a 5 dólares por tonelada de CO_2 emitida. Esta tarifa, además de ajustarse anualmente por la tasa de inflación, se incrementará cada año a una tasa del 1% anual. Además, se estableció que los consumidores de estos combustibles que logren demostrar ante las autoridades comportamientos de carbono neutralidad, podrán verse excluidos de pagar este impuesto. Excepción que, por supuesto, puede favorecer a los grandes consumidores de combustibles cuando desarrollen inversiones en reducción de emisiones o en captura de carbono.

En relación con las iniciativas legislativas relacionadas con las emisiones atmosféricas está el proyecto de ley sobre cambio climático radicado por el Ministerio de Ambiente en agosto de 2017 ante el Congreso de la República. En relación con los instrumentos económicos, este proyecto prevé la creación de un mercado nacional de cupos transables de emisión de gases efecto invernadero, los cuales serían subastados o asignados de manera directa a los

actores regulados por parte del Gobierno Nacional. Este mecanismo de asignación de precio al carbono, de ser aprobado, permitiría establecer metas de emisión a los regulados, pero permitiendo que a través de transacciones estas se distribuyan de una manera costo efectiva.

Por último, el Programa de Gestión Integral de la Calidad del Aire aprobado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá define, como uno de sus diez ejes temáticos fundamentales, el establecimiento de un sistema de cargas y beneficios a los agentes contaminantes en función de su aporte positivo o negativo a la calidad del aire. Este eje contempla el diseño e implementación de un sistema de beneficios y cargas que incentive la prevención de emisiones en el transporte, la industria y los servicios (AMVA, 2017).

En este contexto, la existencia en la ley que obliga a fijar tasas a la contaminación atmosférica y la fijación de un impuesto al carbono, así como la iniciativa de crear un mercado de cupos de emisión de GEI y de reglamentar las tasas retributivas para estos gases, se constituyen en un escenario favorable para los objetivos del presente trabajo. Más aún, cuando el Plan del AMVA explícitamente aprobó el diseño específico y la implementación de estos instrumentos económicos, para aplicarlos dentro de las estrategias de mejoramiento de la calidad del aire.

Capítulo 2

COSTOS DE RENOVACIÓN DEL PARQUE AUTOMOTOR Y RESPUESTA A SEÑALES DE PRECIO. MODELO DE ANÁLISIS

En este capítulo se presenta los resultados de una simulación de las eventuales decisiones que tomaría cada propietario de vehículo en relación con la renovación del mismo, frente a una señal de precios orientadas a estimular esta renovación y por ende la disminución de las emisiones generadas principalmente por los vehículos más antiguos.

Para analizar las señales de precio que incentivan a los propietarios de vehículos a que renueven su parque automotor, se seleccionaron dos tipos básicos de estas señales: por una parte, el cobro de un cargo o tasa en proporción a las emisiones de $PM_{2.5}$ de cada vehículo; y por otra, un apoyo o subsidio a quien renueve el vehículo actualmente en operación.

El primer tipo de señal busca incrementar los costos de operación de los vehículos más contaminantes, contrarrestando la señal actual del impuesto vehicular que establece una base gravable decreciente, a medida que el vehículo es más antiguo. Es decir, se busca enviar una señal de precio que contrarreste la señal equivocada del impuesto vehicular, el cual reduce los costos a los vehículos más antiguos, y por ende más contaminantes, desincentivando la renovación del parque automotor. Como complemento a esta señal, se evalúa el impacto potencial de un segundo tipo de instrumento que premie a quien tomen la decisión de renovar su vehículo, otorgando un subsidio a quien certifique la desintegración de su vehículo antiguo.

En términos específicos, el primer tipo de instrumento aquí evaluado sería una tasa retributiva ya establecida en la legislación colombiana y que se cobraría, en principio, usando una variable proxy que refleje el nivel de contaminación generada por cada tipo de vehículo, según la edad del mismo. Para analizar esta tasa, se usa un parámetro que relaciona cada tipo de vehículo, y su respectiva edad, con el nivel de emisiones de $PM_{2.5}$ generadas. Igualmente, se evalúan los efectos que tendría esta tasa sobre los costos de operación del vehículo y sobre las decisiones del propietario en términos de renovar o no el vehículo, simulando los efectos sobre la rentabilidad de cada tipo de vehículo de cada nivel de tarifa de la tasa que se imponga.

El segundo tipo instrumento, un subsidio a quien renueve su vehículo y desintegre el antiguo, se evalúa mediante la simulación de los efectos sobre las decisiones de renovación que, una vez aplicada la tasa, tenga alguno de los siguientes beneficios: una reducción en la tasa de interés para un crédito orientado a la adquisición de un vehículo nuevo; un pago por la desintegración del vehículo antiguo, en proporción al avalúo de dicho vehículo definido por el Ministerio de transporte para efectos de la liquidación del impuesto vehicular; una reducción del arancel del vehículo nuevo importado; o una reducción del IVA del vehículo nuevo.

A continuación, se presenta una síntesis conceptual del modelo de simulación aplicado para identificar las decisiones de cada propietario, frente a las señales de precio que recibe, así como sus repercusiones sobre el nivel de contaminación. En seguida, se describen los procedimientos empleados para calcular cada una de las variables requeridas para calcular los costos de operación de los vehículos, sus respectivos ingresos y las inversiones requeridas para renovarlos. A continuación, se describe la relación entre cada tipo de vehículo y su edad, con los niveles de contaminación que generan en las condiciones de operación, tal como fue estimado por el inventario de fuetes móviles del AMVA. Y, finalmente, se presentan los resultados de la aplicación del modelo de simulación, expresados en una estimación de los costos de mitigación de las emisiones en que incurriría el total del parque automotor, así como el efecto que tendrían los subsidios al modificar estos costos[5].

2.1 MODELO PARA SIMULAR DECISIONES EN FUENTES MÓVILES

La simulación empleada para estimar los costos de mitigación de emisiones y la respuesta esperada a las señales de precio enviadas por la autoridad a los propietarios de vehículos, parte de un supuesto básico: frente a distintas alternativas de costos de operación y de renovación de un vehículo, su propietario tomará aquella que minimice sus costos y por tanto maximice su rentabilidad. Para aplicar este supuesto, para cada tipo de vehículo identificado en el inventario de fuentes móviles del AMVA y seleccionado para este estudio[6], se construyeron dos escenarios: uno que refleja las tendencias del parque automotor en la situación actual, antes de aplicar las medidas a ser evaluadas y que se

[5] En el siguiente capítulo se emplean estos resultados para contrastar los costos aquí estimados con los beneficios de reducir las emisiones, así como la determinación de las tarifas óptimas a aplicar a las tasas retributivas por emisiones de PM2.5.
[6] Para este análisis se seleccionaron 12 tipos de vehículos reportados en el inventario de fuentes móviles del AMVA: motos de cuatro tiempos livianas (gasolina), motos de cuatro tiempos medianas (gasolina), autos medianos (diésel), taxis livianos (diésel), buses livianos (diésel), buses medianos (diésel), buses pesados (diésel), camiones livianos (diésel), camiones medianos (diésel), camiones pesados (diésel), tractocamiones pesados (diésel) y volquetas pesadas (diésel). Esta selección se realizó teniendo en cuenta que, según el inventario del AMVA, estas 12 categorías de vehículos aportaban en 2015 el 92% de las emisiones de material particulado fino (PM2.5) del total aportado por las fuentes móviles.

denomina escenario *business-as-usual* (BAU); y otro, que simula el efecto esperado de aplicar los instrumentos económicos que aquí se proponen.

2.2 ESCENARIO *BUSINESS-AS-USUAL* (BAU)

Este escenario se construye a partir de la información de detalle de las características del parque automotor de cada tipo de vehículo reportada en el inventario de fuentes móviles y en los datos del escenario BAU del parque automotor construido por la Pontificia Universidad Bolivariana (PUB) para el AMVA[7]. En particular, el inventario y el escenario BAU suministran, para cada tipo de vehículo, una proyección para el escenario BAU con cinco variables básicas: (i) el número de vehículos en el año base (2015), distribuidos según el respectivo modelo, es decir, indicando el número de vehículos según su edad (ver Figura 2-1); (ii) la proyección 2015-2030 de vehículos retirados (viejos) y las ventas de vehículos nuevos, por tipo de vehículo; (iii) la proyección del número de vehículos en operación (2015-2030), siguiendo las tendencias actuales y sin aplicar las medidas del PIGECA; (iv) la proyección del kilometraje recorrido por el total de vehículos de cada tipo; y (v) la proyección de emisiones de $PM_{2.5}$, CO_2, carbón negro, NO_x, SO_2 y compuestos orgánicos volátiles, generadas por el total de vehículos de cada tipo. Con base en esta información, se proyectó el número de vehículos de cada edad, año por año, desde 2015 hasta 2030. Adicionalmente, fue posible identificar tres variables implícitas en el inventario: el kilometraje recorrido por un vehículo promedio de cada tipo, según su edad; el consumo de combustible anual de cada tipo de vehículo, según su edad; y los factores de emisión según la edad de cada vehículo, implícitos en el inventario de fuentes móviles, requeridos para hacer las simulaciones del cambio de emisiones al aplicar las medidas propuestas[8].

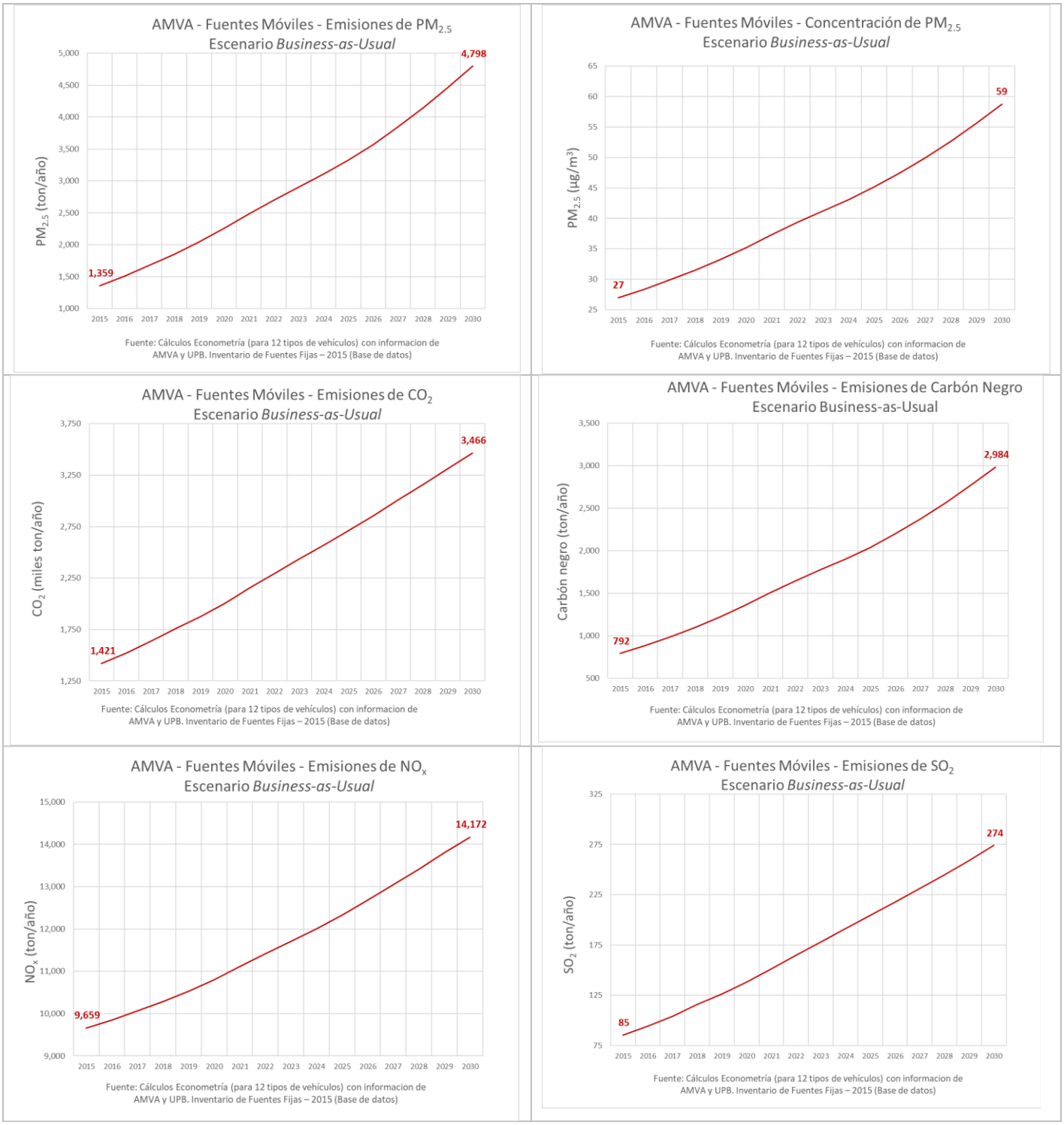
Por otra parte, a partir del mismo inventario de fuentes móviles se identificaron las proyecciones de concentración de $PM_{2.5}$ y de emisiones de este mismo contaminante, así como de las emisiones de los principales GEI para los 12 tipos de vehículos seleccionados para este estudio (ver Figura 2.1).

[7] Por solicitud del AMVA, la PUB suministró a Econometría Consultores todas las bases de datos de los inventarios de fuentes móviles y de fuentes fijas, con el correspondiente acuerdo de confidencialidad requerido.
[8] Ver Anexo I, figuras A-I.1 y A-I.2.

Figura 2.1 - AMVA. Distribución de los vehículos según edad - inventario de fuentes móviles (2015)

Fuente: Cálculos Econometría con base en AMVA y UPB. Inventario de Fuentes Fijas – 2015 (Base de datos)

Figura 2.2 - AMVA - Emisiones y concentración de $PM_{2.5}$ y de otros GEI causadas por fuentes móviles (12 tipos de vehículos) en Escenario *BAU* (2018-2030)



Fuente: Cálculos Econometría con base en AMVA y UPB. Inventario de Fuentes Móviles – 2015 (Base de datos)

Estas características de los principales vehículos emisores de contaminación (la distribución por edades en 2015 y las proyecciones 2015-2018 tanto de esa distribución por edades como de las emisiones) se toman como punto de referencia (escenario BAU) para el análisis del impacto potencial de los instrumentos económicos. Para tal efecto, se asume que el actual parque automotor y las proyecciones BAU con las características descritas, obedecen a un flujo de vehículos caracterizado por el parque automotor actual (2015) y la evolución de compras de nuevos vehículos y de salidas de algunos vehículos antiguos en los años subsiguientes.

Para el presente análisis se asume que este flujo de vehículos obedece a las decisiones que toma cada propietario tomando en cuenta sus expectativas estrictamente económicas, es decir contrastando los beneficios futuros que obtendría manteniendo el vehículo antiguo con los beneficios que obtendría si lo renueva. Para simular el comportamiento de los propietarios de vehículos antes de que las medidas del PIGECA del AMVA incidan en sus decisiones, se identifican dos situaciones para un vehículo típico de cada uno de los 12 vehículos seleccionados para este estudio: los beneficios netos (ingresos menos costos) que se obtendrían desde 2018 hasta 2030, si mantiene el actual vehículo; y los beneficios netos que se obtendrían si se renueva el vehículo. Adicionalmente, en el caso de la renovación del vehículo, se consideraron dos posibilidades: adquirir el nuevo vehículo con recursos propios; o recurrir a un crédito en las condiciones normales del mercado financiero. Además, para cada vehículo se hacen estas simulaciones para las distintas edades del vehículo actual, es decir desde un vehículo nuevo hasta un vehículo con 80 años de operación.

Para simular el comportamiento de cada propietario en relación con mantener su actual vehículo o renovarlo, en el escenario BAU, se aplica el siguiente procedimiento (ver Figura 2-3 en su lado izquierdo):

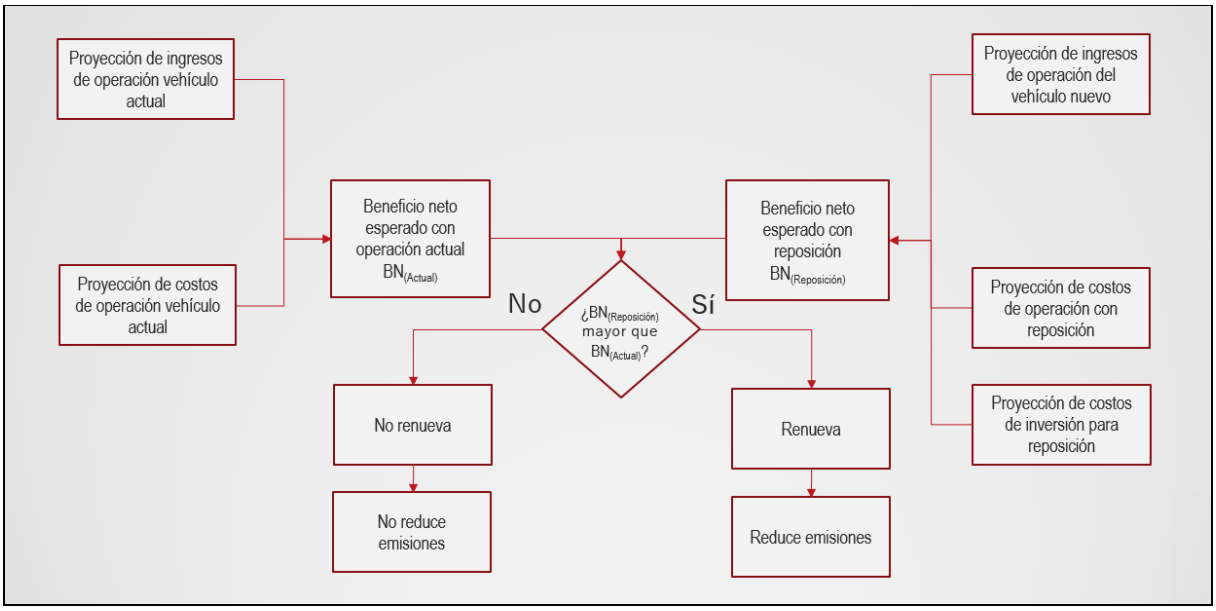
1) Se proyectan los ingresos presentes y en años futuros, para un vehículo que se mantiene en operación sin renovarse.
2) Se proyectan los costos de operación y mantenimiento, así como el pago de obligaciones e impuestos, para un vehículo que se mantiene en operación sin renovarse.
3) Se calcula el valor presente del beneficio neto (ingresos totales menos costos totales).

Se asume que estas proyecciones reflejan la situación actual del parque automotor[9]. En relación con los costos de inversión para renovar el vehículo (la parte derecha de la figura),

[9] Para mayores detalles de estos cálculos y proyecciones, véase el Anexo II y en particular el cuadro A-II.1.

se omiten de esta parte del análisis ya que se asume que corresponden a los vehículos retirados del parque automotor. Es decir, se asume que los vehículos que aún se encuentran operando (así hayan cambiado de dueño) generan un beneficio neto mayor que si se hubiese procedido a reemplazarlos[10].

Figura 2.3 - Modelo de simulación por vehículo – Escenario *Business-as-usual*



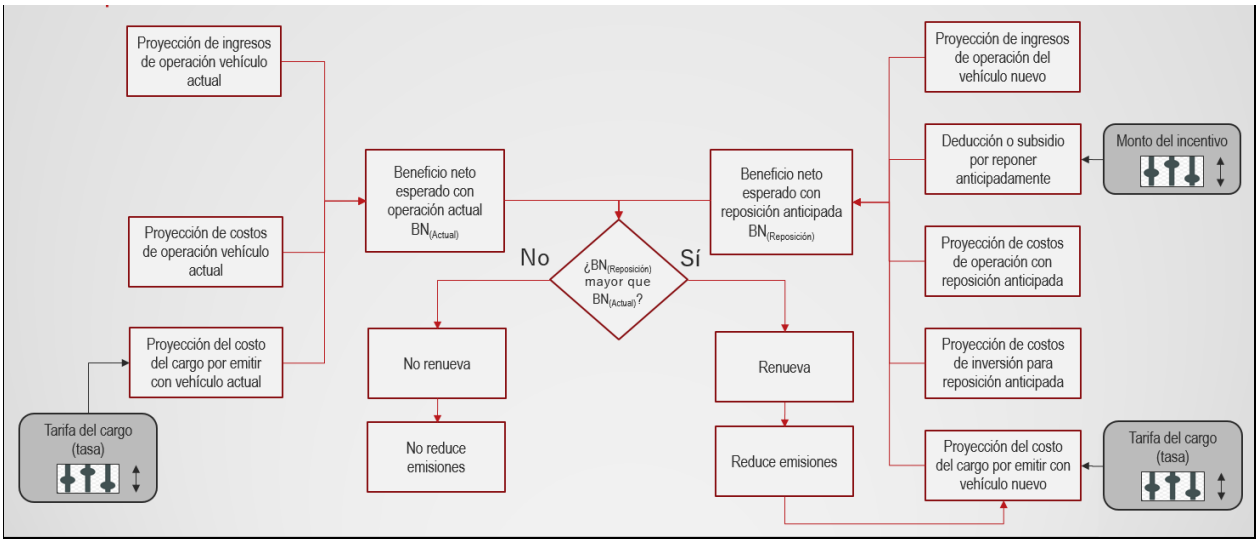
Fuente: Econometría Consultores. Este trabajo

2.3 Escenario después de aplicar instrumentos económicos

Para evaluar el impacto potencial de la aplicación de los instrumentos aquí propuestos, se construye un modelo de simulación que refleje los cambios generados en la estructura de costos del modelo descrito en la Figura 2.3. En primer lugar, se incorpora un nuevo costo de operación: el pago de una tasa o cargo a cada vehículo proporcional a la cantidad de emisiones de $PM_{2.5}$ de cada tipo de vehículo y según su edad. Luego, se incorporan cada uno de los beneficios complementarios, que sería percibidos por quienes cambien su vehículo por uno nuevo y realicen una desintegración del vehículo viejo.

[10] Esto no significa que nadie cambie de vehículo y que no haya movilidad en la propiedad de los vehículos en uso. Lo que expresa es que, con excepción de aquellos vehículos que realmente salen de circulación en el AMVA, quien decide cambiar uno viejo por otros nuevo termina vendiéndolo y el nuevo propietario, quien lo mantiene en operación. Como las compras de vehículos nuevos es mayor que las salidas de circulación de vehículos viejos (o al menos la salida del AMVA), esto se expresa en el crecimiento del parque automotor en el Área.

Figura 2.4 - Modelo de simulación de instrumentos económicos en fuentes móviles



Fuente: Econometría Consultores. Este trabajo

Como se observa en la Figura 2.4, para incorporar la tasa por emisiones y los beneficios por renovación del vehículo, el modelo de simulación se modifica aplicando los siguientes pasos:

1) A la proyección de la estructura de ingresos y costos del escenario BAU se le agrega una proyección del pago a efectuar por cada unidad de contaminación (la tasa).

2) Manteniendo el mismo flujo de ingresos para el vehículo actual (sin renovación), se calcula el nuevo valor presente del beneficio neto, pero con el incremento de los costos de operación por efecto de la nueva tasa por emisiones (lado izquierdo de la figura).

3) Luego, en el escenario con la tasa por emisiones y antes de incorporar cualquier beneficio por la renovación, se construye un nuevo flujo de ingresos y gastos, correspondiente a la sustitución del vehículo viejo por uno nuevo. Para esta proyección se asume que el propietario del vehículo recibe un ingreso por la venta del mismo; e incurre en un gasto, por la adquisición del vehículo nuevo. Además, se generan dos simulaciones: una, si renueva el vehículo recurriendo a los recursos provenientes del flujo de caja de la operación del mismo; y otra, recurriendo a un crédito en condiciones normales del mercado financiero.

4) En este momento, se procedió a simular el efecto que tendría la tasa sobre el valor presente del beneficio neto, para cada vehículo típico y según su respectiva edad (de 1 a 80 años). Esta simulación múltiple (12 tipos de vehículo y una simulación para

cada edad) se aplicó además a múltiples niveles crecientes de la tarifa de la tasa por emisiones, expresada en pesos por gramo de $PM_{2.5}$ emitido al año[11].

5) Aplicando el procedimiento anterior, para cada uno de los tipos de vehículo (12 seleccionados) y para cada edad del mismo (de 1 a 80 años) se obtuvieron tres estimaciones del valor presente del beneficio neto para todo el período de análisis: (i) manteniendo el vehículo actual, sin renovarlo; (ii) renovando el vehículo, con recursos propios, usando el flujo de caja generado por el vehículo; y (iii) renovar el vehículo, recurriendo a un crédito en condiciones normales de mercado. Es decir, tres estimaciones de valor presente del beneficio neto, después de aplicar la tasa propuesta y a varios niveles de tarifa de dicha tasa. Con esta información, se procede a identificar la decisión más favorable para el propietario del vehículo: aquella que arroje el mayor valor presente del beneficio neto. De esta forma, se logra identificar para cada vehículo (según su edad), si le conviene renovarlo o no; y, en caso de que sea así, en qué año (desde 2018 hasta 2030) le convendría hacerlo.

6) A continuación, se procede a identificar las emisiones de $PM_{2.5}$ que haría cada uno de los vehículos a partir del momento en que se renueva, para conocer el flujo de esas emisiones antes y después de la renovación del vehículo. Es decir, para identificar el cambio en las emisiones cuando ese vehículo antiguo (de mayores emisiones) se sustituye por uno nuevo (de menores emisiones).

7) Con este resultado de la simulación para cada vehículo individual, se procede a expandir este resultado a todo el parque automotor proyectado de cada tipo de vehículos. Para hacerlo, se aplica este procedimiento:

    a. A las proyecciones (desde 2018 hasta 2030) del número de vehículos de cada edad y que corresponde al escenario BUA, se les aplica el factor de emisión de $PM_{2.5}$ por vehículo y según su edad. Esta proyección de emisiones totales corresponde al escenario BUA de emisiones, antes de aplicar las tasas por emisión.

    b. Luego, para cada tarifa de la tasa que se ha simulado, a la misma proyección de número de vehículos por edades se le aplica el factor de emisión del vehículo nuevo, a partir del año en que la simulación arroja que se renueva ese vehículo. Para los que no se renuevan, o para los años en donde todavía no ha resultado atractivo renovarse, se mantiene el factor de emisión del vehículo antiguo. Como resultado, se obtiene una proyección de emisiones después de la aplicación de la tasa. Es decir, el resultado de las decisiones voluntarias de

[11] Para efectos de la simulación, se aplicaron tarifas incrementales de 5 en 5 pesos por gramo de $PM_{2.5}$ emitido al año, hasta una máxima de 130 pesos por gramo.

renovar algunos vehículos, ya que les resulta más rentable cambiar el vehículo y no pagar las tasas por se generarían si sigue operando el vehículo antiguo.

8) Una vez construidos los distintos escenarios de reducción voluntaria de emisiones totales como respuesta al cobro de las tasas, de manera simultánea a este cobro se simula la inclusión de otro tipo de señal económica: premiar a quienes renueven el vehículo. Para tal efecto, para cada nivel de tarifa se vuelve a aplicar el procedimiento descrito arriba (pasos 1 a 7), pero con una variante: en el paso 1, además de incluir un incremento de costos (la tasa por emisiones) se incluye alternativamente alguno de los beneficios que se otorgan a quienes renueven su vehículo. Al respecto se seleccionaron opciones, aplicable únicamente a quienes desintegren el vehículo viejo, tales como: la reducción de la tasa de interés del crédito requerido para sustituir el vehículo antiguo por uno nuevo; el pago directo de un subsidio a quien decida desintegrar (o *chatarrizar*) el vehículo antiguo; la reducción del arancel; o la reducción del IVA. Todas estas opciones se traducen en una reducción de los costos requeridos para renovar el vehículo y se reflejarán en el valor presente del beneficio neto del propietario. Con cada una de estas ventajas, se vuelven a hacer las simulaciones para cada nivel de tarifa de la tasa y se evalúan los resultados.

Capítulo 3

SIMULACIÓN DE INSTRUMENTOS ECONÓMICOS A FUENTES MÓVILES EN ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ

Para evaluar el impacto potencial de distintos niveles de las tasas por emisiones, así como de los beneficios a quienes renueven sus vehículos, el modelo descrito en el punto anterior se aplicó bajo los siguientes parámetros:

a) Inicialmente, se hizo la simulación exclusivamente para las tasas y sin aplicar ninguno de los subsidios seleccionados. El modelo se aplicó partiendo de una tasa nula (escenario BAU) e incrementándola sistemáticamente de cinco en cinco pesos por gramo de $PM_{2.5}$ emitido al año.

b) El segundo escenario consistió en aplicar las mismas tasas, pero adicionalmente bajar la tasa de interés del crédito para adquirir un vehículo nuevo. Con una tasa de interés vigente en el mercado de 15% anual[12], para efectos de este análisis se hicieron dos simulaciones: rebajando esta tasa de interés en 6 puntos y en 9 puntos porcentuales.

c) Un tercer escenario se aplicó igualmente cobrando las mismas tasas por emisiones, pero otorgando ahora como beneficio un pago a quien desintegre el vehículo. Este pago se calculó como un porcentaje sobre la base de liquidación del vehículo del mismo tipo y de la misma edad del vehículo desintegrado (aplicando los avalúos de la *Tabla de base gravable 2017* expedida por el Ministerio de Transporte)[13], con dos ejemplos: 20% y 40% de este avalúo.

d) Un cuarto escenario, consistente en cobrar las tasas por emisiones, pero disminuyendo los costos de adquisición del vehículo nuevo a quienes desintegren el viejo a través de la exclusión del pago del arancel de importación (actualmente en 15%).

[12] Tasa promedio de crédito de libre inversión reportada por el Banco de la República, conformada por una tasa de interés de depósitos a término fijo (DTF) de 5.17% anual y un *spread* de 9.8% anual.
[13] Para una referencia a las bases de cálculo de estos beneficios para cada tipo de vehículo y para cada una de sus respectivas edades, véase la figura A-II.1 en el Anexo I.

e) Finalmente, un quinto escenario cobrando las tasas por emisión y reduciendo los costos de adquisición del vehículo nuevo, pero reduciendo el IVA actual del 19% a 5% o a 0%, igualmente aplicable únicamente a quienes desintegren el vehículo viejo.

En seguida se presentan los resultados de cada una de estas simulaciones, tanto en relación con las disminuciones de las emisiones de $PM_{2.5}$, así como de sus efectos sobre los niveles de concentración en el aire[14].

3.1 Efecto de tasas por $PM_{2.5}$ aplicadas sin otro instrumento económico

Al simular el efecto de distintas tarifas de la tasa por emisiones $PM_{2.5}$ se observa el efecto diferencial que se esperaría sobre estas emisiones en el AMVA del total de vehículos de los 12 tipos incluidos en este análisis. Como se observa en la Figura 3.1, se pueden observar los siguientes hechos:

- Cuando la tarifa es cero, es decir cuando no se aplican las tasas, las emisiones de $PM_{2.5}$ serían iguales a las proyectadas para el escenario BAU, es decir, 2.253 toneladas en el año 2020, 3.322 toneladas en el año 2025 y 4.798 toneladas en el año 2030.
- En cada uno de estos mismos años, al simular incrementos paulatinos de la tarifa de la tasa, el modelo arroja cada vez una mayor reducción de las emisiones. Por ejemplo, al aplicar una tarifa de 120 pesos por gramo de $PM_{2.5}$, las emisiones totales bajarían a 1.880 en el 2020, a 2.644 en el 2025 y a 3.697 en 2030. Es decir, en este último año se obtendría una reducción entre una cuarta y una quinta parte de las emisiones proyectadas para ese mismo año en el escenario BAU (es decir, sin aplicar la tasa).

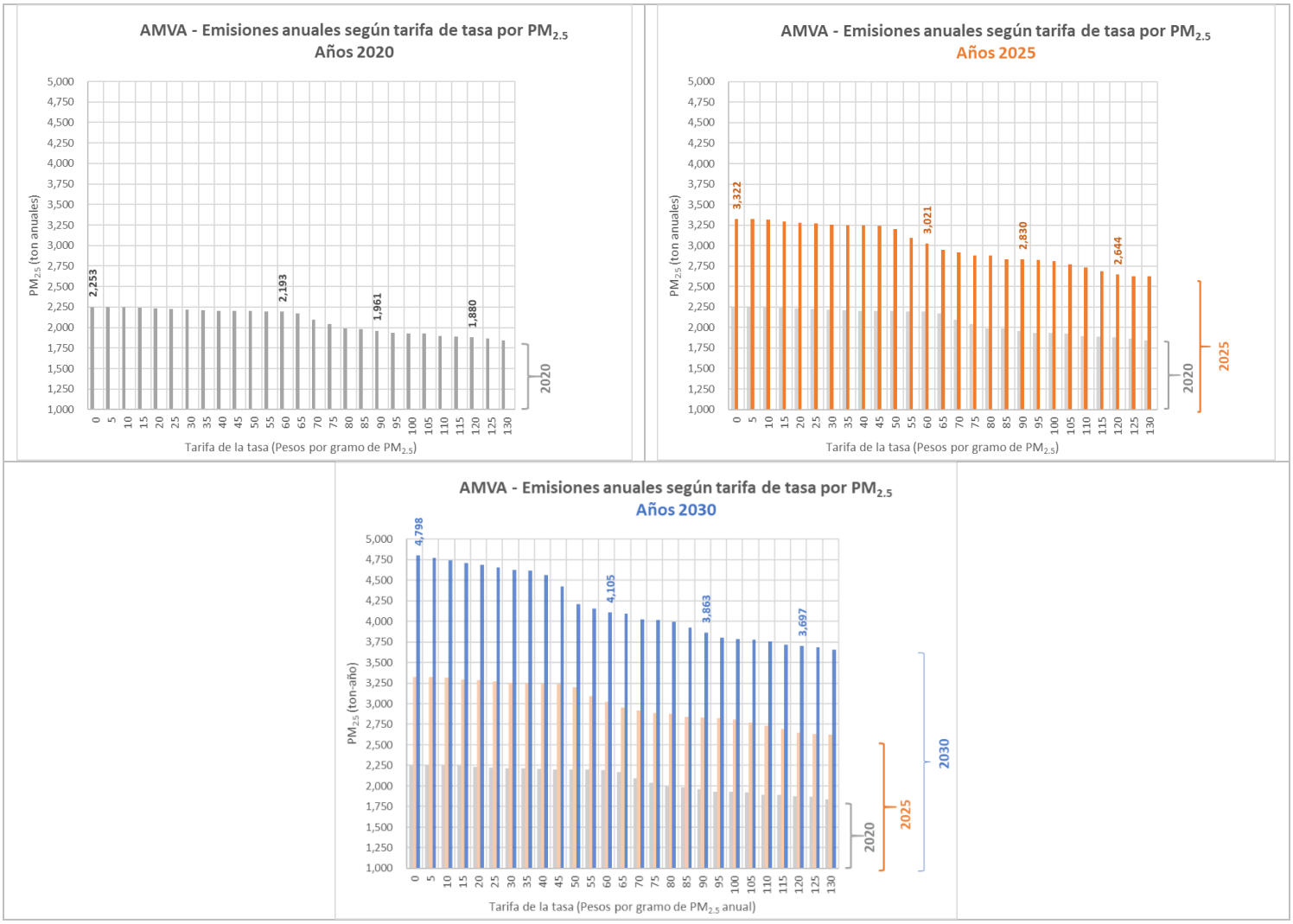
Expresado de otra forma, los anteriores resultados muestran que, a cada nivel de tarifa de la tasa, la proyección de emisiones durante los años durante los cuales se aplica este instrumento se reduce en relación con las proyecciones del escenario BAU. En términos gráficos, la Figura 3.2 muestra estos resultados:

- En el lado izquierdo se observa que, antes de aplicar la tasa y de acuerdo con las proyecciones del escenario BAU del PIGECA, en 2017 las emisiones serían de 1.674 toneladas de $PM_{2.5}$, las cuales se incrementarían hasta alcanzar 4.798 toneladas en 2030.

[14] Para calcular los efectos sobre la concentración de $PM_{2.5}$ en el aire, se empleó la relación entre emisiones y concentración que reporta el PIGECA al construir en escenario BAU y el escenario después de aplicar las medidas de dicho Programa.

- Al aplicar una tasa de 120 pesos por gramo de $PM_{2.5}$ emitido, esta tendencia se reduce significativamente para alcanzar 3.697 toneladas emitidas en 2030, es decir una reducción del 23% en relación con el escenario BAU.
- Esto significa igualmente una reducción en la concentración de $PM_{2.5}$ en el aire del AMVA[15]: de una proyección de 59µg/m³ en el escenario BAU para 2030, al aplicar esta tasa de 120 pesos por gramo se obtendría en ese año una concentración de 49µg/m³.

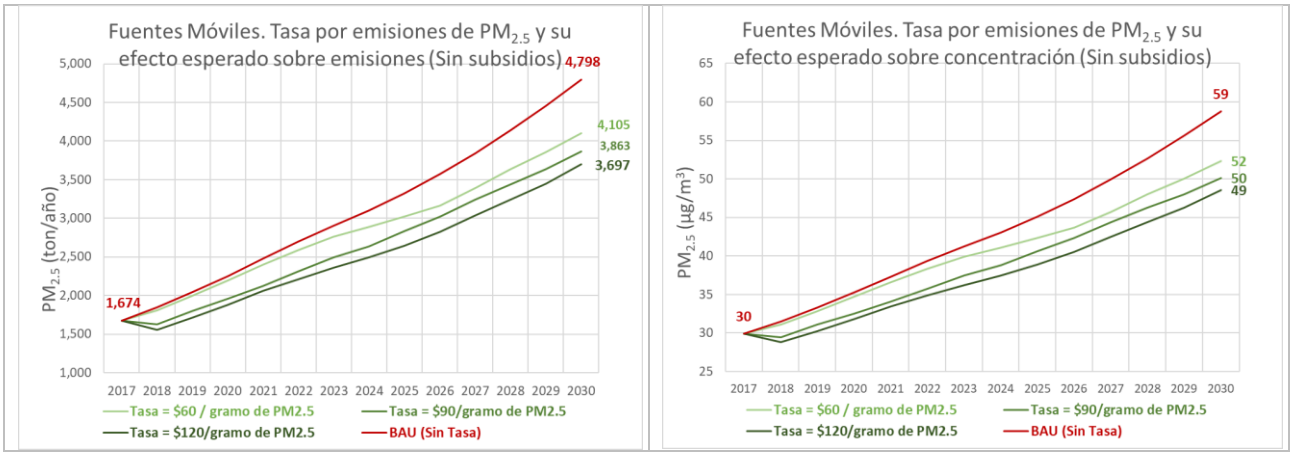
Figura 3.1 - Efecto de distintas tarifas de tasas por PM2.5 sobre las emisiones anuales de fuentes móviles (2020 – 2025 – 2030)



Fuente: Cálculos de Econometría Consultores para este trabajo

[15] Para esta estimación, se empleó la relación implícita que se presenta en el PIGECA entre la proyección de emisiones de $PM_{2.5}$ y la concentración de este material particulado en el aire.

Figura 3.2 - Efecto esperado de tasas sobre emisiones y concentración de $PM_{2.5}$



Fuente: Cálculos de Econometría Consultores para este trabajo

3.2 EFECTO DE TASAS POR EMISIÓN APLICADAS CON OTROS INSTRUMENTOS ECONÓMICOS

Al combinar las tasas con algún incentivo que beneficie a quienes renuevan su vehículo, el efecto esperado sobre la reducción de emisiones se intensifica. Para evaluar este efecto potencializado, se seleccionaron las siguientes señales económicas para ser empleadas de manera combinada con la aplicación de las tasas a las emisiones de $PM_{2.5}$ y condicionadas todas ellas a la desintegración (chatarrización) del vehículo antiguo que se va a reemplazar: (a) un subsidio a las tasas de interés del crédito para adquirir un vehículo nuevo, más amigable con la calidad del aire que el antiguo; (b) el pago de un subsidio por la chatarrización del vehículo antiguo; (c) la reducción del arancel efectivo pagado por un vehículo nuevo; y (d) la reducción del IVA al vehículo nuevo.

En esta sección se describe los parámetros de simulación que se emplearon para analizar los resultados esperados de cada una de esas alternativas. Y se presentan los resultados encontrados, en términos de los efectos esperados sobre las emisiones de $PM_{2.5}$ y las mejoras en la calidad del aire al disminuir sus niveles de concentración en la atmósfera.

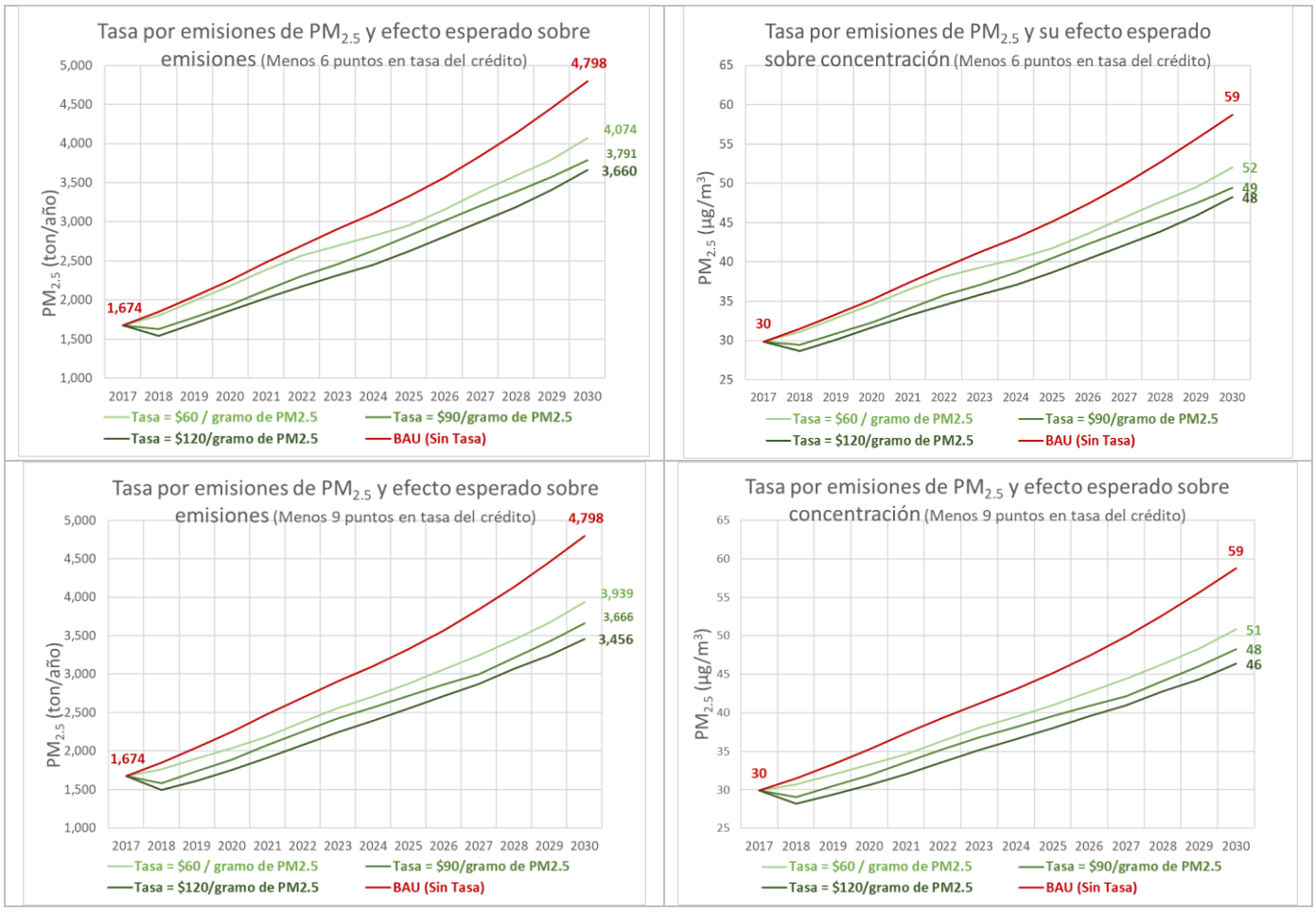
3.2.1 Subsidio a la tasa de interés

Usualmente una de las principales barreras para realizar inversiones de mediano y largo plazo es el costo del capital. Para incentivar la modernización del parque automotor, se analiza aquí el efecto esperado de combinar las tasas por emisiones con un descuento (subsidio) a la tasa de interés corriente en el mercado de crédito. Para tal efecto, partiendo de una tasa corriente

de alrededor de 15% anual[16], se simularon dos escenarios: uno, hacer un descuento de 6 puntos porcentuales a esta tasa; y otro, hacer este descuento de 9 puntos porcentuales.

Al aplicar al modelo de simulación con estos descuentos, se obtienen los resultados sobre los niveles de emisión y las concentraciones de $PM_{2.5}$ en el AMVA que se muestran en la siguiente figura. Allí se observa que, al aplicar este subsidio simultáneamente con una tasa de $120 por gramo de $PM_{2.5}$, en 2030 se esperaría una concentración de 48 o de 46 microgramos por metro cúbico (dependiendo del nivel de subsidio), frente a una proyección del escenario BAU de 59 μg/m³; y una mejora entre 1 y 3 microgramos en relación con el escenario de aplicar únicamente la tasa por emisiones, sin este subsidio.

Figura 3.3 - Efecto esperado de la tasa retributiva y el subsidio al crédito, sobre las emisiones y la concentración de $PM_{2.5}$



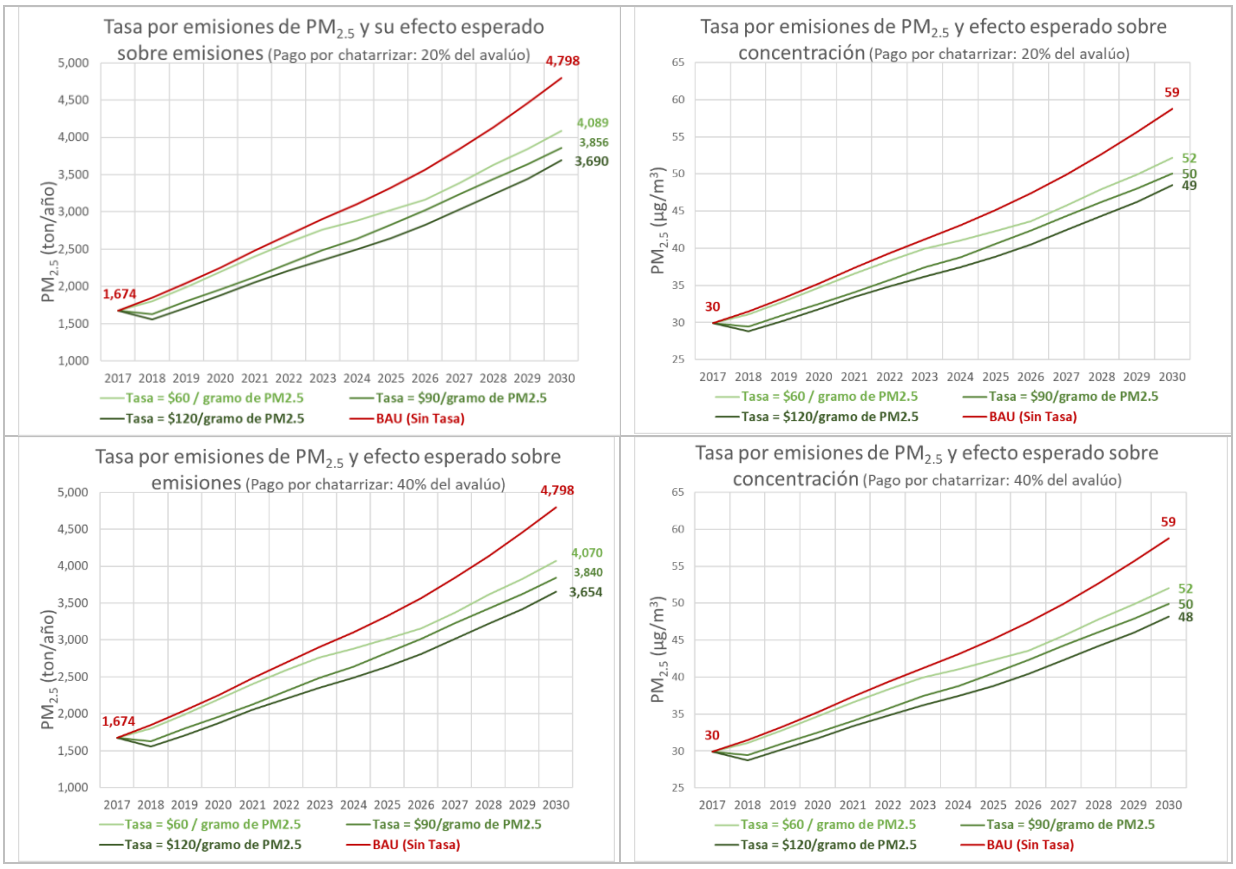
Fuente: Cálculos de Econometría Consultores para este trabajo

[16] Correspondiente a un DTF del 5.17% y un *spread* bancario del 9.80%

3.2.2 Subsidio a la desintegración (chatarrización) de vehículos

Se analiza aquí el efecto esperado sobre las emisiones y la concentración de $PM_{2.5}$ al combinar las tasas a la contaminación con un subsidio a la desintegración del vehículo para reemplazarlo por uno nuevo. Para la simulación, se aplica un subsidio equivalente a un porcentaje sobre el valor del vehículo viejo, de acuerdo con el avalúo realizado por el Ministerio de Transporte como base para liquidar el pago del impuesto vehicular. La simulación y los resultados que se presentan en la siguiente figura corresponden a dos niveles de aplicación de este incentivo: un pago del 20% sobre el avalúo del vehículo a desintegrar y un pago del 40% sobre este avalúo. Los resultados muestran que al aplicar una tasa de $120 por gramo de $PM_{2.5}$ emitido conjuntamente con este subsidio a la chatarrización, del escenario BAU en 2030 (59 μg/m³) se pararía a valores entre 48 y 49 μg/m³, según el nivel de subsidio aplicado. Es decir, un efecto adicional muy restringido en relación con el esperado al aplicar únicamente la tasa por emisiones.

Figura 3.4 - Efecto esperado de la tasa retributiva y el subsidio a la chatarrización de vehículos viejos, sobre las emisiones y la concentración de $PM_{2.5}$

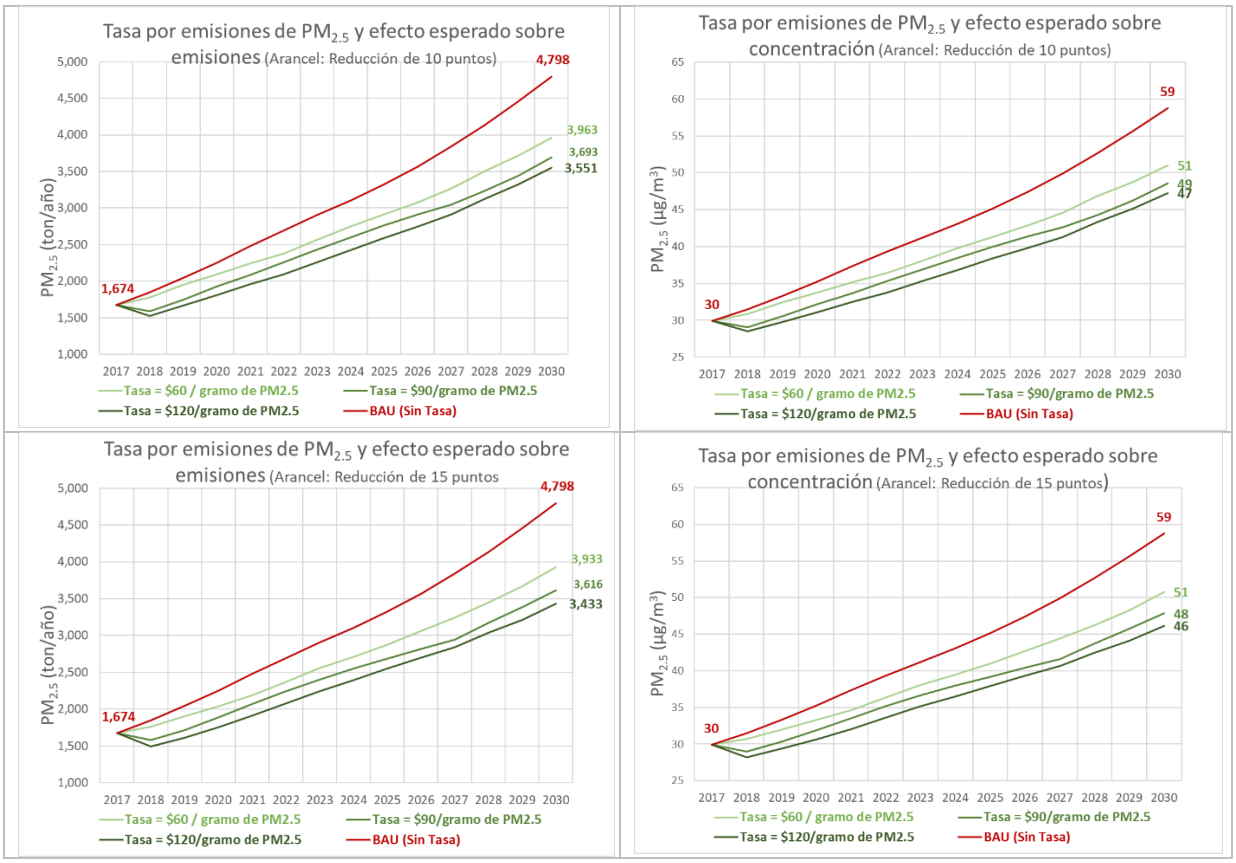


Fuente: Cálculos de Econometría Consultores para este trabajo

3.2.3 Reducción del arancel a vehículos nuevos

Los aranceles normales para la importación de vehículos se encuentran actualmente en el 15%. Para la simulación de un descuento en este arancel, se aplica para dos escenarios: bajarlo al 5% o eliminarlo. Como se observa en la siguiente figura, al aplicar este incentivo conjuntamente con una tasa de $120 por gramo de $PM_{2.5}$ emitido, se obtienen una reducción de su concentración entre 2 y 3 microgramos por metro cúbico en relación lo que se obtendría si se aplican únicamente las tasas.

Figura 3.5 - Efecto esperado de la tasa retributiva y la reducción del arancel a vehículos nuevos, sobre las emisiones y la concentración de $PM_{2.5}$



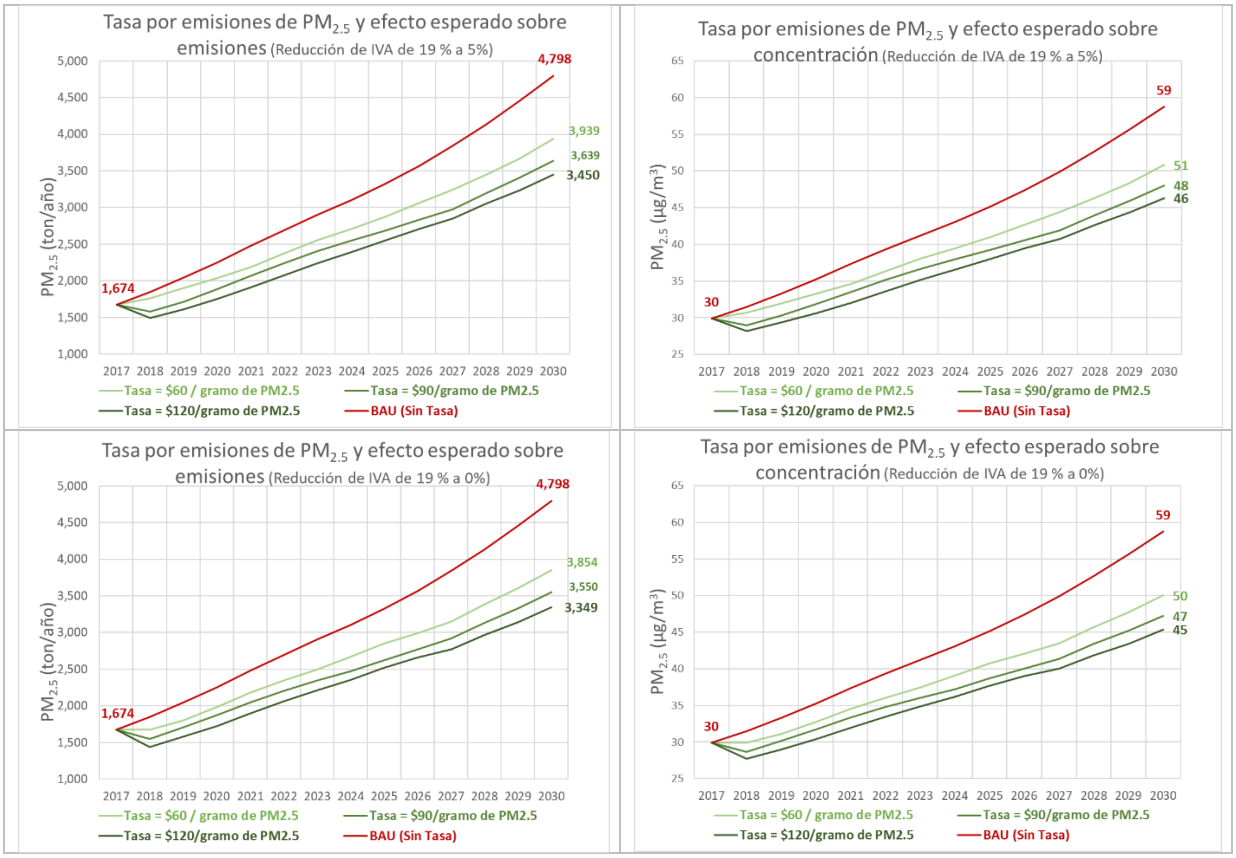
Fuente: Cálculos de Econometría Consultores para este trabajo

3.2.4 Reducción del IVA a los vehículos nuevos

Finalmente, se hizo la simulación de reducciones del IVA para adquirir vehículos de 19% actual a 5% y a 0% para quienes certifiquen la desintegración del vehículo viejo. Al aplicar este subsidio conjuntamente con una tarifa de la tasa de $120 por gramo de $PM_{2.5}$ emitido, se obtendría una de las concentraciones más bajas de todos los escenarios aquí simulados. En efecto, como lo muestra la siguiente figura, si se aplica esta tasa y se elimina el pago de

IVA para adquirir un vehículo, en el año 2030 se alcanzaría una concentración de 45 μg/m³, en contraste con los 49 μg/m³ que se esperaría si sólo se aplica la misma tasa (frente a una concentración 59 μg/m³ en el escenario BAU).

Figura 3.6 - Efecto esperado de la tasa retributiva y la reducción del IVA a vehículos nuevos, sobre las emisiones y la concentración de $PM_{2.5}$



Fuente: Cálculos de Econometría Consultores para este trabajo

3.3 EFECTOS DE TASAS Y SUBSIDIOS EN PREVENCIÓN DE MUERTES PREMATURAS

Como se vio en las secciones precedentes, los instrumentos económicos hasta aquí descritos y evaluados generarían efectos positivos sobre la calidad del aire del AMVA. Estas mejoras en la calidad se expresarían igualmente, y de manera relevante, en la prevención de muertes prematuras atribuidas a las elevadas concentraciones de $PM_{2.5}$. Para ilustrar el potencial impacto positivo de estos instrumentos sobre la calidad del aire y sus beneficios en términos de la vida humana, en esta sección se presenta de manera detallada los efectos esperados de cada uno de los instrumentos económicos en la prevención de muertes prematuras. Para tal

efecto, se seleccionan dos tarifas de las tasas por $PM_{2.5}$ emitido al año por as fuentes móviles reguladas: una de 60 pesos por gramo emitido y la otra de 120 pesos por gramo.

La Figura 3.7 ilustra el efecto esperado en prevención de muertes prematuras al aplicar una tasa con la menor de estas dos tarifas, es decir $60 por gramo de $PM_{2.5}$ emitido. Para ilustrar estos efectos positivos, se presentan de manera diferenciada los que se originarían con tasas actuando de manera independiente (es decir, sin subsidios) y los correspondientes a una combinación de las tasas con cada uno de los subsidios aquí propuestos. Al observar los resultados que se lograrían con esta tarifa, se observan algunas cosas de interés especial:

- Al aplicar las tasas al $PM_{2.5}$ entre 2019 y 2030 sin algún subsidio complementario, en promedio se podrían disminuir 289 muertes prematuras al año, es decir cerca de 3.500 muertes en el período. Aunque esta cifra es importante, es bastante menor que lo que se alcanzaría combinando estas tasas con algún subsidio.
- Si estas tasas se combinan con una reducción del interés del crédito en 6 puntos, o con un pago por chatarrización entre el 20 y el 40 por ciento del valor del vehículo chatarrizado, en promedio se podrían prevenir 300 muertes por año; es decir, alrededor de 3.600 personas en el período, una cifra ligeramente mayor a lo que se alcanzaría aplicando únicamente las tasas por emisiones.
- Si se complementan las tasas con una reducción de 9 puntos en la tasa de interés del crédito, o bajando el arancel o el IVA al 5%, en promedio se podrían prevenir 359 muertes prematuras al año; es decir, algo más de 4.300 personas en el período, un 23% por encima de lo que se alcanzaría aplicando las tasas sin subsidios.
- Por último, combinar las tasas con una reducción de 15 puntos porcentuales en el arancel o la eliminación total del IVA, permitiría disminuir el riesgo de muerte prematura, en promedio, entre 362 y 394 personas al año, para un total en el período entre 4.300 y 4.700 muertes evitadas. Pero si se establecieran las tasas con estos dos incentivos de manera simultánea, en promedio se prevendría el riesgo de 592 muertes prematuras anuales, para un total durante el período de algo más de 7.100 casos (más del doble de lo que se alcanzaría aplicando únicamente las tasas).

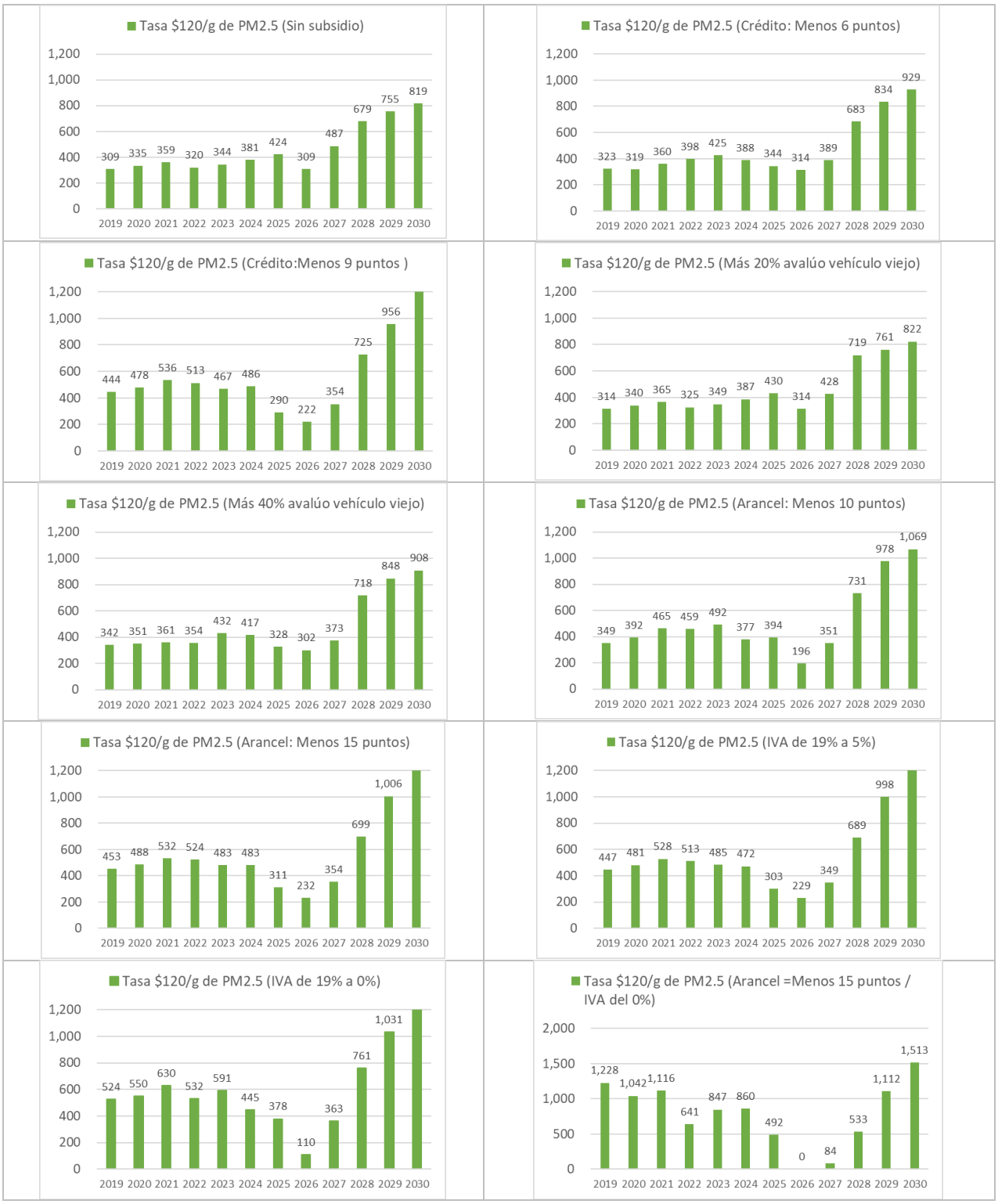
Figura 3.7 - Número de muertes prematuras prevenidas como Efecto esperado de las tasas retribtivas a $PM_{2.5}$ ($60/gramo)

Fuente: Cálculos de Econometría Consultores para este trabajo

Al contrastar estos resultados con los que se alcanzarían al duplicar la tarifa de la tasa, colocándola en $120 por gramo de $PM_{2.5}$ emitido, los resultados son sustancialmente más favorables (ver Figura 3-8). Al observar el efecto esperado de esta tasa sobre la prevención de muertes prematuras causadas por la deficiente calidad del aire, resaltan los siguientes aspectos:

- Al aplicar las tasas sin acompañarlas de algún subsidio, pero a una tarifa de $120 por gramo emitido de $PM_{2.5}$ en lugar de la inicial de $60 por gramo, se podrían esperar resultados positivos muy superiores: en promedio 460 muertes al año, para un total durante el período (2019-2030) de más de 5.500 muertes evitadas.
- Al combinar esta tarifa de las tasas con alguno de los subsidios, igualmente se incrementa el efecto positivo esperado. Si se aplica la tasa de $120 por gramo con una reducción de la tasa de interés del crédito de 6 puntos, o con un pago por chatarrización entre el 20 y el 40 por ciento del valor del vehículo chatarrizado, se podrían prevenir en promedio cerca de 472 muertes anuales, para un total durante el período de cerca de 5.700 muertes evitadas.
- Si las tasas a esta tarifa se combinan con uno cualquiera del resto de instrumentos (un descuento de 9 puntos en la tasa de interés del crédito, un arancel de 15 puntos porcentuales menos que el actual o un IVA de 0%), el promedio de muertes prematura evitadas se colocaría a un rango entre 570 y algo más de 600 por año; es decir, entre 6.800 y cerca de 7.300 muertes evitadas durante el período. Pero si se combinan simultáneamente estos dos incentivos (reducción de arancel y de IVA en esas magnitudes), se prevendrían casi 790 muertes por año, para un total en el período considerado de casi 9.000 personas menos falleciendo prematuramente.

Figura 3.8 - Número de muertes prematuras prevenidas como Efecto esperado de las tasas retribtivas a $PM_{2.5}$ ($120/gramo)



Fuente: Cálculos de Econometría Consultores para este trabajo

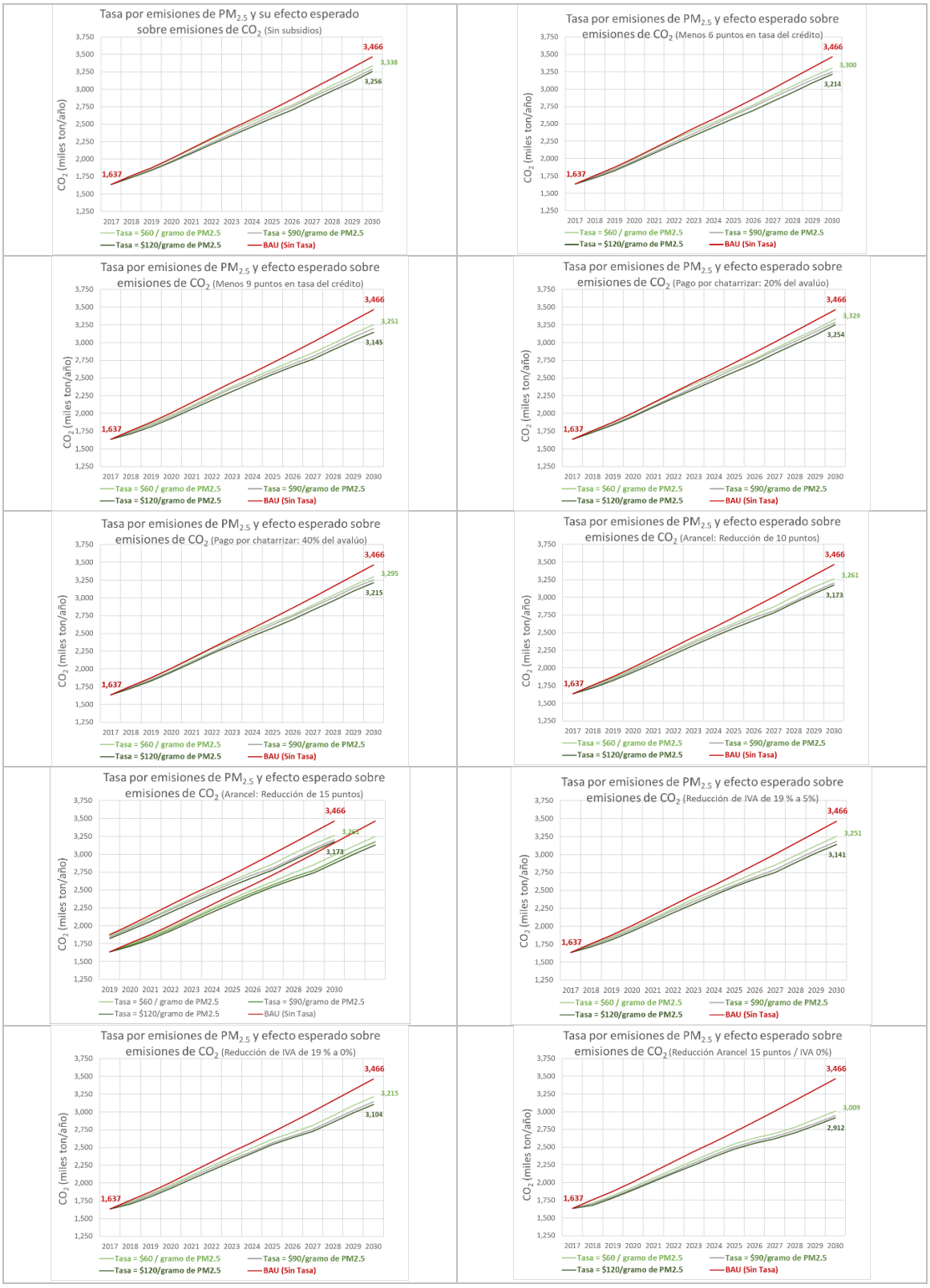
3.4 EFECTO DE INSTRUMENTOS ECONÓMICOS SOBRE OTROS GASES EMITIDOS POR FUENTE MÓVILES

En las secciones precedentes se presentaron los resultados de la simulación de las tasas por emisión de $PM_{2.5}$ y los subsidios a la chatarrización sobre las emisiones y la concentración en el aire del AMVA de este contaminante criterio. En esta sección se presentan los resultados indirectos de la aplicación de esos mismos instrumentos económicos, pero ahora sobre el comportamiento de otros gases, especialmente los asociados al cambio climático. Este comportamiento que estaría determinado por la renovación de una parte del parque automotor, incentivada por la combinación de las tasas retributivas con los respectivos subsidios.

Para hacer estas estimaciones, se partió de identificar la relación funcional implícita en las proyecciones del escenario BUA del PIGECA entre el comportamiento de $PM_{2.5}$ y las tendencias de cada uno de los siguientes contaminantes: CO_2, carbón negro, NO_x y SO_2. Luego, tomando como base el escenario BAU y los efectos de cada instrumento económico incluido sobre las tendencias de $PM_{2.5}$, se aplicó dicha relación funcional para estimar el efecto que dicho instrumento, aplicado sobre el $PM_{2.5}$, generaría de manera indirecta sobre las emisiones de los otros contaminantes mencionados.

Tomando de manera ilustrativa las tarifas de las tasas sobre las emisiones de $PM_{2.5}$ de 60, 90 y 120 pesos por gramo (tal como se hizo en las secciones precedentes), en esta sección se presentan las simulaciones del efecto de cada uno de los instrumentos en el periodo de 2018 a 2030 sobre las emisiones de CO_2. Igualmente, en el Anexo IV se presentan para el resto de sustancias.

Figura 3.9 - Efecto esperado de tasas a $PM_{2.5}$ y subsidios sobre emisiones de CO_2



Fuente: Cálculos de Econometría Consultores para este trabajo

Capítulo 4

ANÁLISIS BENEFICIO/COSTO DE LOS RESULTADOS ESPERADOS CON LOS INSTRUMENTOS ECONÓMICOS EN FUENTES MÓVILES

Esta sección se inicia con un modelo para identificar los costos de mitigación de las emisiones de $PM_{2.5}$ generadas por fuentes móviles, tomando como referencia el modelo se simulación de decisiones de renovación del parque automotor presentado en el capítulo anterior. En seguida, se presentan los resultados de aplicar este modelo a las condiciones específicas del Valle de Aburrá, calculando los costos marginales de mitigación en que incurriría el parque automotor seleccionado para este estudio, al aplicar las tasas por emisiones de $PM_{2.5}$ a distintas tarifas por gramo emitido. Luego, se aplica este mismo procedimiento para identificar cuál sería el comportamiento de los costos de mitigación cuando los propietarios reciben alguno de los subsidios complementarios aquí propuestos. Finalmente, se contrastan los resultados de este análisis de costos con la valoración económica de los beneficios que se obtendrían al mejorar la calidad del aire en el AMVA, retomando los resultados del segundo producto de esta consultoría. Este contraste se realiza con dos objetivos: en primer lugar, determinar cuáles sería las tarifas de las tasas por emisión que maximizarían los beneficios sociales; y, en segundo lugar, realizar un análisis de la relación entre esos beneficios sociales y los costos en que se incurriría si se implementan los instrumentos económicos propuestos. Adicionalmente, se presentan los estimativos de los flujos de caja que enfrentaría las autoridades al aplicar las tasas y, simultáneamente, cada uno de los subsidios seleccionados.

4.1 MODELO TEÓRICO DE COSTOS DE MITIGACIÓN DE EMISIONES EN FUENTES MÓVILES

En secciones anteriores se presentó el modelo empleado para simular las decisiones que tomarían los propietarios de los vehículos cuando se altera su estructura de costos por una regulación externa. A partir de la identificación de la estructura de costos de diversos tipos de vehículos, así como de la evolución de estos costos a medida que cada vehículo va envejeciendo, este modelo permite identificar las decisiones que tomarían sus propietarios en relación con la renovación del vehículo cuando se aplica una regulación que afecta su estructura de costos. Para tal efecto, se analizaron dos tipos de regulaciones: por una parte, la fijación de una tasa por emisión de $PM_{2.5}$ que se cobrarían en proporción a la cantidad

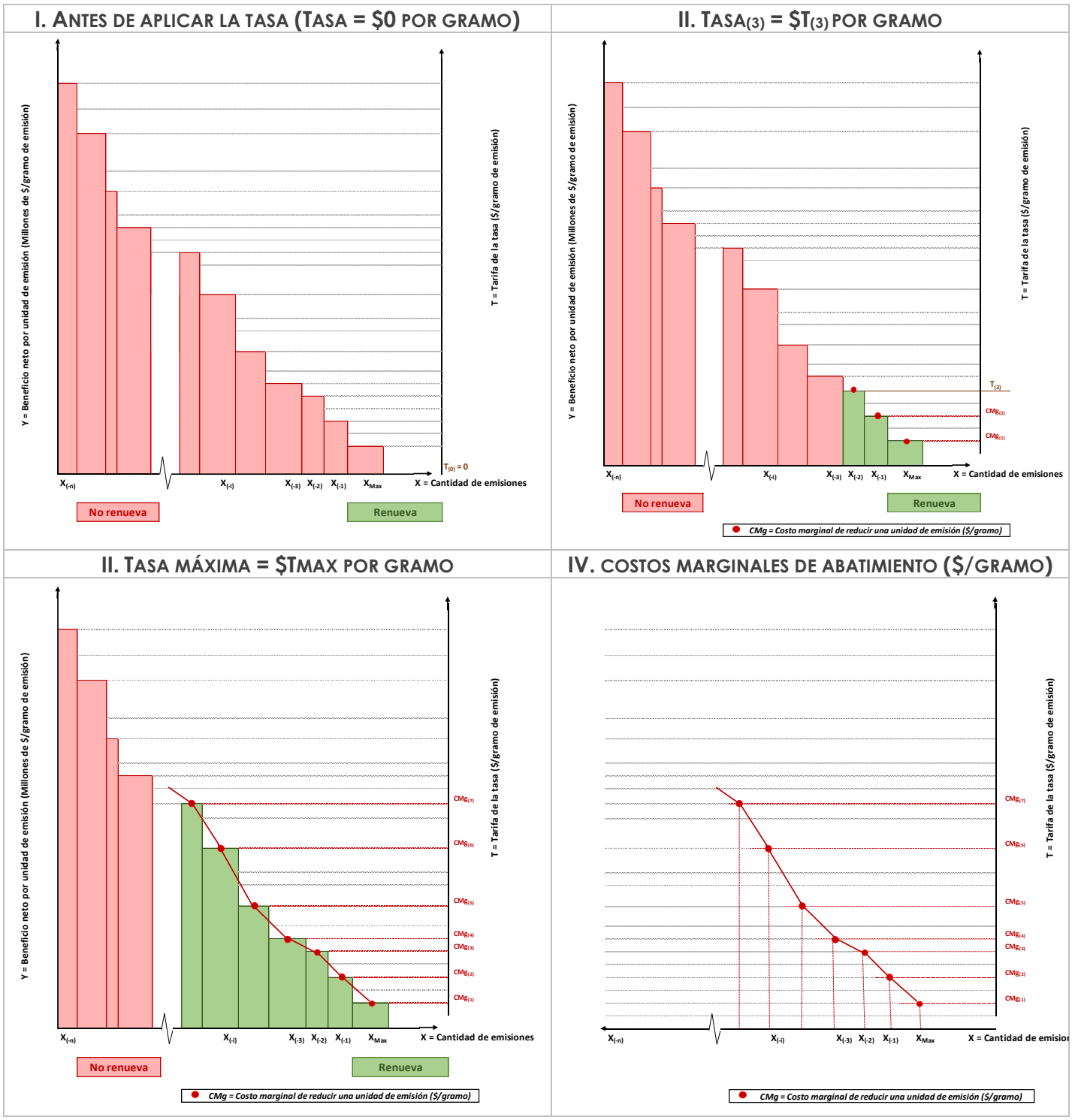
de emisiones de cada vehículo; y, por otra parte, de manera complementaria con esas tasas, estableciendo un premio (subsidio) para reducir los costos a quienes tomen la decisión de renovar su vehículo, contribuyendo así con la reducción de las emisiones.

Ese modelo permite identificar los cambios en las decisiones que tomarán los distintos propietarios de los vehículos, frente a una elevación de costos del vehículo antiguo generada por el cobro de la tasa por sus emisiones. Igualmente, las decisiones frente a una disminución de costos de la adquisición de un vehículo nuevo, para renovar el antiguo, como resultado de alguno de los subsidios propuestos para tal efecto. Para cada nivel de la tasa por emitir, el modelo identifica los vehículos (según su respectiva edad) para los cuales continúa siendo más rentable mantener su actual operación que renovarlo. Así así mismo, identifica aquellos vehículos para los cuales la elevación de precios hace que sea más rentable asumir los costos de renovarlo y operar un vehículo nuevo (con menores emisiones).

Para traducir este modelo de toma de decisiones de renovación en una identificación de los costos de reducir las emisiones, se identifican los vehículos que, a cada nivel de tasa, tomarían la decisión de renovación (y, por consiguiente, de disminuir la contaminación). Para aplicar ese modelo, la tarifa de la tasa (expresada en pesos por gramo de emisión) se va incrementando paulatinamente, a partir de una tarifa de cero que refleja el escenario *business-as-usual*. El modelo permite entonces identificar cuáles vehículos saldrían ante cada incremento de la tasa, así como la disminución de la contaminación resultante de dicho incremento. De esta forma el modelo de simulación identifica el costo marginal de reducción de las emisiones, expresado en cada una de la tarifa de la tasa a dichas emisiones que se aplique. Esto porque, los vehículos que se renuevan a cada nivel de la tasa, indican que a esta tarifa resulta más favorable renovar el vehículo (disminuyendo las emisiones) que mantener el antiguo. En síntesis, este modelo permite identificar el costo marginal de reducir las emisiones de cada vehículo, expresado en pesos por gramo de la emisión que se elimina al renovar el respectivo vehículo (es decir, la respectiva tarifa de la tasa que se cobra por unidad emitida).

Para ilustra la forma de identificar los costos unitarios de mitigación de las emisiones, la siguiente figura muestra la respuesta de cada vehículo ante un incremento de la tarifa de la tasa que debe pagar por gramo de sustancia contaminante emitida.

Figura 4.1 - Estimación de costos unitarios (marginales) de reducir emisiones de fuentes moviles



Fuente: Elaborado por Econometría Consultores para este trabajo

La secuencia que se sigue es la siguiente:

1) Se supone que los vehículos actuales, y de cada edad, se pueden ordenar de acuerdo con el beneficio neto que generarían por cada unidad de contaminante, desde el momento actual hasta un período de tiempo prolongado, asumiendo que ninguno de ellos se renueva[17]. Si no se cobra ninguna tasa por emisiones, se asume entonces que ninguno de estos vehículos se renueva por efecto de una señal de precio a las emisiones enviada por la autoridad. Es decir, la tasa es de cero y no hay renovación de vehículos. En el cuadrante I se representa esta situación, en donde el eje horizontal expresa las emisiones de cada vehículo y el eje vertical izquierdo expresa el valor presente de los beneficios netos de cada vehículo.

2) En el cuadrante II se identifican cuáles vehículos saldrían ante cada tasa unitaria por emisiones. A una tasa muy baja (cercana a cero y expresadas en el eje vertical derecho en pesos por gramo emitido), ningún vehículo tomará la decisión de renovarse, ya que los incrementos de costos serían muy bajos y serían más rentable operar el vehículo actual que cambiarlo por uno nuevo. Pero si se siguen incrementando las tarifas unitarias, se llega un momento en que, para el vehículo con menor valor presente de los beneficios netos por unidad de contaminante emitido, será más rentable renovarlo que seguir operando con el actual[18]. Por ejemplo, a una tarifa de $T_{(3)}$ pesos por gramo de emisiones, tres vehículos habrá salido por renovación; y, en consecuencia, las emisiones totales se habrá disminuido como lo indica el eje horizontal de la gráfica[19]. Esto sucede porque sus costos unitarios (marginales) de reducir las emisiones son menores o iguales a la tarifa $T_{(3)}$ de la tasa. En contraste, los vehículos que no se renuevan, siguen operando porque el costo de esa renovación (es decir, el costo marginal de reducir sus emisiones cambiando el vehículo) es mayor que la tasa unitaria que le están cobrando por sus emisiones. En síntesis, cada tarifa de la tasa indica el costo marginal de reducir un gramo de emisiones por parte del vehículo que toma la decisión de renovar y dejar de emitir a esa tarifa.

3) El cuadrante III muestra la situación de los vehículos que salen de operación, a la máxima tarifa simulada en este ejemplo. Como se observa, la respuesta de cada vehículo a la simulación de unas tasas unitarias que se van incrementando

[17] Para tal efecto, en este ejemplo se asume que el valor presente del beneficio neto total se divide por la cantidad de emisiones que genera el vehículo, en promedio, en un período de tiempo (por ejemplo, en un año)

[18] Ver al respecto el *Modelo para Simular Decisiones en Fuentes Móviles* presentado en secciones anteriores de este informe.

[19] En el modelo real se asume que hay una eliminación de las emisiones por la salida del vehículo antiguo (por falta de rentabilidad en su operación) y un incremento de las emisiones por la entrada el vehículo nuevo. Para simplificar esta ilustración, aquí se omite el efecto de las emisiones (menores) del vehículo nuevo.

paulatinamente, arroja información sobre los costos marginales de cada reducción de emisiones que se va produciendo. Allí se indica cómo, a medida que se incrementa la mitigación de emisiones, el costo marginal de lograr una reducción adicional es cada vez mayor.

4) Por último, el cuadrante IV muestra el principal resultado de interés para este estudio: el comportamiento de los costos marginales de reducción de las emisiones. Allí se elimina la información intermedia y se dejan únicamente dos variables: las emisiones de todos los vehículos antes de iniciarse la renovación de algunos de ellos, expresadas en el eje horizontal; y los costos unitarios (marginales) de reducir cada unidad de las emisiones. Para tal efecto, las emisiones máximas totales (escenario BAU) se expresan en el extremo derecho del eje horizontal, es decir, cuando no se reducen las emisiones y por tanto el costo de reducirlas es cero (no se asume ningún esfuerzo de mitigación). A medida que se reducen las emisiones (desplazamiento en el eje de las emisiones de derecha a izquierda), el total de emisiones remanentes (no reducidas) va disminuyendo. Y, como resultado, cada vez que se aumenta el nivel de reducciones, el costo de reducir una unidad adicional se va incrementando. Por último, como cada punto representa un costo unitario (creciente) por gramo mitigado, la suma de cada uno de esos costos, correspondientes a ese gramo reducido, representa el costo total de reducir las emisiones desde el punto inicial (emisiones máximas) hasta cualquier punto de reducción seleccionado. O, dicho en otras palabras, el costo total de mitigación para pasar de las emisiones máximas a un punto cualquiera de la gráfica, es igual al área bajo la curva de costos marginales desde el punto de máxima emisión hasta el punto de emisiones seleccionado.

4.2 Estimación de costos de mitigación de emisiones de $PM_{2.5}$ en fuentes móviles del Valle de Aburrá

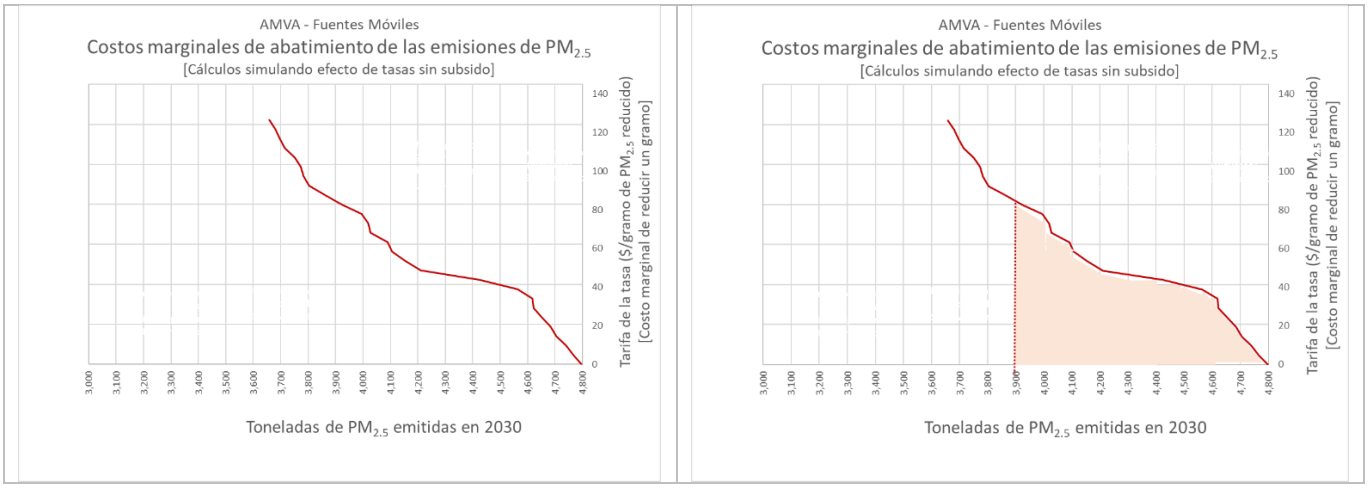
Los resultados de la aplicación del *Modelo para Simular Decisiones en Fuentes Móviles* descritos en el capítulo anterior de este informe, ilustran la respuesta esperada de cada tipo de vehículo y de cada edad a una secuencia de tasas incrementales, así como los efectos de estas respuestas sobre las emisiones agregadas de $PM_{2.5}$. De esta forma, para cada una de las combinaciones de instrumentos, se obtuvieron las respuestas a las tasas por emisión con tarifas desde cero hasta 130 pesos por gramo y para cada uno de los parámetros seleccionados para cada subsidio[20]. Con base en estos resultados y aplicando el modelo aquí

[20] Además de las simulaciones para las tasas sin subsidios, se hicieron simulaciones para otras ocho opciones de combinación de estas tasas: con descuentos de 6 y 9 puntos en la tasa de interés de los créditos; con el pago de un subsidio por chatarrización del 20 y del 40 por ciento sobre el valor del vehículo chatarrizado, según avalúo del Ministerio de Transporte; con una reducción del arancel

descrito, se estimó el comportamiento de los costos unitarios (marginales) en cada uno de estos nueve escenarios que se presentan en esta sección.

Para analizar los costos de reducción de las emisiones de las fuentes móviles en el AMVA, se parte de un escenario BAU para 2030, en donde la totalidad del parque automotor de los 12 tipos de vehículos aquí analizados haría emisiones de cerca de 4.800 toneladas anuales. Al simular el comportamiento de las emisiones de $PM_{2.5}$ frente a las distintas tarifas de las tasas aplicadas sin subsidios, se encuentra el resultado descrito en la Figura 4.2 (izquierda).

Figura 4.2 - Costos marginales y totales de reducción de emisiones de fuentes móviles al aplicar una tasa al $PM_{2.5}$



Fuente: Elaborado por Econometría Consultores para este trabajo

Por ejemplo, al subir la tarifa hasta 80 pesos por gramo emitido, se asume que todos los vehículos que tengan un costo de reducción menor o igual a esos 80 pesos por gramo como resultado de cambiar el vehículo por uno nuevo, lo habrían cambiado. En consecuencia, se reducirían las emisiones pasando de las 4.800 toneladas anuales en el escenario BAU, a 3.900 en el escenario después de aplicar este instrumento; con un costo por tonelada cada vez mayor, a medida que se van incrementando las toneladas reducidas. En contraste, aquellos vehículos para los que el costo equivalente de reducir cada gramo de $PM_{2.5}$ (cambiando el vehículo) resulte mayor a 80 pesos, mantendrán el vehículo actual y seguirán emitiendo, en conjunto, las 3.900 toneladas restantes. Esto significa que, como el costo de reducir la última tonelada fue de 80 pesos por gramo, reducir la emisión de esta tonelada implicaría un costo de 80 mil pesos por kilo (es decir, 80 millones de pesos por tonelada).

del 15% actual a 5% y a 0%; y con una reducción del IVA del 19% actual a 5% y a 0%. Para cada uno de estos nueve instrumentos económicos se hicieron las respectivas simulaciones de respuesta para cada uno de los 12 tipos de vehículos y, para cada tipo, edades de uno a ochenta años. Además, cada una de estas simulaciones se hicieron para tasas desde cero hasta 130 pesos por gramo de PM2.5 emitido, con incrementos de la tarifa de cinco en cinco pesos. En síntesis, para cada una de las cinco combinaciones se hicieron 25.920 simulaciones que arrojan como resultado las curvas de costos marginales que se presentan en esta sección.

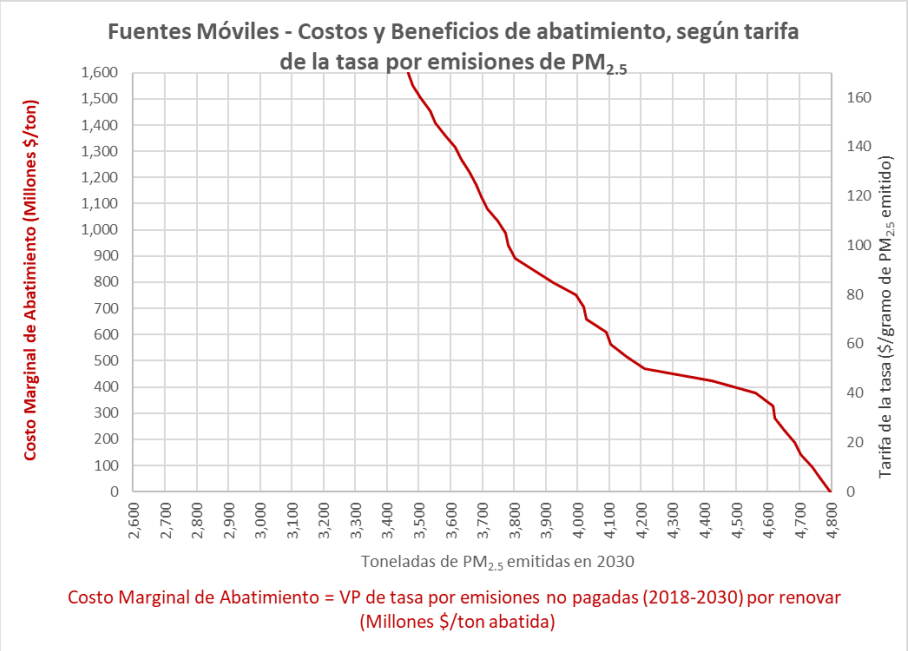
Por otra parte, la gráfica de la derecha permite una lectura complementaria. Como cada una de las 900 toneladas que se reducirían tendría un costo distinto, los costos totales de reducción de esas toneladas, en 2030, estaría representados por la suma de los costos de cada tonelada, es decir por el área bajo la curva señalada en esta figura, entre 4.800 toneladas iniciales y 3.900 toneladas finales[21].

Ahora bien, una mención especial amerita el punto en donde se produce la inflexión entre quienes renuevan sus vehículos y quienes no los renuevan, ambos motivados por su respectivo interés en obtener la mayor rentabilidad posible. Retomando el ejemplo anterior, aquellos vehículos para los que se tomaría la decisión de renovación al subir la tarifa de la tasa a 80 pesos por gramo, efectivamente no pagarían las tasas porque su vehículo ya no estaría en circulación. Sin embargo, los que la haría con una tarifa ligeramente superior y no lo hacen, sí pagaría la tasa. Y como estos datos se refieren a las decisiones en el último año del período analizado (2018-2030), esto significa que quienes no renovaron sí hubiesen pagado la tasa durante todo el período. Esto significa que, a una tarifa de 80 pesos por gramo, un vehículo habría pagado por cada gramo emitido anualmente y durante 13 años, un valor presente de 751 pesos[22]. Como el costo marginal de reducir un gramo por parte de quienes decidieron renovar su vehículo cuando la tasa llegó a 80 pesos por gramo es aproximadamente ese mismo valor, se asume entonces que el valor presente del costo marginal de reducir las emisiones es también de 751 pesos por gramo reducido (es decir, 751 mil pesos por kilo o 751 millones de pesos por tonelada).

Aplicando este mismo procedimiento a cada una de las tarifas de las tasas expresadas en el eje vertical derecho de la gráfica de la Figura 4.2, esta gráfica se puede representar ahora como se muestra en la siguiente figura. Este será entonces el referente para analizar los costos de mitigación, aplicables tanto cuando se trate de la implementación de las tasas por emisiones de $PM_{2.5}$ sin otro instrumento, como cuando se usen estas tasas asociadas a alguno de los subsidios complementarios seleccionados.

[21] Esta área arrojará un costo de reducción de esas 900 toneladas de algo más de 36 mil millones de pesos. Pero como esos datos corresponden únicamente al año 2030, se requiere un análisis complementario que se hará enseguida.
[22] En todos los cálculos que siguen se empleó siempre una tasa de descuento de 5% anual, pata mantener homogeneidad con la empleada en la valoración de la calidad del aire en la Tarea 2 de esta consultoría.

Figura 4.3 - Valor presente del costo marginal de reducción de emisiones de $PM_{2.5}$ en fuentes móviles



Fuente: Elaborado por Econometría Consultores para este trabajo

4.3 Análisis Beneficio/Costo y determinación de la tarifa por emisiones

En etapas anteriores de esta consultoría se estimaron los efectos de las concentraciones de $PM_{2.5}$ sobre las condiciones de vida de la población del Valle de Aburrá. Y, con base en esos resultados, se estimó el valor que representa para la economía del área Metropolitana del Valle de Aburrá el hecho de que se produzcan estas muertes prematuras. O, dicho de otra forma, se identificó el beneficio económico que se obtendría al prevenir cada una de esas muertes.

Para un escenario BAU del total de emisiones de fuentes fijas y móviles, pasando de 1.853 toneladas emitidas de $PM_{2.5}$ en 2015 a una proyección de 5.862 toneladas al año en 2030, se estimó que se habría generado, en total durante dicho período, un riesgo de entre 20.106 (escenario moderado) y 40.246 (escenario más realista) muertes prematuras por causa de la pérdida de calidad del aire. Esto significa que, por cada tonelada de $PM_{2.5}$ emitida en 2030, se habrían generado entre 5 y 10 muertes prematuras. O, lo que es lo mismo, que una medida que se logre reducir, a 2030, una tonelada de esas emisiones, se habría prevenido entre 5 y 10 muertes prematuras.

Cuadro 4.1 - Muertes evitadas y beneficio económico de reducir emisiones de $PM_{2.5}$

Concepto	Escenario	
	Moderado	Más realista
Crecimiento de concentración $PM_{2.5}$ (2015-2030) (µg/m^3)	36.80	36.80
Crecimiento de emisones $PM_{2.5}$ (2015-2030) (Ton)	4,009	4,009
# de muertes prematuras adicionales por crecimientod de $PM_{2.5}$ (2015-2030)	20,106	40,246
# de muertes prematuras evitadas por tonelada de $PM_{2.5}$ reducida (2015-2030)	5.02	10.04
Vr presente pérdidas de PIB por emisiones de $PM_{2.5}$ (Miles de millones COP de 2018)	2,271	4,533
Vr presente beneficios de PIB por ton de $PM_{2.5}$ reducida(Millones COP de 2018)	566	1,131

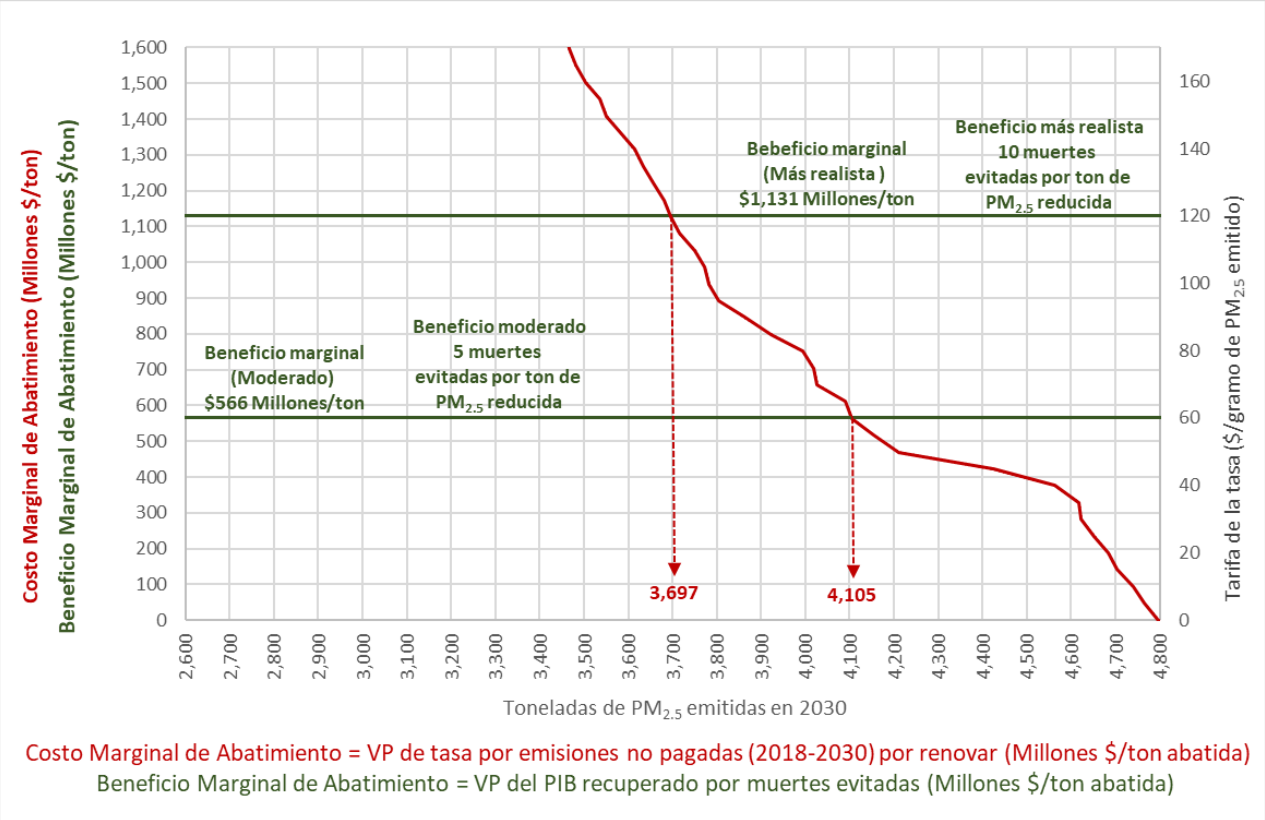
Fuente: Econometría Consultores, cálculos para este trabajo (ver Anexo IV)

Tomando en cuenta únicamente la participación de una persona promedio en la generación de valor agregado a la economía, expresada esta participación en el PIB per cápita anual, se estimó igualmente que estas muertes prematuras ocasionadas por una tonelada de $PM_{2.5}$ en 2030, generaría una pérdida acumulada, a valor presente de 2018, entre 566 millones de pesos (escenario moderado) y 1.131 millones de pesos (escenario más realista). Igualmente, esto reflejaría, en términos monetarios, un rango de valores bastantes conservadores de los beneficios económicos que se obtendrían al prevenir cada tonelada de emisiones de $PM_{2.5}$ con una medida adecuada[23].

Al asociar estos estimativos conservadores de beneficios económicos con los costos de reducción de las emisiones al aplicar las tasas aquí analizadas, se obtienen los resultados que se observan en la siguiente gráfica.

[23] En el ejercicio de valoración de la Tarea 2 de esta consultoría se encontró que, tomando como referencia un indicador de valor estadístico de la vida, estos valores alcanzarían alrededor de 20 veces el aquí descrito y empleado en el ejercicio que sigue a continuación.

Figura 4.4 - Beneficios y costos de reducir emisiones con tasas a las emisiones de $PM_{2.5}$ (Sin subsidios)



Fuente: Elaborado por Econometría Consultores para este trabajo

Esta superposición entre beneficios y costos esperados de la reducción de las emisiones de $PM_{2.5}$ en el escenario a 2030, arrojan varias conclusiones:

a) Aplicando únicamente tasas a las emisiones de $PM_{2.5}$, y sin otorgar subsidios, se encuentra que los beneficios de evitar 5 muertes reduciendo una tonelada de emisiones (y que equivalen a un valor presente de 566 millones de pesos por tonelada reducida) se igualan a los costos marginales de reducir una tonelada de emisiones cuando se aplica una tarifa unitaria de 60 pesos por gramo emitido. Sin embargo, un estimativo más realista muestra que cada tonelada de emisiones reducidas evitaría 10 muertes, con un beneficio marginal en valor presente de 1.131 millones de pesos. Es decir, que el costo marginal de mitigar las emisiones se igualaría al beneficio marginal de esta reducción, obteniéndose el máximo de beneficio neto, subiendo la tarifa de la tasa hasta 120 pesos por gramo emitido.

b) Los beneficios esperados al aplicar una tasa de 120 pesos por gramo, se expresarían en que las emisiones de 4.798 toneladas estimadas para el escenario *business-as-usual* en 2030, se reducirían a 3.697 toneladas (es decir, una reducción del 23%). Esto se

lograría con un costo total, a valor presente de 2018, de 588 mil millones de pesos; pero arrojaría un beneficio, también en valor presente de 2018, de 1.245 mil millones de pesos. Es decir, con esta medida se obtendría una relación beneficio/costo de 2,12.

c) Al aplicar esta tarifa de 120 pesos por gramo de $PM_{2.5}$ emitido y obtener una reducción esperada del 23% sobre el escenario *business.as-usual*, se contribuiría de manera importante, pero no suficiente, para alcanzar la ambiciosa meta establecidas del PIGECA de reducir las emisiones en un 67% llevando las originadas por fuentes móviles a 1.510 toneladas en 2030 (AMVA, 2017). De allí se concluye que, para alcanzar esta meta, se requeriría subir la tarifa de las tasas aún más, y combinar además estas tasas con otros instrumentos de política tales como los subsidios y otro tipo de medidas regulatorias que propendan por la modernización del parque automotor.

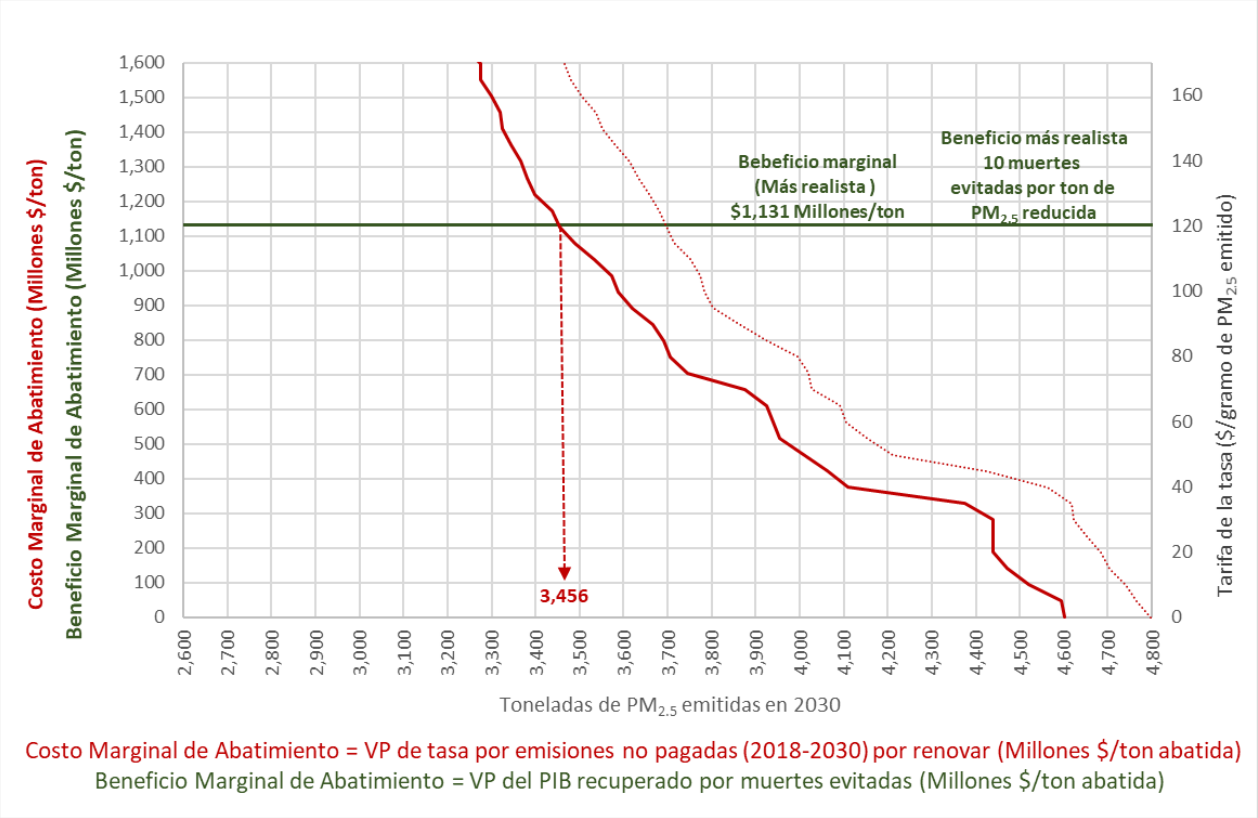
d) Estos resultados son bastante conservadores, ya que la estimación de beneficios se hizo con base en la productividad del capital humano y no en lo que se denomina el valor estadístico de la vida. Este último, que fue aplicado en las estimaciones iniciales del PIGECA, arrojaría un valor por muertes evitadas de alrededor de 20 veces el que aquí se está aplicando.

Ahora bien, al combinar las tasas con cada uno de los subsidios analizados, el modelo se aplica de la misma forma y se obtienen resultados más fuertes. Como se observa en la siguiente gráfica, tomando como ejemplo un subsidio a la tasa de interés del crédito obtenido para renovar el vehículo[24], ahora el efecto se potencializa (ver Figura 4.5).

Lo que sucede ahora es que las tasas incentivan igualmente la renovación de los vehículos, pero con cada tarifa se obtienen resultados mayores y por tanto se observan mejores niveles de abatimiento de las emisiones.

[24] En el Anexo V se presentan los resultados de estas simulaciones para las demás combinaciones de instrumentos aquí analizadas.

Figura 4.5 - Beneficios y costos de reducir emisiones con tasas a $PM_{2.5}$ de $120/gramo y descuento de 9 puntos en la tasa del crédito



Fuente: Elaborado por Econometría Consultores para este trabajo

Este mayor efecto tiene una explicación: aún antes de empezar a cobrarse las tasas (es decir, en un punto equivalente a una tasa de cero), por efectos del subsidio a la tasa de crédito (en este caso, una reducción de 10 puntos en la misma) ya se ha modificado el costo de renovar, siendo ahora más atractivo adquirir un vehículo nuevo. Allí se destacan varios aspectos:

a) Al fijarse la tasa en $120/g y otorgarse el subsidio para adquirir vehículos nuevos, la curva original de costos marginales de reducir las emisiones (línea punteada), desde la perspectiva de los propietarios de vehículos se desplaza ahora hacia abajo (línea continua). Como la curva de costos marginales de reducir cada tonelada es ahora, para los propietarios, menor que la original, ahora ellos renovarán más y reducirán las emisiones hasta 3.456 toneladas (en contraste con la reducción hasta 3.697 que se alcanzaría en el escenario sin subsidio descrito en la Figura 4.4).

b) Esta mayor reducción implica necesariamente mayores costos totales para alcanzarla. En primer lugar, los cotos de reducción siguen siendo expresados por la línea punteada en la gráfica, y por tanto el costo marginal para reducir las emisiones hasta las 3.456 toneladas estará indicado por esta línea punteada y no por la línea

continua. Es decir, el costo marginal de reducir las emisiones cuando se fija la tarifa de la tasa en $120/g será ahora mayor que el beneficio marginal que se obtiene al fijar esta. Y, en consecuencia, el costo total será ahora el área bajo la línea punteada, en el rango entre las emisiones iniciales (4.798 ton) y las finales (3.456 ton).

c) El costo total pagado por los propietarios (el área bajo la línea continua) será entonces menor al costo total de generar la reducción efectiva (el área bajo la curva punteada). La diferencia entre los dos costos totales reales y los pagados por los propietarios (es decir, el área entre la línea punteada y la línea continua), equivale entonces al subsidio que recibieron los propietarios y que es asumido por quien les otorgó dicho subsidio.

d) En consecuencia, el costo marginal de reducir las emisiones (indicado por la línea punteada al nivel de 3.456 ton emitidas) es mayor que el beneficio marginal de esta reducción. En conclusión, desde el punto de vista estricto, podría decirse que hay una pérdida de eficiencia social. Sin embargo, no se debe olvidar que estos beneficios están calculados de una forma muy conservadora (con base en el valor agregado que se pierde por cada muerte prematura) y no de una manera estricta que refleje la pérdida efectiva de bienestar social (es decir, lo que refleja el indicador de valor estadístico de la vida, que según las estimaciones de este trabajo podría ser del orden de 20 veces el valor aquí indicado).

De la aplicación reiterada de este modelo para las distintas combinaciones de instrumentos, fue posible analizar la relación beneficio/costo para cada una de ellas. Para tal efecto se ilustran dos escenarios: uno bastante moderado, aplicando una tasa de 60 pesos por gramo de $PM_{2.5}$ emitido; y la otro, bajo un supuesto más realista de la afectación de la contaminación sobre la salud de las personas, aplicando una tarifa de 120 pesos por gramo emitido. Los siguientes cuadros presentan una síntesis de todos los resultados obtenidos en este análisis beneficio/costo.

Cuadro 4.2 - Análisis Beneficio/Costo - Escenario Moderado: Tasa de $60/gramo y 5,02 muertes evitadas por tonelada de $PM_{2.5}$ reducida

Miles de millones de pesos constantes de 2018

		Tasas ($60/gr $PM_{2.5}$) más Subsidio alternativo								
	Tasa sin subsidios ($60 /gr $PM_{2.5}$)	Tasa de interés del crédito (Actual = 14.97 % anual)		Pago por desintegración (% sobre valor del vehiculo a chatarrizar, según avalúo de Mintransporte)		Arancel		IVA (Actual = 19%)		Arancel: Menos 15 puntos IVA =0%
Subsidio	Ninguno	Menos 6 puntos	Menos9 puntos	20%	40%	Menos 10 puntos	Menos 15 puntos	5%	0%	
Valor presente costo de renovación de vehiculos[1]	250	270	365	260	272	347	371	365	435	1,050
Valor presnete beneficio por muertes evitadas[1]	392	410	486	401	412	473	490	486	534	802
Relación Beneficio/Costo	***1.57***	***1.52***	***1.33***	***1.54***	***1.52***	***1.36***	***1.32***	***1.33***	***1.23***	***0.76***
Efectos de la medida										
VP Ingresos a la autoridad por pago de tasas (2018-2030)[1]	1,355	1,341	1,282	1,354	1,352	1,297	1,281	1,282	1,252	1,156
VP Costos al aplicar subsidio a propietarios (2018-2030)[1]	0	6	12	25	70	268	456	384	638	1,800
VP Fujo neto de recursos del Estado[1]	***1,355***	***1,335***	***1,270***	***1,329***	***1,282***	***1,029***	***825***	***898***	***614***	***-643***
Emisiones $PM_{2.5}$ en 2030 (Antes de la medida) (ton/año)	4,798	4,798	4,798	4,798	4,798	4,798	4,798	4,798	4,798	4,798
Emisiones $PM_{2.5}$ en 2030 (Después de la medida) (ton/año)	4,105	4,074	3,939	4,089	4,070	3,963	3,933	3,939	3,854	3,381
Reducción de $PM_{2.5}$ - 2030 (Ton/año)	***693***	***724***	***858***	***708***	***727***	***835***	***865***	***858***	***943***	***1,416***
	14%	***15%***	***18%***	***15%***	***15%***	***17%***	***18%***	***18%***	***20%***	***30%***
Concentración $PM_{2.5}$ en 2030 (Antes de la medida) ($\mu g/m^3$)	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59
Concentración $PM_{2.5}$ en 2030 (Después de la medida) ($\mu g/m^3$)	52	52	51	52	52	51	51	51	50	46
# de muertes evitadas (Acumulado 2019 - 2030)	***3,473***	***3,630***	***4,305***	***3,552***	***3,647***	***4,187***	***4,339***	***4,305***	***4,732***	***7,104***
Efectos sobre otras emisiones										
Emisiones CO_2 en 2030 (Antes de la medida) (Miles ton/año)	3,466	3,466	3,466	3,466	3,466	3,466	3,466	3,466	3,466	3,466
Emisiones CO_2 en 2030 (Despúes de la medida) (Miles ton/año)	3,338	3,300	3,251	3,329	3,295	3,261	3,247	3,251	3,215	3,009
Reducción de CO_2 - 2030 (Miles ton/año)	***129***	***166***	***215***	***137***	***172***	***205***	***220***	***215***	***251***	***457***
	3.7%	***4.8%***	***6.2%***	***3.9%***	***5.0%***	***5.9%***	***6.3%***	***6.2%***	***7.2%***	***13.2%***
Carbón negro en 2030 (Antes de la medida) (ton/año)	2,984	2,984	2,984	2,984	2,984	2,984	2,984	2,984	2,984	2,984
Carbón negro en 2030 (Despúes de la medida) (ton/año)	2,479	2,459	2,367	2,467	2,459	2,382	2,362	2,367	2,311	2,007
Emisiones NO_x en 2030 (Antes de la medida) (ton/año)	14,172	14,172	14,172	14,172	14,172	14,172	14,172	14,172	14,172	14,172
Emisiones NO_x en 2030 (Después de la medida) (ton/año)	13,756	13,699	13,539	13,721	13,679	13,573	13,521	13,539	13,420	12,741
Emisiones SO_2 en 2030 (Antes de la medida) (ton/año)	274	274	274	274	274	274	274	274	274	274
Emisiones SO_2 en 2030 (Después de la medida) (ton/año)	269	264	260	269	263	261	260	260	258	248

[1] Tasa de descuento de 5%
[2] Flujo neto de recursos = Costo para el Estado al otorgar el subsidio (egresos o disminución de ingresos) menos Recaudo de las tasas (ingresos para el AMVA)

Fuente: Cálculos Econometría Consultores para este trabajo

Cuadro 4.3 - Análisis Beneficio/Costo - Escenario Moderado: Tasa de $120/gramo y 10,04 muertes evitadas por tonelada de $PM_{2.5}$ reducida

Miles de millones de pesos constantes de 2018

		Tasas ($120/gr $PM_{2.5}$) más Subsidio alternativo								
	Tasa sin subsidios ($120 /gr $PM_{2.5}$)	Tasa de interés del crédito (Actual = 14.97 % anual)		Pago por desintegración (% sobre valor del vehículo a chatarrizar, según avalúo de Mintransporte)		Arancel		IVA (Actual = 19%)		Arancel: Menos 15 puntos IVA =0%
Subsidio	Ninguno	Menos 6 puntos	Menos9 puntos	20%	40%	Menos 10 puntos	Menos 15 puntos	5%	0%	
Valor presente costo de renovación de vehículos[1]	588	631	919	595	638	775	958	929	1,112	1,197
Valor presnete beneficio por muertes evitadas[1]	1,245	1,205	1,296	1,194	1,208	1,286	1,311	1,299	1,349	1,484
Relación Beneficio/Costo	***2.12***	***1.91***	***1.41***	***2.01***	***1.89***	***1.66***	***1.37***	***1.40***	***1.21***	***1.24***
Efectos de la medida										
VP Ingresos a la autoridad por pago de tasas (2018-2030)[1]	2,370	2,341	2,245	2,369	2,360	2,287	2,236	2,241	2,195	1,991
VP Costos al aplicar subsidio a propietarios (2018-2030)[1]	0	9	18	27	72	294	533	491	766	1,813
VP Fujo neto de recursos del Estado [1]	***2,370***	***2,332***	***2,226***	***2,342***	***2,289***	***1,993***	***1,703***	***1,750***	***1,429***	***178***
Emisiones $PM_{2.5}$ en 2030 (Antes de la medida) (ton/año)	4,798	4,798	4,798	4,798	4,798	4,798	4,798	4,798	4,798	4,798
Emisiones $PM_{2.5}$ en 2030 (Después de la medida) (ton/año)	3,697	3,660	3,456	3,690	3,654	3,551	3,433	3,450	3,349	2,910
Reducción de $PM_{2.5}$ - 2030 (Ton/año)	***1,101*** ***23%***	***1,138*** ***24%***	***1,342*** ***28%***	***1,108*** ***23%***	***1,143*** ***24%***	***1,247*** ***26%***	***1,365*** ***28%***	***1,347*** ***28%***	***1,449*** ***30%***	***1,888*** ***39%***
Concentración $PM_{2.5}$ en 2030 (Antes de la medida) ($\mu g/m^3$)	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59
Concentración $PM_{2.5}$ en 2030 (Después de la medida) ($\mu g/m^3$)	50	49	48	50	50	49	48	48	47	43
# de muertes evitadas (Acumulado 2019 - 2030)	***5,521***	***5,706***	***6,729***	***5,555***	***5,734***	***6,253***	***6,843***	***6,757***	***7,266***	***9,467***
Efectos sobre otras emisiones										
Emisiones CO_2 en 2030 (Antes de la medida) (Miles ton/año)	3,466	3,466	3,466	3,466	3,466	3,466	3,466	3,466	3,466	3,466
Emisiones CO_2 en 2030 (Despúes de la medida) (Miles ton/año)	3,256	3,214	3,145	3,254	3,215	3,173	3,128	3,141	3,104	2,912
Reducción de CO_2 - 2030 (Miles ton/año)	***210*** ***6.1%***	***252*** ***7.3%***	***321*** ***9.3%***	***213*** ***6.1%***	***251*** ***7.3%***	***293*** ***8.5%***	***338*** ***9.7%***	***325*** ***9.4%***	***362*** ***10.4%***	***555*** ***16.0%***
Carbón negro en 2030 (Antes de la medida) (ton/año)	2,984	2,984	2,984	2,984	2,984	2,984	2,984	2,984	2,984	2,984
Carbón negro en 2030 (Despúes de la medida) (ton/año)	2,193	2,172	2,040	2,188	2,167	2,104	2,029	2,036	1,973	1,703
Emisiones NO_x en 2030 (Antes de la medida) (ton/año)	14,172	14,172	14,172	14,172	14,172	14,172	14,172	14,172	14,172	14,172
Emisiones NO_x en 2030 (Después de la medida) (ton/año)	13,493	13,426	13,206	13,485	13,428	13,295	13,150	13,190	13,077	12,495
Emisiones SO_2 en 2030 (Antes de la medida) (ton/año)	274	274	274	274	274	274	274	274	274	274
Emisiones SO_2 en 2030 (Después de la medida) (ton/año)	267	261	257	267	261	258	255	257	255	244

[1] Tasa de descuento de 5%

[2] Flujo neto de recursos = Costo para el Estado al otorgar el subsidio (egresos o disminución de ingresos) menos Recaudo de las tasas (ingresos para el AMVA)
(Valores negativos indican que las tasas recaudadas son mayores que el costo para el Estado al aplicase el respectivo subsidio)

Fuente: Cálculos Econometría Consultores para este trabajo

Capítulo 5

PRINCIPALES LIMITACIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta la información empleada para este estudio, así como los métodos aplicados tanto para la valoración como para las identificar las respuestas esperadas de los actores a los instrumentos económicos aplicados, esta sección se inicia con una breve síntesis de los supuestos aplicados y de las principales restricciones que pueden derivarse de los mismos. En seguida, se hace un resumen de las principales conclusiones encontradas de la respuesta a los incentivos propuestos (tasas y subsidios) y al análisis beneficio/costo de su aplicación. Finalmente, se presentan algunas recomendaciones centrales que se deben tener en cuenta para hacer efectiva la aplicación de estos instrumentos.

5.1 PRINCIPALES SUPUESTOS Y SUS LIMITACIONES

Para presentar estos supuestos y limitaciones, se tiene en cuenta tres aspectos centrales: las estimaciones de la relación entre la contaminación y la salud de las personas; la valoración económica de la contaminación del aire; y la forma de modelar las respuestas esperadas de los propietarios de los vehículos ante las señales económicas del regulador.

5.2 ESTIMACIÓN DEL EFECTO DE LA CONTAMINACIÓN SOBRE LA SALUD DE LAS PERSONAS

La relación entre la contaminación y la mortalidad se analizó aplicando un modelo Cox de supervivencia que estima cambios en la probabilidad de fallecer ante la exposición de la población a $PM_{2.5}$ frente a la probabilidad de fallecer por otra causa distinta. Para tal efecto, se contó con información histórica de las emisiones en diversos puntos de la zona de estudio, con diferenciación para los 10 municipios que constituyen el AMVA. Igualmente, se contó con información de varias características individuales de cada una de las personas allí residentes y que fallecieron durante el período de análisis (2008 a 2015). Sin embargo, este análisis tiene algunas restricciones, en particular por tres tipos de limitaciones en las bases de datos empleadas:

- La ausencia de información sobre la morbilidad de las personas que, estando expuestas a la misma contaminación, no fallecen durante el período analizado.

- La ausencia de información sobre la movilidad de las personas que se incluyen en el análisis de mortalidad, teniendo que asumirse que la exposición a la contaminación del aire se produjo durante toda su vida.
- La ausencia de información sobre condiciones básicas que pueden afectar la mortalidad asociada a las enfermedades seleccionadas, destacándose la falta de datos sobre sobre aspectos de alta relevancia tales como los hábitos de tabaquismo tanto activo como pasivo y la exposición a contaminación especial en el lugar de trabajo.

5.3 VALOR ECONÓMICO DE LA VIDA Y DE LA PREVENCIÓN DE MUERTES PREMATURAS

En primera instancia, el estudio se focalizó en la aplicación de un método de valoración de las muertes prematuras mediante el enfoque de capital humano, basado en la estimación del valor que deja de percibir la economía, frente a un escenario en el cuál no se hubieran generado estas muertes. Este enfoque tiene la virtud de ser usualmente más aceptado por ciertos tomadores de decisión que, en algunos casos, tiene cierta reticencia a aceptar otros métodos de valoración, especialmente aquellos que aplican el valor estadístico de la vida a partir de la identificación de la disponibilidad a pagar de los individuos por prevenir su muerte prematura. Sin embargo, diversos estudios previos aplican este último método[25].

Al usar como indicador de valor estadístico de la vida los resultados de un estudio de disponibilidad a pagar realizado en São Pablo, Brasil [26] y valorar las muertes prematuras estimadas para el AMVA en este estudio, se encuentra un valor aproximado a 12 veces el aquí estimado con el enfoque da capital humano. Teniendo en cuenta esta circunstancia, los resultados aquí encontrados con la aplicación de las estimaciones del valor de las muertes prematuras aplicando el concepto de capital humano, se complementan con una ilustración de los resultados que se hubieran obtenido aplicando el enfoque del valor estadístico de la vida. Esto significa que, mientras con el primer método este estudio obtuvo que la contaminación al aire en el AMVA genera un costo que compromete entre el 0,4 y el 0,7 por ciento del PIB de la región, con el enfoque de valor estadístico de la vida y con base en las afectaciones sobre la mortalidad de las personas, este costo se elevaría a valores entre 5,1 y 8,5 por ciento del PIB regional, es decir alrededor de 12 veces el valor obtenido al aplicar el método del capital humano.

[25] Ver por ejemplo (Sánchez, Ahmed, & Awe , 2007) y (AMVA, 2017). Igualmente, ver los resultados del estudio presentado por el DNP en el reciente foro sobre Calidad del Aire, el cual arroja resultados para el país de costo de la calidad del aire entre 0,5% del PIB (con el enfoque de capital humano) y 1,5% del PIB (con el enfoque de valor estadístico de la vida) (DNP, 2018).
[26] Ver (Ortiz, Markandya, & Hunt, 2009)

5.4 Respuesta de los propietarios de vehículos a las tasas y los subsidios

El modelo de simulación de la respuesta de los propietarios a los incentivos a la renovación del vehículo se fundamenta en el análisis del flujo de ingresos y costos de operación, así como los costos de renovación del vehículo. Este modelo se basa en el supuesto de que los propietarios de vehículos operan siempre minimizando costos y con una visión de futuro, contrastando sus expectativas de ingresos netos con el vehículo actual con los que obtendría si renueva el vehículo. Aunque este enfoque es válido para empresarios formales que asumen todos los costos (incluyendo el pago de impuestos y de seguridad social), puede tener ciertas restricciones, dentro de las cuales se incluyen las siguientes:

- Este mecanismo de toma de decisiones no aplicaría de la misma manera para propietarios y operarios informales de vehículos. Por su informalidad, ellos podrían operar a menores costos directos que los incluidos en el modelo de simulación, de tal forma que su respuesta ante el cobro de una tasa podría darse de manera más lenta que la que arroja el modelo de simulación empleado.
- Se asume que, al aplicar las tasas, todos los propietarios de vehículos incurren en este costo adicional. Sin embargo, la alta informalidad de ciertos tipos de transportadores podría hacer que ellos no respondan de la misma manera a las tasas como sí lo que harían los transportadores formales.
- El modelo de simulación se aplicó únicamente a nivel local y asumiendo que los cobros por contaminación se pueden hacer también a nivel local. Sin embargo, para aplicar este mecanismo se tendría con recurrir al lugar de registro de los vehículos, con un posible doble sesgo: no cubriría a los vehículos que operan en el AMVA, pero que están registrados en otras regiones del país; pero sí cubriría a vehículos que, estando registrados en el AMVA, operan en otras regiones. Este doble sesgo, en dirección contraria, sólo se anularía si existiera un balance entre los dos valores.
- La estimación de los costos de operación y de renovación de los vehículos se hizo a partir de fuentes generales y no específicas para el área de estudio. Aunque esto puede no comprometer de manera significativa las conclusiones centrales del estudio, sí llama la atención sobre la necesidad de hacer un seguimiento detallado a las medidas que se apliquen para analizar la respuesta específica de cada tipo de transportador a las señales económicas que se envíen.
- El modelo de simulación asume que los beneficios por desintegración generan una renovación del vehículo, a través de su sustitución por uno nuevo con menores emisiones. Sin embargo, en la práctica esto puede no suceder siempre, ya que quien

recibe el beneficio podría comprar un vehículo usado, traído por ejemplo de otra región, con lo cual su vehículo antiguo podría sería reemplazado por otro igualmente viejo (y más contaminante que uno nuevo) sin generarse una reducción significativa de las emisiones.

- El modelo empleó una regla de sustitución bastante conservadora: cada vehículo actual se contrastó con la decisión de reemplazarlo con uno de las mismas características, pero nuevo. Aunque esto es válido para no sobreestimar el efecto que podría tener la renovación del parque automotor, no contempla incentivos diferenciales por el tipo de vehículo que se adquiera, para incentivar más a quienes tomen la decisión de cambiar hacia vehículos menos contaminantes. Sin embargo, esta restricción no parece generar sesgos importantes, especialmente si se tiene en cuenta que entre 2009 y 2019 se autorizaron en el país más de 4.800 cupos de importación de vehículos eléctricos e híbridos, sin pagar arancel, pero con estos cupos sólo se importaron 715 vehículos[27].

5.5 Principales conclusiones del análisis Beneficio / Costo

De los resultados del producto previo de esta consultoría, se deduce que por cada tonelada anual $PM_{2.5}$ que se continúe emitiendo por las fuentes móviles en 2030 en el AMVA, se esperaría que se generen entre 2018 y 2030 de 5 a 10 muertes prematuras acumuladas por exposición a esta contaminación. De allí que, por cada tonelada que se haya disminuido las emisiones en 2030 en relación con el escenario *business-as-usual*, se habrán logrado prevenir ese número de muertes prematuras de esta magnitud.

Con base en estos resultados, los beneficios de reducir cada tonelada de estas emisiones y prevenir muertes las generadas por la mala calidad del aire se estimaron de manera bastante conservadora, aplicando el método de pérdida de productividad del capital humano por menor valor agregado a la economía por la persona que fallece prematuramente. Por otra parte, el costo de mitigar las emisiones de material particulado por fuentes móviles se estimó identificando la respuesta esperada de renovación de cada vehículo, al incrementar los costos mediante la aplicación de una tasa por contaminación. Al relacionar los beneficios marginales con los costos marginales de prevenir la contaminación, se obtuvo que las tarifas de equilibrio serían de 60 pesos por gramo de $PM_{2.5}$ emitido (para el límite inferior del rango de muertes prematuras estimadas) y de 120 pesos por gramo emitido (para el límite superior del rango de estas muertes).

[27] Ver presentación del director del DNP en el reciente foro sobre *Calidad del Aire* (DNP, 2018).

Al contrastar estas estimaciones de beneficios y costos de reducir la contaminación aplicando los instrumentos económicos propuestas, se obtuvieron las siguientes conclusiones centrales:

- Aplicando las tasas por emisiones de $PM_{2.5}$ a la tarifa de 60 pesos por gramo emitido, y sin subsidios complementarios, se obtiene una relación beneficio/costo de 1,57 que corresponde a la más alta de las arrojadas por todos los escenarios (con y sin subsidios) que se evaluaron a esta tarifa. Sin embargo, al contrastarla con la relación beneficio/costo de 2,12 que se obtendría al cobrar una tarifa de 120 pesos por gramo emitido y sin subsidios (la mejor de todas las evaluadas), se encuentra una diferencia central: a la tarifa de $60/g, entre 2018 y 2030 se lograrían prevenir poco 3.473 muertes prematuras; en contraste, subiendo la tarifa a $120/g, el resultado sería de algo más de 5.521 muertes evitadas, más de una y media veces más efectivo que con la más tarifa más baja. Incluso, este efecto positivo y altamente relevante se eleva a cerca de 9.500 muertes evitadas en el mismo período, si se aplican las tasas con una reducción significativa del arancel y del IVA de los vehículos nuevos.

- Si las tasas por contaminación se aplican con otros instrumentos que impliquen subsidios a la renovación el parque automotor, se reduje en alguna medida la relación beneficio/costo. Sin embargo, en ningún caso de los evaluados de las tasas con un único subsidio esta relación adquiere valores inferiores a la unidad, y solo es menor que uno si se aplican simultáneamente las tasas con la reducción de arancel y del IVA.

- Aún después de cumplir con el objetivo esperado de incentivar la modernización del parque automotor y reducir la contaminación del aire, las tasas retributivas por emisión de $PM_{2.5}$ generarían importantes recursos financieros a la entidad reguladora, importantes para financiar los subsidios otorgados. En casi todos los escenarios simulados (con excepción de la reducción simultánea de arancel e IVA, a una tarifa de las tasas de $60/g) los ingresos generados por las tasas son superiores a los costos financieros derivados de otorgar subsidios a los particulares. Esto es especialmente importante para la implementación de las medidas propuestas, especialmente en una época de déficit fiscal como la actual.

5.6 Recomendaciones generales

Los resultados encontrados en la evaluación económica muestran que la aplicación de instrumentos económicos como los planteados en el PIGECA y aquí evaluados, son recomendables desde el punto de vista de un objetivo central: prevenir las muertes prematuras y el alto costo social que ellas implican. Sin embargo, para hacerlos viables es

preciso prestar especial atención a algunos aspectos centrales de política pública que se relacionan tanto con la viabilidad de su aplicación, como con la atención a los sectores más vulnerables que se verán afectados por el cobro de una tasa a las emisiones de $PM_{2.5}$. Teniendo en cuenta estos dos criterios, se formulan aquí las siguientes recomendaciones generales[28]:

- La aplicación de las tasas por emisión tiene como requisito básico que se cuente con un método de identificación de las cantidades emitidas que sea ágil, efectivo y de bajo costo. Para cumplir con este requisito, en las etapas finales de esta consultoría se hace una propuesta de usar como variable proxy de las emisiones una caracterización de todos los vehículos del país, usando dos insumos: la Tabla Base de Liquidación emitida por el Ministerio de Transporte para efectos del liquidar el impuesto vehicular; y la caracterización de las emisiones según tipo de vehículo y su respectiva edad, la cual está implícita en los análisis ya realizados para el PIGECA del AMVA.
- La aplicación de cualquier subsidio a la renovación del parque automotor debe enfrentar las restricciones presupuestales del Estado que se derivan de ello. Para enfrentar esta situación, se recomienda privilegiar aquellos subsidios que puedan ser financiados de manera significativa por el sistema, recurriendo a los ingresos generados por las tasas.
- Al otorgar subsidios a la renovación del parque automotor, es preciso aplicar no solo criterios de conveniencia sino también de equidad. Para tal efecto, se recomienda focalizar estos subsidios hacia los transportadores más frágiles del sistema, representados por propietarios individuales que actúan en la informalidad, propendiendo para que estos subsidios incentivan además su formalización.
- Tanto el cobro de las tasas como la asignación de subsidios enfrentan altos riesgos tanto de evasión (en el caso de las tasas) como de captura de rentas indebidas (en el caso de los subsidios). Esto obliga a prestar especial atención a los mecanismos de vigilancia y control, y muy especialmente a la inclusión dentro de los criterios y normas de aplicación de un sistema de sanciones significativas y efectivas a los trasgresores de dichas normas.
- La efectividad del sistema de recaudo de las tasas por emisión es un punto crítico de la aplicación del sistema. Por eso se propondrá en las siguientes secciones de esta consultoría negociar con las autoridades recaudadores del impuesto vehicular para que sean ellas las que realicen este recaudo.

[28] Algunas recomendaciones más específicas se tratarán en los siguientes productos de esta consultoría.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

AMVA. (2017). Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire. Capítulo 6. Objetivos, Metas y Ejes Estratégicos . Area Metropolitana del Valle de Aburrá.

AMVA. (2017). *Plan Integral deGestión de Calidad del Aire; cap 7; Borrador Final (Julio 4).* Medellín, Colombia.

DNP. (2018). *Calidad del Aire: Una prioridad de Política Pública en Colombia.* Universidad de los Andes, 14 de febrero de 2018, Bogotá: Departamento Nacional de Planeación. Obtenido de https://uniandes.edu.co/noticias/ambiente-y-sostenibilidad/calidad-del-aire-una-prioridad-de-politica-publica

Ortiz, R. A., Markandya, A., & Hunt, A. (Mar de 2009). Willingness to Pay for Mortality Risk Reduction Associated with Air Pollution in São Paulo. *Rev. Bras. Econ., 63*(1), 3-22.

Sánchez, E., Ahmed, K., & Awe , Y. (2007). *Environmental Priorities and Poverty Reduction, A Country environmental Analysis for Colombia.* Washington, D.C: The World Bank.

ANEXO I - CARACTERÍSTICAS DE CADA TIPO DE VEHÍCULO, SEGÚN SU EDAD

Este anexo presenta los resultados del procesamiento de Econometría Consultores a la base de datos del Inventario de Fuentes Móviles 2015 y de la base de datos del escenario BAU de estas fuentes, ambos suministrados por el AMVA y la Universidad Pontifica Bolivariana (UPB).

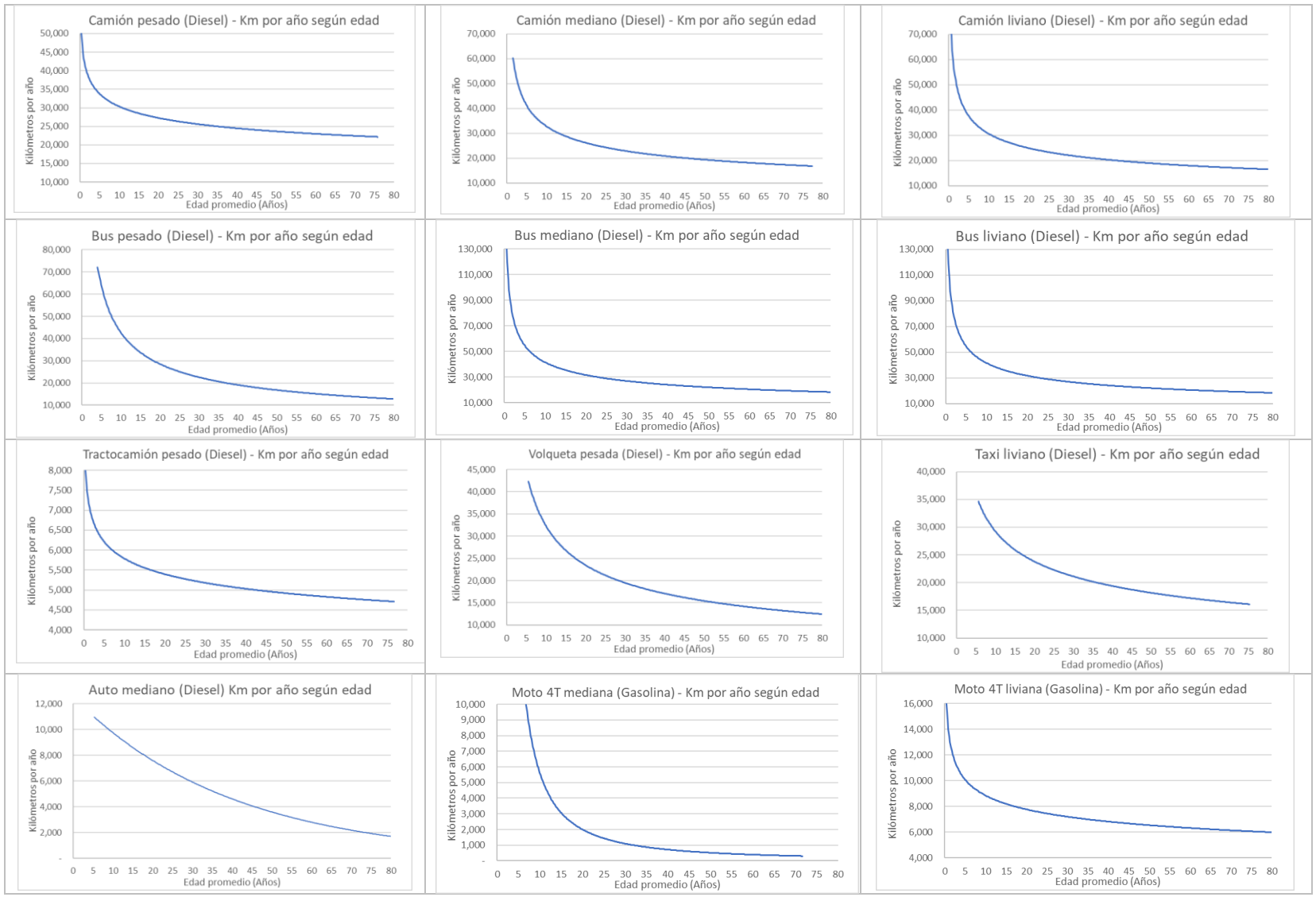
El inventario y las proyecciones de la UPB presentan, para cada tipo de vehículo, un el escenario BAU con cinco variables básicas: (i) el número de vehículos en el año base (2015), distribuidos según el respectivo modelo, es decir, indicando el número de vehículos según su edad (ver Figura 2.1); (ii) la proyección 2015-2030 de vehículos retirados (viejos) y las ventas de vehículos nuevos, por tipo de vehículo; (iii) la proyección del número de vehículos en operación (2015-2030), siguiendo las tendencias actuales y sin aplicar las medidas del PIGECA; (iv) la proyección del kilometraje recorrido por el total de vehículos de cada tipo y la cantidad de combustible consumida; y (v) la proyección de emisiones de $PM_{2.5}$, CO_2, carbón negro, NO_x, SO_2 y compuestos orgánicos volátiles, generadas por el total de vehículos de cada tipo.

Con base en esta información, Econometría proyectó el número de vehículos de cada edad, año por año, desde 2015 hasta 2030. Adicionalmente, fue posible identificar tres variables implícitas, contenidas en el inventario y las proyecciones del UPB: el kilometraje anual recorrido por un vehículo promedio de cada tipo, según su edad; el consumo anual de combustible y los factores de emisión según la edad de cada vehículo, implícitos en el inventario de fuentes móviles, requeridos para hacer las simulaciones del cambio de emisiones al aplicar las medidas propuestas[29].

Con base en esta información, y tomando como punto de partida la proyección del número de vehículos de cada tipo, año por año y según su edad, se identificaron las siguientes variables implícitas en el Inventario:

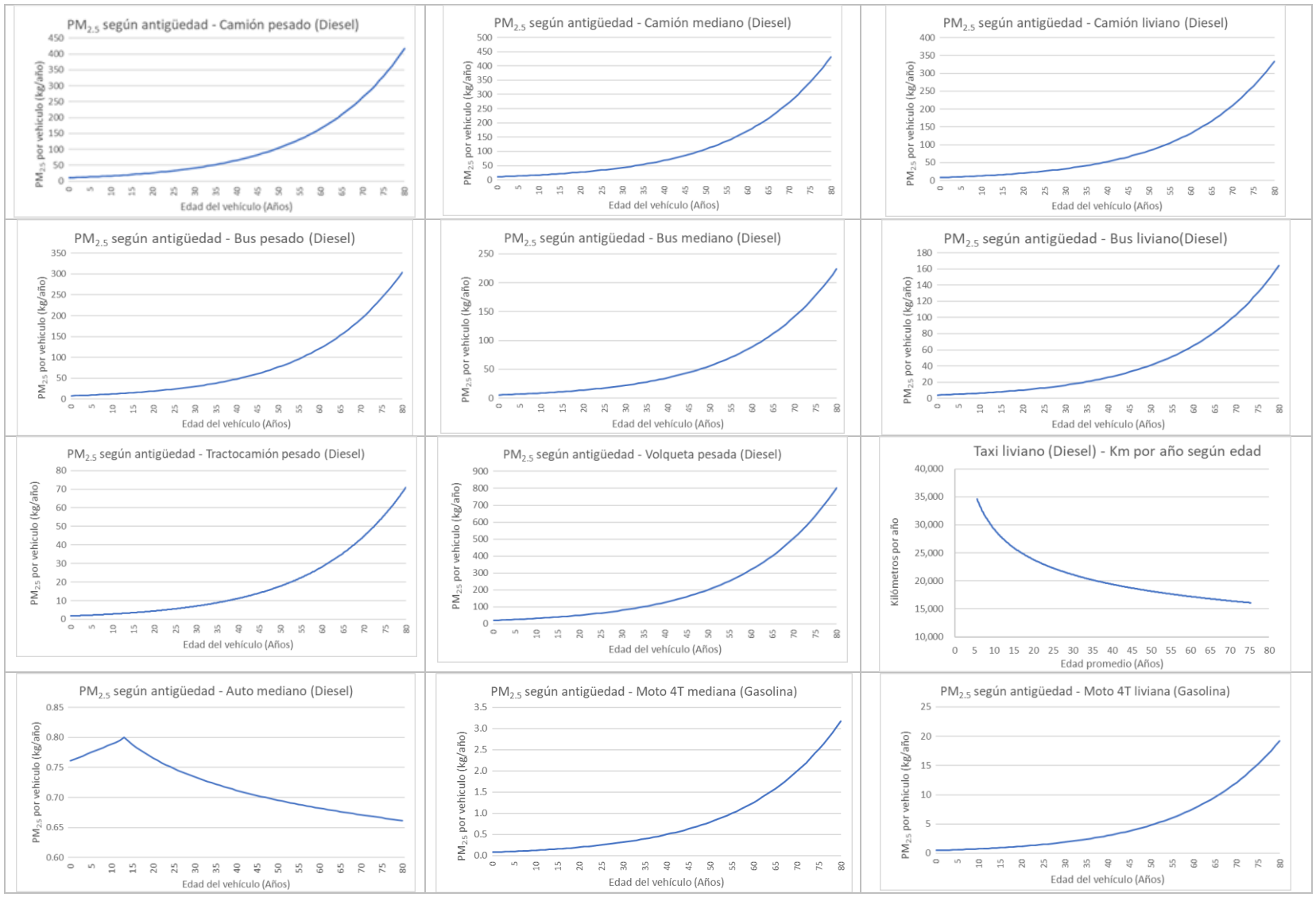
[29] Ver figuras A-I.1 y A-I.2.

Figura A-I. 1 - Kilómetros anuales recurridos en el AMVA por cada tipo de vehículo y según su edad



Fuente: Cálculos Econometría con base en AMVA y UPB. Inventario de Fuentes Móviles – 2015 (Base de datos)

Figura A-I. 2 - Emisiones de $PM_{2.5}$ en AMVA según edad del vehículo (kg/año)



Fuente: Cálculos Econometría con base en AMVA y UPB. Inventario de Fuentes Móviles – 2015 (Base de datos)

ANEXO II - VALOR, COSTOS DE OPERACIÓN E INGRESOS DE CADA DE VEHÍCULO TIPO, SEGÚN SU EDAD

Este anexo presenta los resultados de la estimación del valor de cada tipo de vehículo y de los costos de operación y mantenimiento, según la edad del mismo.

Para calcular el valor del vehículo según su edad, se tomaron como punto de referencia los avalúos reportados en la *Tabla de base gravable 2017* expedida por el Ministerio de Transporte[30] para liquidar el impuesto vehicular de más de 13 mil vehículos, con modelos desde 1992 hasta 2016. El procedimiento aplicado para este trabajo fue el siguiente:

a) De la base de datos del Ministerio de Transporte se identificaron los vehículos que se ajustan a cada uno de los 12 tipos que se seleccionaron para este estudio, según las descripciones del Inventario de Fuentes Móviles 2015 del AMVA.
b) Para cada tipo de vehículo, se obtuvo el valor promedio reportado en la base para cada modelo (desde 1992 hasta 2016) y se asignó el avalúo para los modelos 2016 como el de vehículos nuevos, sin IVA ni arancel[31]. Para efectos del presente análisis, estos valores se expresaron a pesos de 2018 usado como deflactor el índice de precios al consumidor del Dane.
c) Con base en cada una de estas 12 series, se estimaron las funciones que relacionan el valor de cada tipo de vehículo con su respectiva edad, tal como se presenta en la Figura A-II.1. Esta función se usó en las simulaciones para cualquier edad del respectivo vehículo, hasta 80 años.

Para el cálculo de los costos anuales de operación y mantenimiento, se partió de información de un estudio previo de Econometría (2017) y se realizaron los ajustes pertinentes para cada tipo de vehículo con base en dos variables implícitas en la base de datos del escenario BAU construido por la PUB y calculados para cada tipo de vehículo y para cada edad: los kilómetros recorridos anualmente y el consumo de combustible. Adicionalmente, se asumió que un vehículo incrementa sus costos de mantenimiento en función directa con la depreciación: a mayor edad y menor avalúo reportado por el Ministerio de Trasporte, mayor costo de mantenimiento. Con base en estos supuestos, se estimaron los costos de operación y mantenimiento para cada tipo de vehículo y para cada edad (desde el vehículo nuevo, hasta cumplir 80 años) como se muestra en la Figura A.II.2.

[30] http://www.shd.gov.co/shd/sites/default/files/files/Bases%20Gravables%202017_vehiculos.xlsx
[31] Como estos avalúos son la base para liquidar el impuesto vehicular, se asume que no incluyen IVA ni arancel ya que de lo contrario se estaría liquidando un impuesto sobre otro impuesto.

Adicionalmente, se calculan tres costos adicionales, igualmente para cada vehículo promedio (el costo de la revisión técnico mecánica, el impuesto vehicular y el impuesto a la renta), así:

- El costo de la revisión técnico mecánica y de gases, teniendo en cuenta que los vehículos de servicio público deben asumir esta revisión al finalizar el primer año de operación, mientras que los particulares sólo incurren en este costo a partir del sexto año de operación.
- El impuesto vehicular, aplicando la tarifa oficial de este impuesto al avalúo del mismo establecido en la *Tabla de base gravable 2017* fijada por el Ministerio de Transporte (ajustada a pesos de 2018).
- El impuesto a la renta, a partir de la base gravable estimada como los ingresos (calculados como se describe enseguida), menos los costos operativos y de mantenimiento y menos la depreciación anual del vehículo.

Para la estimación de los ingresos de cada vehículo, se calculan bajo el supuesto de que un vehículo nuevo de cada tipo tiene unos ingresos brutos tales que arrojan una tasa interna de retorno equivalente a por lo menos una vez y media el costo del capital[32]. Con base en este parámetro, para cada vehículo con uno o más años de operación se calcula un ingreso anual a partir del ingreso bruto del vehículo nuevo, ajustado según los kilómetros en promedio que recorre cada vehículo según su respectiva edad[33].

Aplicando estos supuestos, los parámetros resultantes de ingresos y gastos en el escenario *business-as-usual*, es decir antes de aplicar los instrumentos económicos aquí evaluados, son los que se presentan en el siguiente cuadro.

[32] Se toma como referencia como costo de capital la tasa de interés bancaria del 15%. Este supuesto no afecta de manera importante el análisis que se quiere hacer ya que, en todos los casos y para cada vehículo nuevo, se mantiene el mismo ingreso bruto tanto para el escenario BAU como para el escenario después de aplicar cada instrumento económico analizado.
[33] En el caso del tipo de los vehículos de uso particular, se asume que el beneficio que obtiene su propietario equivale, en términos monetarios, al menos a lo que obtendría si dedicase el vehículo a una actividad generadora de ingresos.

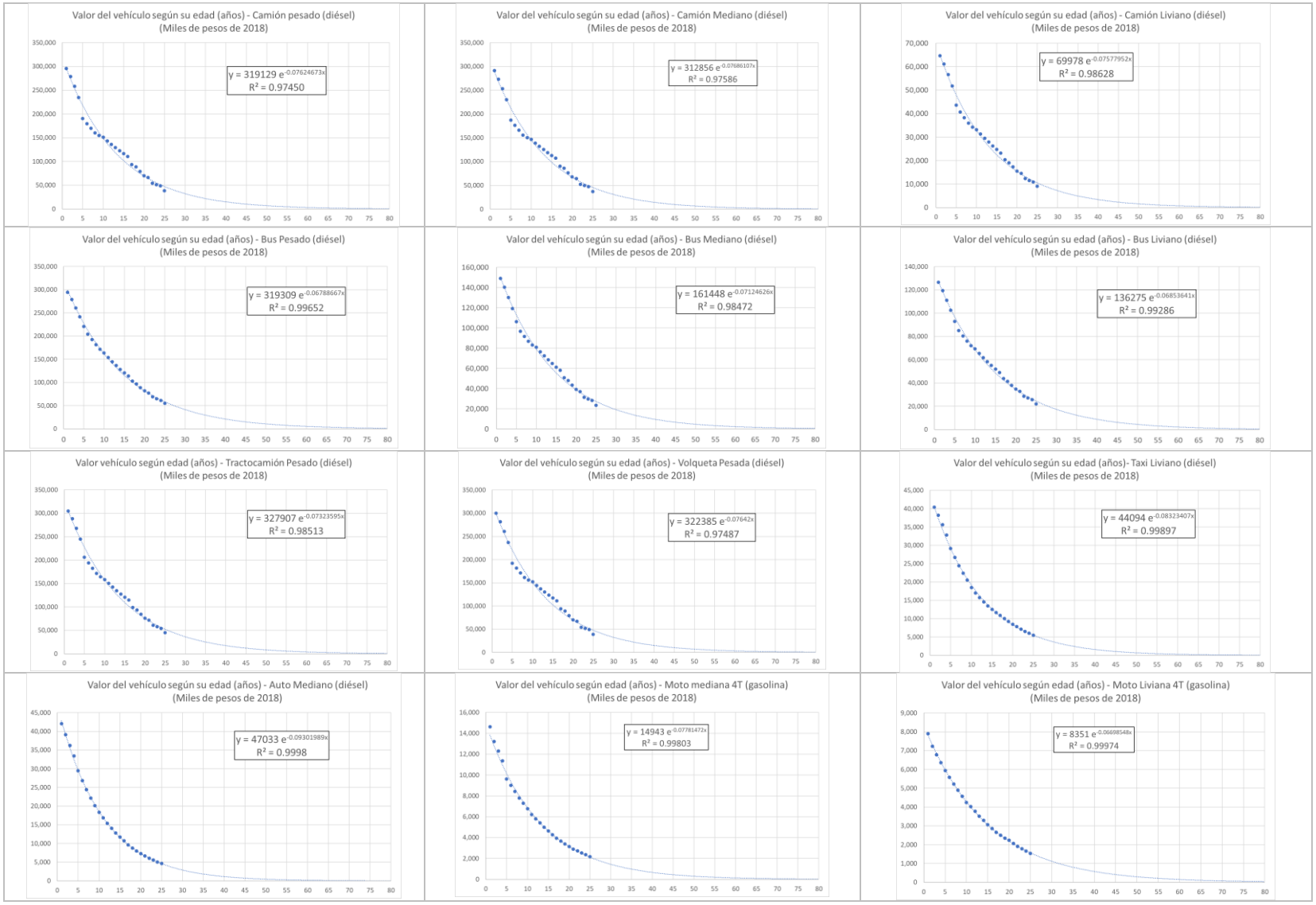
Cuadro A-I 1 - Parámetros de valor, ingresos y costos para un vehículo tipo nuevo, en su primer año de operación (Escenario *Business-as-Usual*)

	Tipo de vehículo	Valor del vehículo nuevo	Arancel (15%)	IVA (19%)	Ingresos anuales (primer año de operación)	Costos anuales (primer año de operación): Costo de operación y mantenimiento	Revisión técnico mecánica[1]	Impuesto vehicular	Impuesto a la renta
		Millones de pesos de 2018							
1	Camiones Pesados (diésel)	319.1	47.9	60.6	264.5	35.2	0.31	1.48	67.1
2	Camiones Medianos (diésel)	312.9	46.9	59.4	123.6	16.4	0.28	1.45	27.4
3	Camiones Livianos (diésel)	70.0	10.5	13.3	89.6	11.9	0.28	0.32	23.7
4	Buses Pesados (diésel)	319.3	47.9	60.7	220.6	29.6	0.31	1.49	55.4
5	Buses Medianos (diésel)	161.4	24.2	30.7	162.3	21.7	0.28	0.75	42.2
6	Buses Livianos (diésel)	136.3	20.4	25.9	124.3	16.5	0.28	0.63	31.9
7	Tractocamiones Pesados (diésel)	327.9	49.2	62.3	112.7	15.0	0.31	1.52	24.0
8	Volquetas pesadas (diésel)	322.4	48.4	61.3	205.1	27.3	0.31	1.49	50.3
9	Taxis Livianos (diésel)	44.1	6.6	8.4	50.4	6.7	0.19	0.20	13.1
10	Autos Medianos (diésel)	47.0	7.1	8.9	69.3	9.1	0.19	0.64	18.1
11	Motos 4T Livianas (gasolina)	8.4	1.3	1.6	5.6	0.7	0.13	0.04	1.4
12	Motos 4T Medianas (gasolina)	14.9	2.2	2.8	4.6	0.6	0.13	0.07	0.9

[1] Para "Autos medianos" el valor de la revisión técnico mecánica corresponde a un costo a asumir a partir del sexto año de operación.

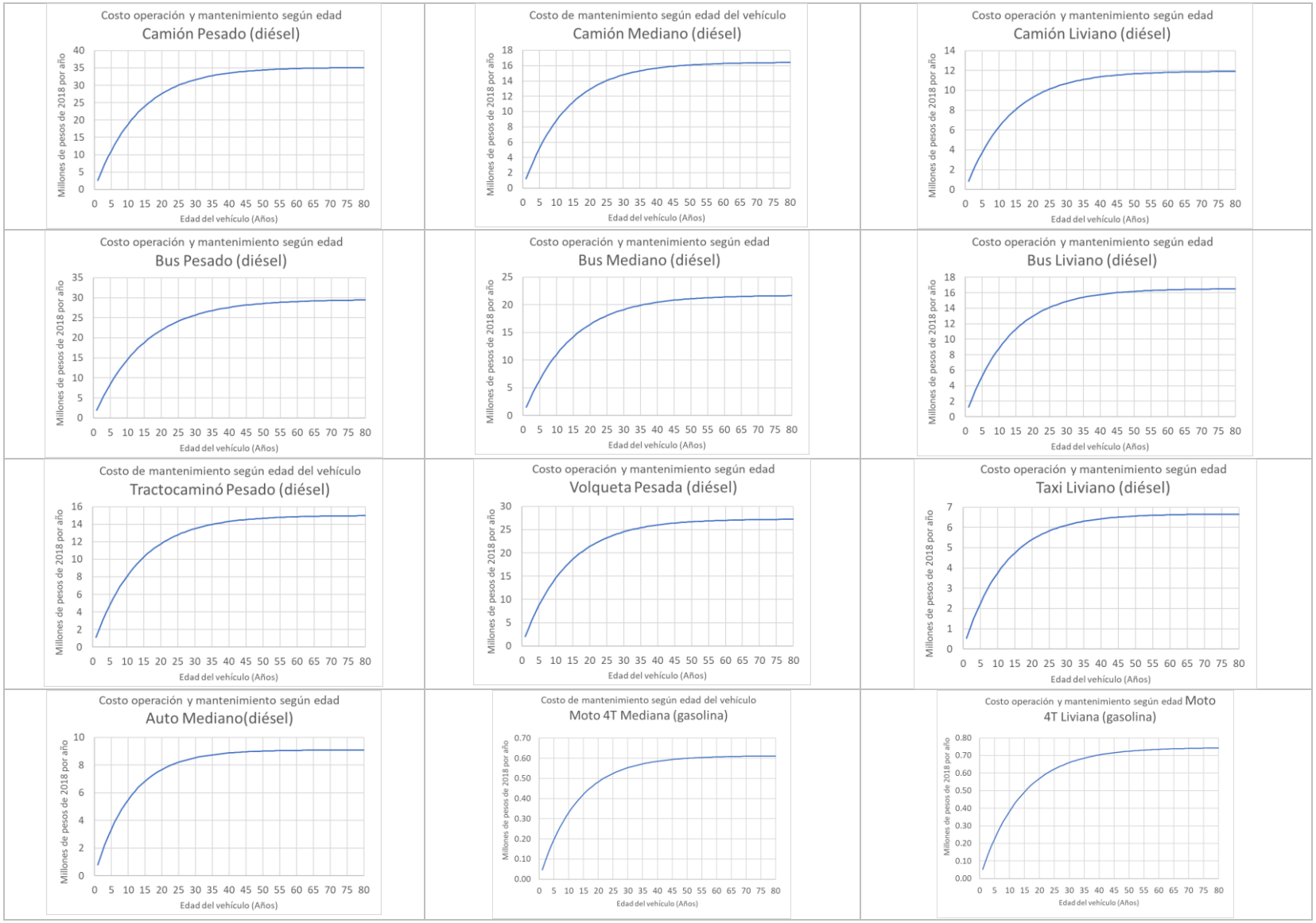
Fuente: Cálculos de Econometría Consultores con base en las fuentes descritas en el texto

Figura A-II. 1 - Valor de cada tipo de vehículo, según su edad (antes de arancel e IVA)



Fuente: Cálculos Econometría Consultores con base en Mintransporte. *Tabla de base gravable 2017*

Figura A-II. 2 - Costo anual de operación y mantenimiento por tipo de vehículo según su edad – Escenario BAU



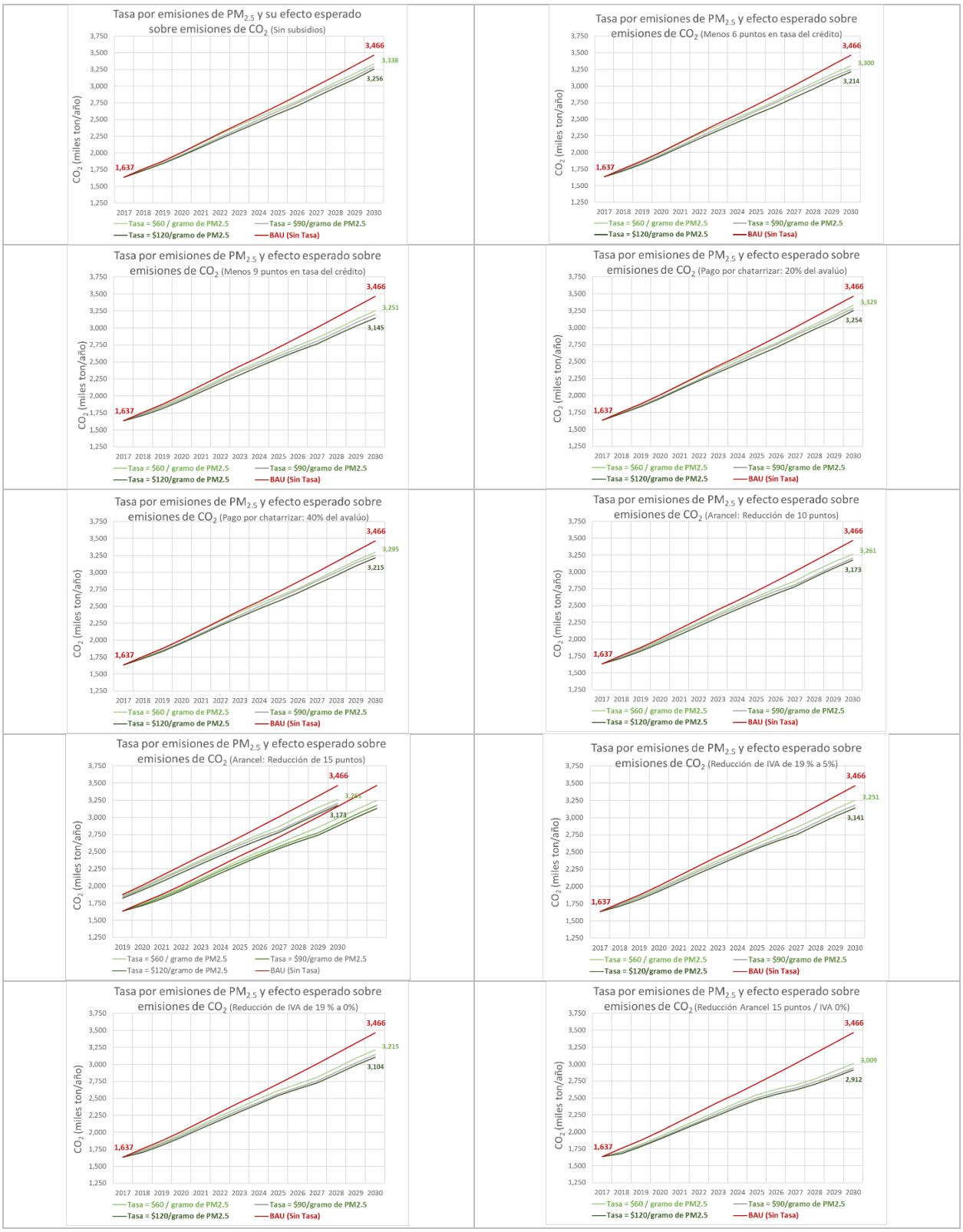
Fuente: Cálculos Econometría Consultores con base en Econometría (2017)

ANEXO III - EFECTO INDIRECTO DE LAS TASAS A $PM_{2.5}$ Y OTROS INSTRUMENTOS ECONÓMICOS SOBRE LAS EMISIONES DE OTROS CONTAMINANTES GENERADAS POR FUENTES MÓVILES EN EL VALLE DE ABURRÁ

En este anexo presenta los resultados de los efectos indirectos que tienen las tasas por emisión de $PM_{2.5}$ a las fuentes móviles, así como los subsidios con los que se simularon dichas tasas, sobre los siguientes contaminantes asociados al cambio climático: CO_2, carbón negro, NO_x y SO_2. Este efecto indirecto obedece a que los instrumentos económicos generan reducciones de PM2.5 al renovare los vehículos, lo cual genera también una reducción de las demás emisiones.

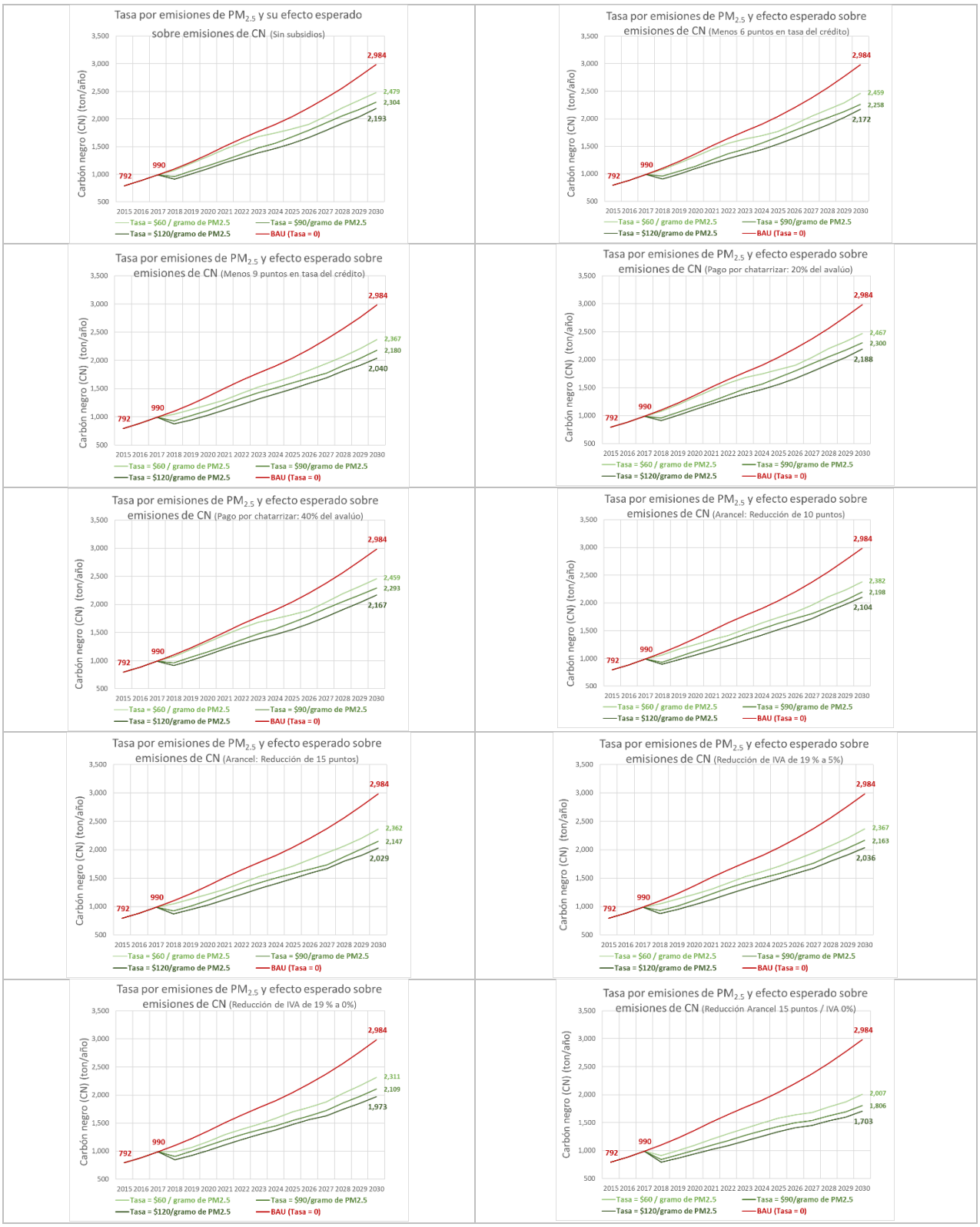
Para estimar estos efectos indirectos de los instrumentos económicos aplicados a $PM_{2.5}$, se partió de identificar la relación funcional implícita en las proyecciones del escenario BUA del PIGECA entre el comportamiento de $PM_{2.5}$ y las tendencias de cada uno de los siguientes contaminantes: CO_2, carbón negro, NO_x y SO_2. Luego, tomando como base el escenario BAU y los efectos de cada instrumento económico incluido sobre las tendencias de $PM_{2.5}$, se aplicó dicha relación funcional para estimar el efecto que dicho instrumento, aplicado sobre el $PM_{2.5}$, generaría de manera indirecta sobre las emisiones de los otros contaminantes mencionados. Tomando de manera ilustrativa las tarifas de las tasas de 40, 80 y 120 pesos por gramo de $PM_{2.5}$ emitido, en este anexo se presentan las simulaciones de cada uno de los instrumentos en el periodo de 2018 a 2013 sobre las emisiones de CO_2, carbón negro, NO_x y SO_2. Y para cada una de etas sustancias, se muestra la respuesta a cada una de las combinaciones de estas tasas: sin subsidio, con subsidio a la tasa de interés para adquirir un vehículo nuevo, con pago de un subsidio por chatarrización, con reducción del arancel a los vehículos nuevos o con reducción del IVA a los mismos.

Figura A-III 1 - Efecto esperado de Tasas a emisiones $PM_{2.5}$ y subsidios sobre emisiones de CO_2



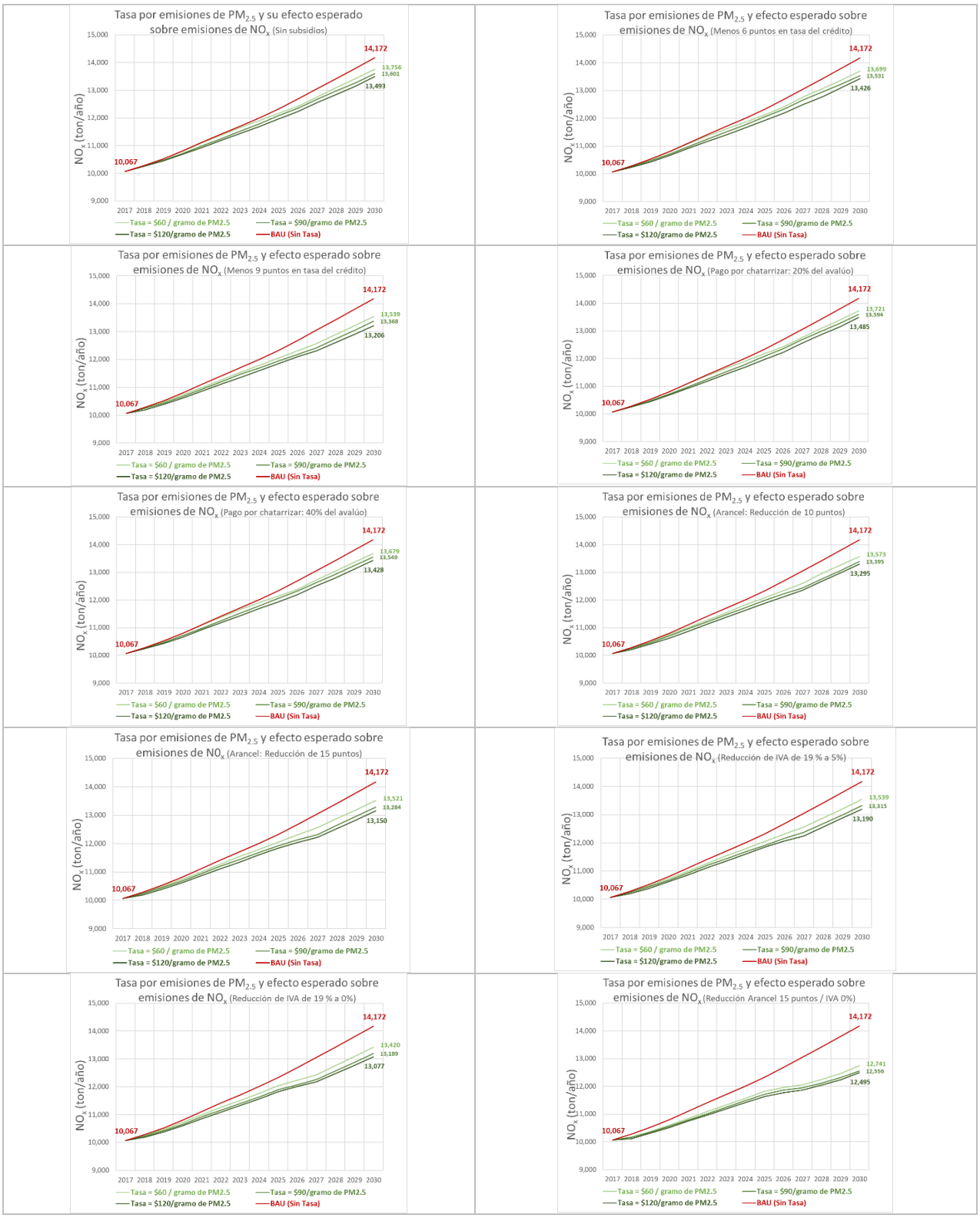
Fuente: Cálculos de Econometría Consultores para este trabajo

Figura A-III 2 Efecto esperado de Tasas a emisiones $PM_{2.5}$ y subsidios sobre emisiones de Carbón Negro



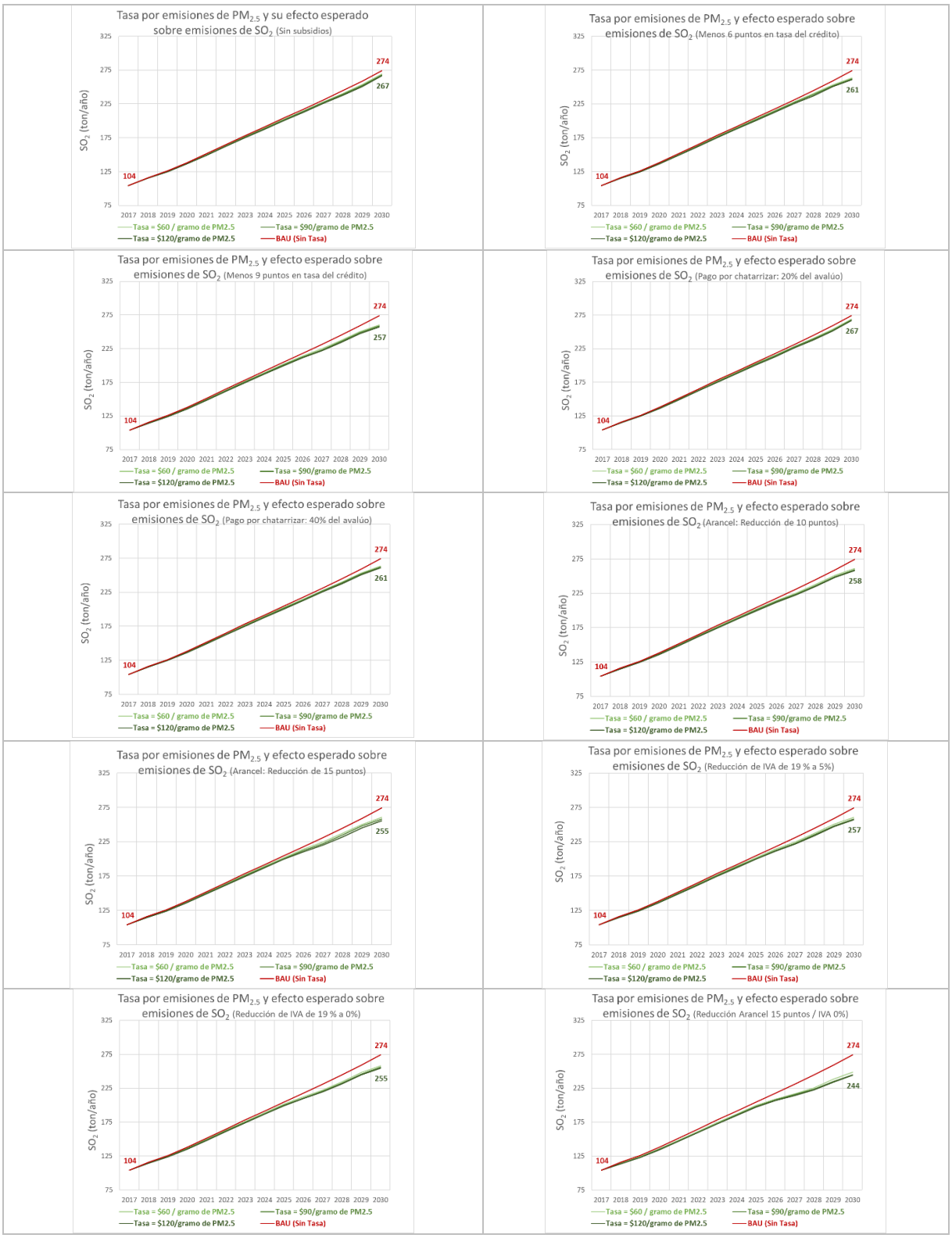
Fuente: Cálculos de Econometría Consultores para este trabajo

Figura A-III 3 - Efecto esperado de Tasas a emisiones $PM_{2.5}$ y subsidios sobre emisiones de NO_x



Fuente: Cálculos de Econometría Consultores para este trabajo

Figura A-III 4 - Efecto esperado de Tasas a emisiones $PM_{2.5}$ y subsidios sobre emisiones de SO_2



Fuente: Cálculos de Econometría Consultores para este trabajo

ANEXO IV - SÍNTESIS DE VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL VALLE DE ABURRÁ

De los resultados de valoración económica de la calidad del aire presentados en el producto 2 de esta consultoría, se obtuvieron indicadores que muestran la evolución de las concentraciones de material particulado ($PM_{2.5}$) estimadas como escenario *business-as-usual* (BAU) por el PIGECA, las emisiones equivalentes que generan estos niveles de concentración, el número de muertes prematuras que se generan por estas emisiones y el valor económico expresado en términos del valor presente del producto interna bruto dejado de generar por estas muertes prematuras. Estos indicadores se ilustran en el siguiente cuadro.

Cuadro A-IV 1 - Muertes prematuras y valor económico por material particulado en el Área Metropolitana delValle de Aburrá

	Concentración y emisiones de $PM_{2.5}$ (Escenario *business-as-usual*)			Escenario moderado				Escenario más realista			
				Muertes prematuras estimadas por $PM_{2.5}$		Valor agregregado perdido (miles de millones de COP)		Muertes prematuras estimadas por $PM_{2.5}$		Valor agregregado perdido (miles de millones de COP)	
Año	µg/m³	Ton/año	Incremento Ton/año	Total	Por incremento de $PM_{2.5}$	Pesos de 2017	Pesos de 2018	Total	Por incremento de $PM_{2.5}$	Pesos de 2017	Pesos de 2018
2015	31.9	1,853	-	2,543	-	-	-	3,710	-	-	-
2016	33.0	2,017	164	2,700	91	11	11	3,939	133	16	16
2017	34.7	2,201	184	2,951	241	28	29	4,306	353	41	43
2018	36.5	2,402	201	3,226	412	47	49	4,707	602	69	72
2019	38.6	2,626	224	3,526	619	70	73	5,145	905	103	107
2020	40.8	2,867	241	3,830	816	91	95	5,645	1,247	140	145
2021	43.3	3,127	260	4,156	1,034	114	119	6,210	1,655	183	191
2022	45.6	3,377	250	4,439	1,222	134	139	6,741	2,049	224	234
2023	47.9	3,621	244	4,694	1,397	152	158	7,262	2,453	267	278
2024	50.1	3,861	240	4,910	1,547	167	174	7,752	2,846	308	321
2025	52.5	4,123	262	5,116	1,699	183	191	8,260	3,274	353	368
2026	55.2	4,416	293	5,313	1,855	200	208	8,792	3,747	404	420
2027	58.2	4,738	322	5,545	2,030	218	227	9,426	4,298	462	481
2028	61.4	5,085	347	5,754	2,197	236	246	10,067	4,879	524	545
2029	64.9	5,462	377	5,997	2,382	255	265	10,819	5,547	593	618
2030	68.7	5,862	400	6,220	2,563	274	285	11,594	6,259	669	697
Total			4,009	70,921	20,106	2,182	2,271	114,375	40,246	4,355	4,533

Fuente: Estimaciones de Econometría Consultores para este trabajo (ver Tarea 2 de esta consultoría)

ANEXO V - RESULTADOS DE COMBINAR LAS TASAS A LA EMISIÓN DE $PM_{2.5}$ CON OTROS INSTRUMENTOS ECONÓMICOS (SUBSIDIOS)

Para evaluar el impacto potencial de distintos niveles de las tasas por emisiones, así como de los beneficios a quienes renueven sus vehículos, además de la simulación para la aplicación exclusiva de las tasas y sin ninguno subsidio, el modelo se aplicó para las siguientes combinaciones:

a) Aplicar las mismas tasas, pero adicionalmente bajar la tasa de interés del crédito para adquirir un vehículo nuevo. Con una tasa de interés vigente en el mercado de 15% anual, para efectos de este análisis se hicieron dos simulaciones: rebajando esta tasa de interés en 6 puntos y en 9 puntos porcentuales.

b) Cobrando las mismas tasas por emisiones, pero otorgando como beneficio un pago a quien desintegre el vehículo. Este pago se calculó como un porcentaje sobre la base de liquidación del vehículo del mismo tipo y de la misma edad del vehículo desintegrado (aplicando los avalúos de la *Tabla de base gravable 2017* expedida por el Ministerio de Transporte)[34], con dos ejemplos: 20% y 40% de este avalúo.

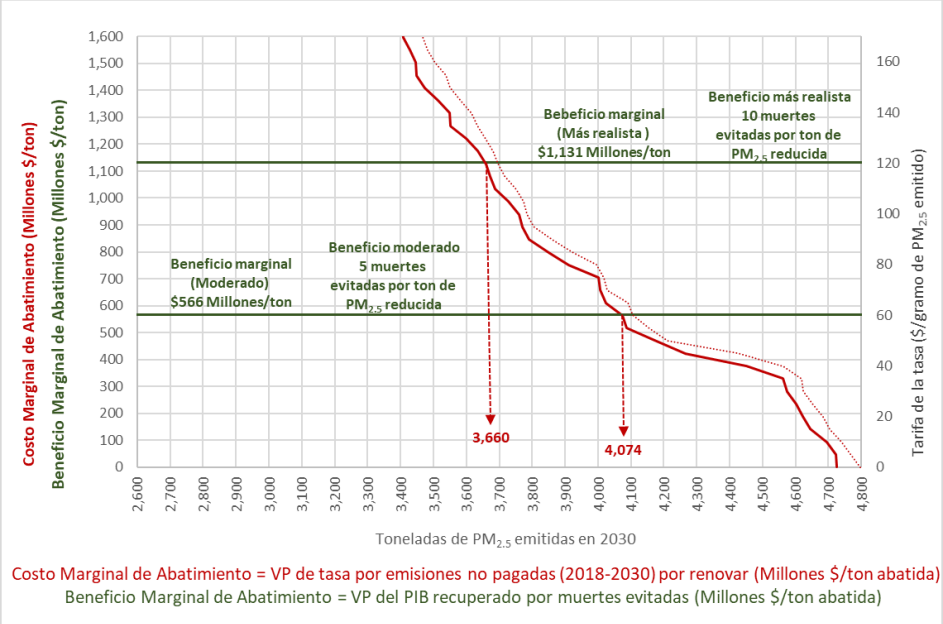
c) Cobrar las tasas por emisiones, pero disminuyendo los costos de adquisición del vehículo nuevo a quienes desintegren el viejo a través de la disminución del pago del arancel en 10 puntos y en 15 puntos (actualmente el arancel general es de 15%, pero hay acuerdo comerciales específicos en donde se disminuye o elimina dicho arancel).

d) Cobrando las tasas por emisión y reduciendo los costos de adquisición del vehículo nuevo, reduciendo el IVA actual del 19% a un 5% o a 0%, igualmente aplicable únicamente a quienes desintegren el vehículo viejo.

En este anexo se presentan los resultados de la relación entre los costos marginales de cada reducción y los beneficios de la misma, para cada una de estas combinaciones.

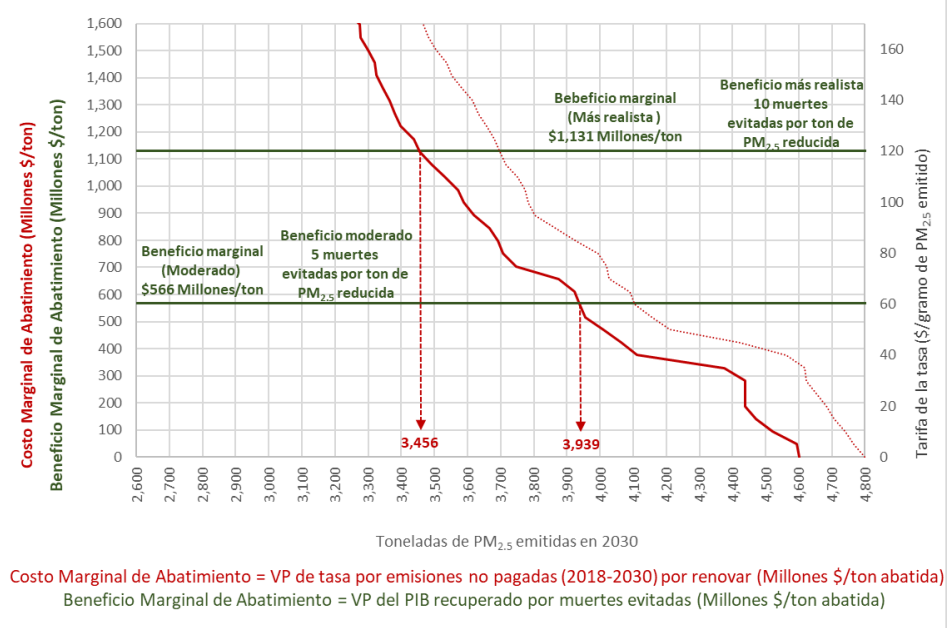
[34] Para una referencia a las bases de cálculo de estos beneficios para cada tipo de vehículo y para cada una de sus respectivas edades, véase la figura A-II.1 en el Anexo I.

Figura A-V 1 - Beneficios y costos de reducir emisiones con tasas a $PM_{2.5}$ de $60/g y $120/g, Reduciendo el interés del crédito en 6 puntos



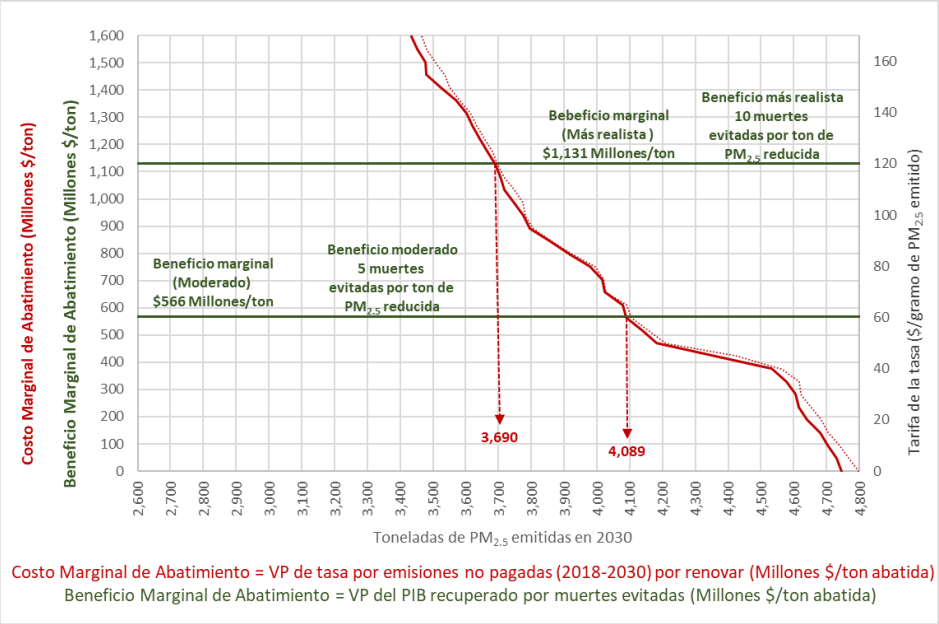
Fuente: Elaborado por Econometría Consultores para este trabajo

Figura A-V 2 - BENEFICIOS Y COSTOS DE REDUCIR EMISIONES CON TASAS A $PM_{2.5}$ DE $60/G Y $120/G, REDUCIENDO EL INTERÉS DEL CRÉDITO EN 9 PUNTOS



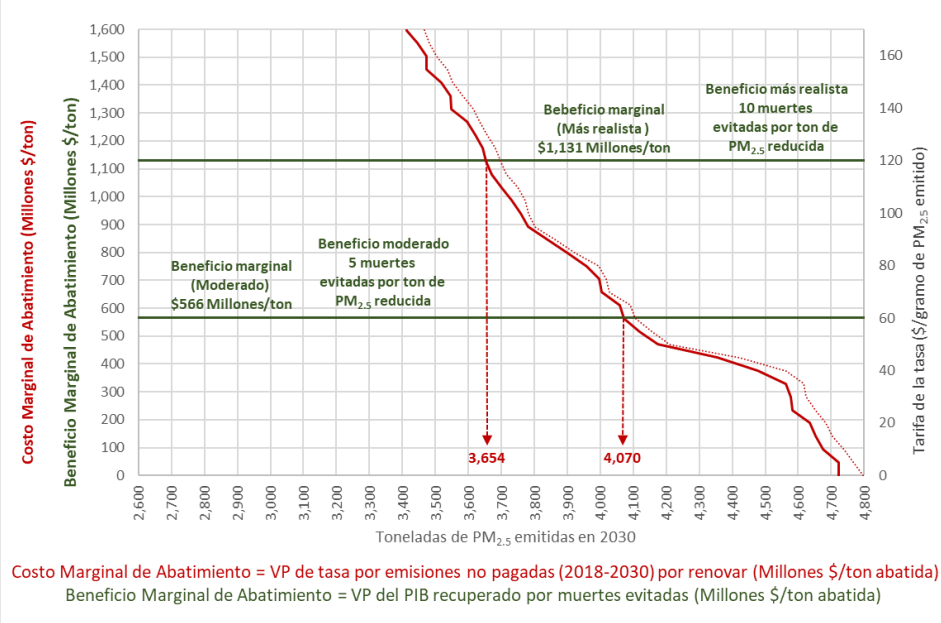
Fuente: Elaborado por Econometría Consultores para este trabajo

Figura A-V 3 - BENEFICIOS Y COSTOS DE REDUCIR EMISIONES CON TASAS A $PM_{2.5}$ DE $60/G Y $120/G, Pagando subsidio del 20% sobre valor del vehículo chatarrizado



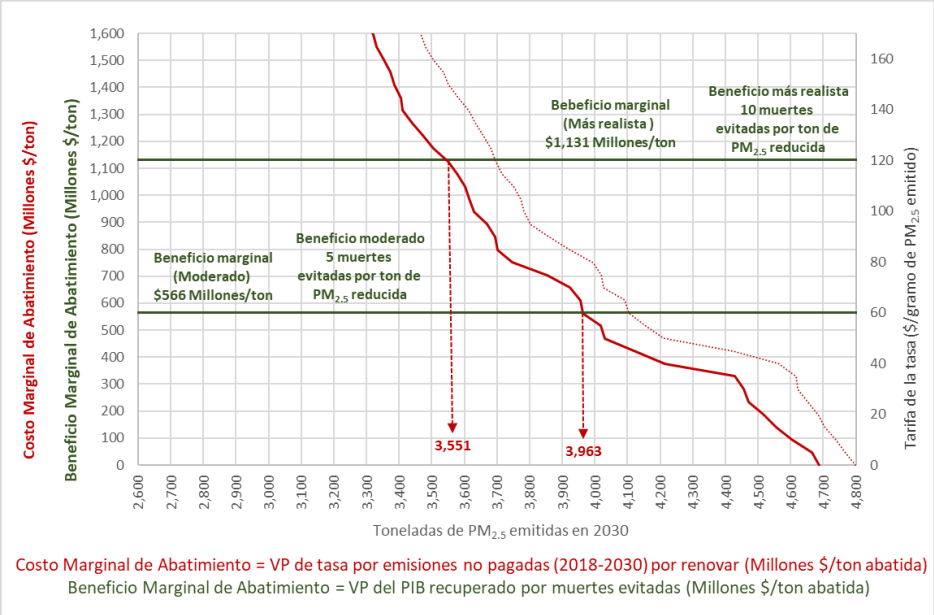
Fuente: Elaborado por Econometría Consultores para este trabajo

Figura A-V 4 - BENEFICIOS Y COSTOS DE REDUCIR EMISIONES CON TASAS A $PM_{2.5}$ DE $60/G Y $120/G, Pagando subsidio del 40% sobre valor del vehículo chatarrizado



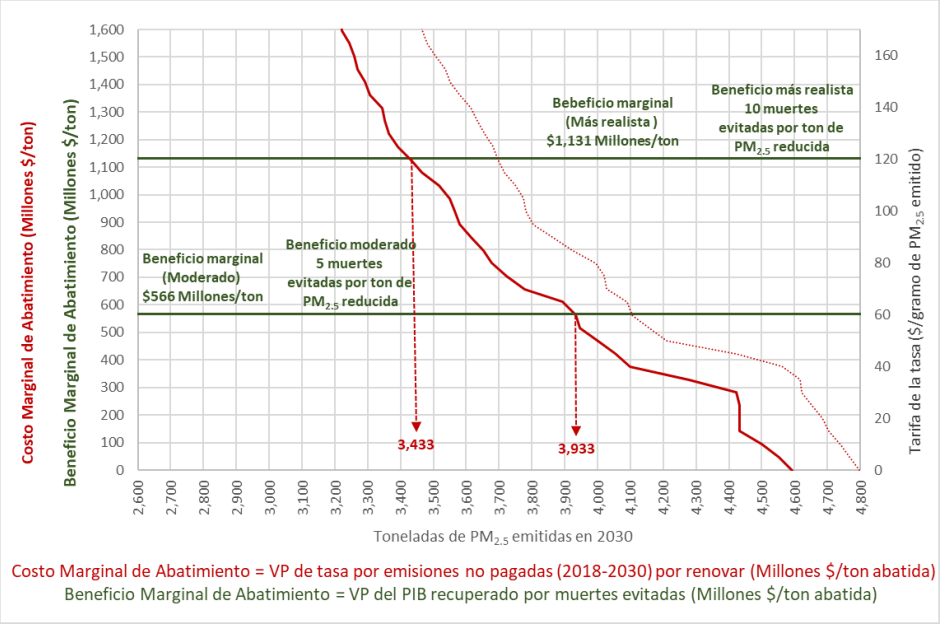
Fuente: Elaborado por Econometría Consultores para este trabajo

Figura A-V 5 - BENEFICIOS Y COSTOS DE REDUCIR EMISIONES CON TASAS A $PM_{2.5}$ DE $60/G Y $120/G, reduciendo al arancel del vehículo nuevo en 10 puntos



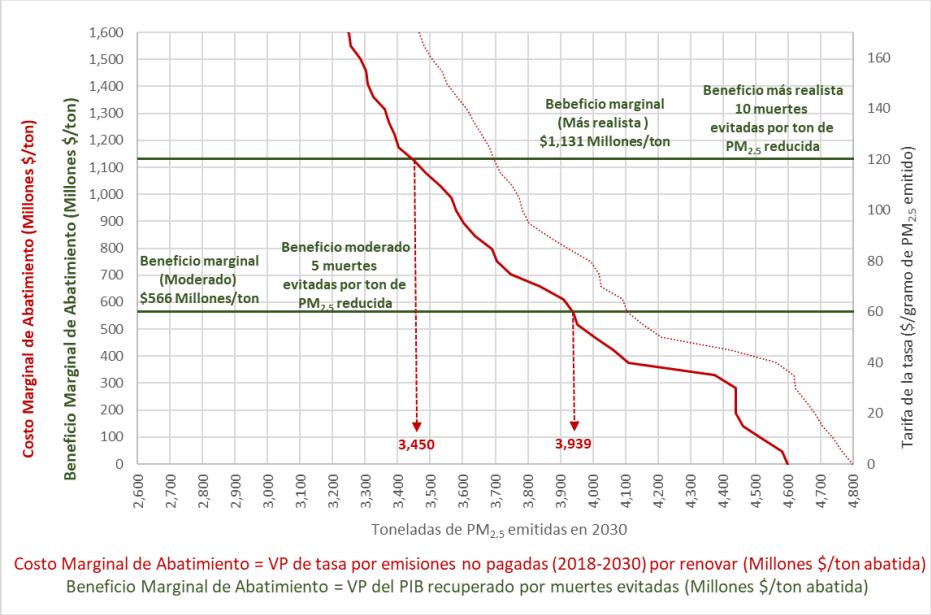
Fuente: Elaborado por Econometría Consultores para este trabajo

Figura A-V 6 - BENEFICIOS Y COSTOS DE REDUCIR EMISIONES CON TASAS A $PM_{2.5}$ DE $60/G Y $120/G, reduciendo al arancel del vehículo nuevo en 15 puntos



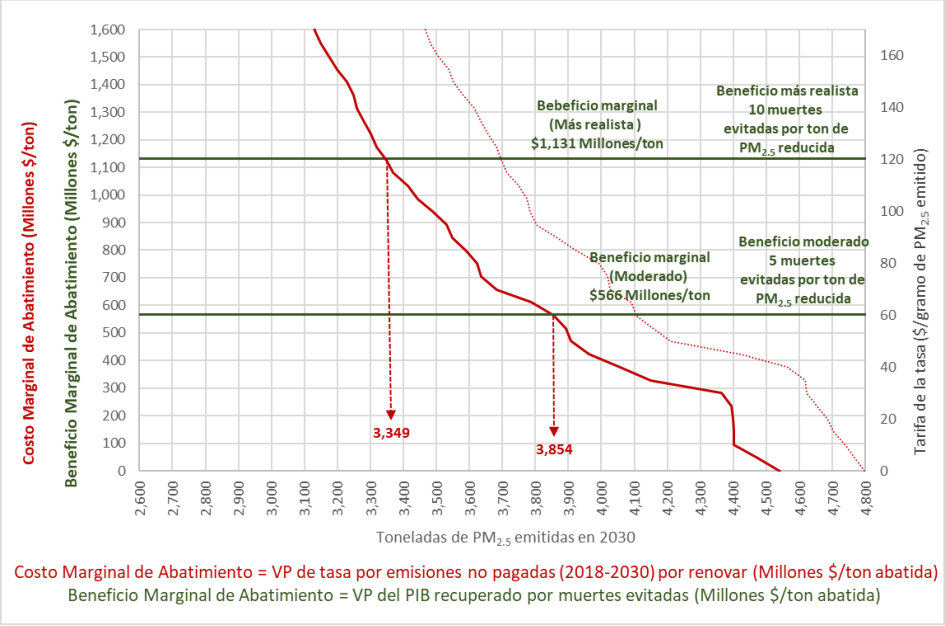
Fuente: Elaborado por Econometría Consultores para este trabajo

Figura A-V 7 - BENEFICIOS Y COSTOS DE REDUCIR EMISIONES CON TASAS A $PM_{2.5}$ DE $60/G Y $120/G, reduciendo el IVA a vehículos nuevos de 19% a 5%



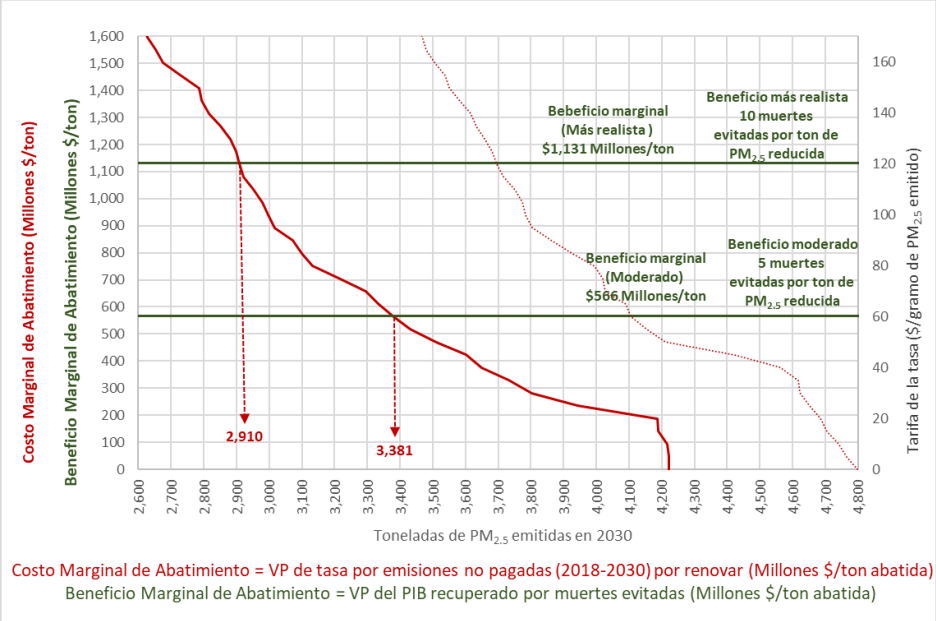
Fuente: Elaborado por Econometría Consultores para este trabajo

Figura A-V 8 - BENEFICIOS Y COSTOS DE REDUCIR EMISIONES CON TASAS A $PM_{2.5}$ DE $60/G Y $120/G, reduciendo el IVA a vehículos nuevos de 19% a 0%



Fuente: Elaborado por Econometría Consultores para este trabajo

Figura A-V 9 - BENEFICIOS Y COSTOS DE REDUCIR EMISIONES CON TASAS A $PM_{2.5}$ DE $60/G Y $120/G, reduciendo a vehículos nuevos el arancel en 15 puntos y el IVA de 19% a 0%



Fuente: Elaborado por Econometría Consultores para este trabajo