



**BID**

Banco Interamericano  
de Desarrollo

# Análisis costo-beneficio de las opciones para alcanzar cero emisiones netas en Colombia

Ricardo Argüello  
Ricardo Delgado  
Mónica Espinosa  
Tomás González  
José Manuel Sandoval

División de Cambio Climático

NOTA TÉCNICA N°  
IDB-TN-02540

Octubre 2022

# Análisis costo-beneficio de las opciones para alcanzar cero emisiones netas en Colombia

Ricardo Argüello  
Ricardo Delgado  
Mónica Espinosa  
Tomás González  
José Manuel Sandoval

Octubre 2022

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

Análisis costo-beneficio de las opciones para alcanzar cero emisiones netas en  
Colombia / Ricardo Argüello, Ricardo Delgado, Mónica Espinosa, Tomás González,  
José Manuel Sandoval.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 2540)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Climatic changes-Cost effectiveness-Colombia. 2. Climate change mitigation-Cost effectiveness-Colombia. 3. Carbon dioxide mitigation-Cost effectiveness-Colombia. I. Argüello, Ricardo. II. Delgado, Ricardo. III. Espinosa Valderrama, Mónica. IV. González, Tomás. V. Sandoval, José. VI. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático. VII. Serie.

Códigos JEL: Q54, Q10, Q20, Q30, Q40, Q50

Palabras clave: Colombia, mitigación, descarbonización, análisis costo-beneficio, cambio climático, estrategia de largo plazo.

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2022 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

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

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

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



# ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO DE LAS OPCIONES PARA ALCANZAR CERO EMISIONES NETAS EN COLOMBIA



Resumen para tomadores de decisiones



## **Nota Técnica**

### **ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO DE LAS OPCIONES PARA ALCANZAR CERO EMISIONES NETAS EN COLOMBIA**

*Resumen para tomadores de decisiones*

#### **Autores:**

ARGÜELLO, Ricardo;  
DELGADO, Ricardo;  
ESPINOSA, Mónica;  
GONZÁLEZ, Tomás;  
SANDOVAL, José Manuel

#### **Agradecimiento**

Los autores agradecen los valiosos comentarios, aportes y revisiones realizadas por Adrien Vogt-Schilb, Valentina Saavedra Gómez y Ricardo Gonçalves de la División del Cambio Climático y Sostenibilidad del BID.

#### **Topics (ENG / ESP / PT):**

Climate Change  
Climate Change Mitigation  
Decarbonization

Cambio climático  
Mitigación del cambio climático  
Descarbonización

Mudanças climáticas  
Mitigação dos gases do efeito estufa  
Descarbonização

## RESUMEN

Este documento presenta un escenario de transformaciones sectoriales que permitiría a Colombia alcanzar la carbono neutralidad en el 2050 y cuantifica los costos asociados y los beneficios económicos derivados de implementar estas transformaciones. Las alternativas presentadas no pretenden ser prescriptivas, reconociendo que existen múltiples opciones disponibles para lograr las metas climáticas definidas por el país. La contribución más relevante de este análisis tiene que ver con estimar el nivel de cambios requeridos y los costos y beneficios asociados.

Se evaluaron los siguientes sectores: agricultura, energía, transporte y gestión de residuos. Se identificó que los primeros tres sectores logran beneficios netos al implementar trayectorias de descarbonización si no solo se contabilizan los costos de implementación sino también los ahorros asociados a, por ejemplo, menores costos operativos, mayor productividad, ahorros en daños a la salud o costos evitados por el cambio climático en la economía. El análisis de costo-beneficio se realizó utilizando tres niveles diferentes de la tasa de descuento, y en todos los casos, la neutralidad de carbono se alcanza con beneficios económicos netos (superando los costos asociados).

**Palabras clave:** AFOLU, beneficios económicos, carbono neutralidad, Colombia, costos, energía, externalidades, mitigación, transporte, residuos.

## ABSTRACT

This document presents a scenario of sectoral transformations that would allow Colombia to achieve carbon neutrality in 2050 and quantifies the associated costs and economic benefits derived from implementing these transformations. The alternatives presented are not intended to be prescriptive, recognizing that there are multiple options available to achieve the climate goals defined by the country. The most relevant contribution of this analysis has to do with estimating the level of changes required and the associated costs and benefits.

The following sectors were assessed: agriculture, energy, transportation, and waste management. It was identified that the first three sectors achieve net benefits by implementing decarbonization trajectories if not only the implementation costs are accounted for but also the savings associated with, for example, lower operating costs, higher productivity, savings in damage to health or avoided costs because of climate change on the economy. The cost-benefit analysis was performed using three different levels of the discount rate, and in all the cases, the carbon neutrality is reached with net economic benefits (exceeding the associated costs).

**Keywords:** AFOLU, economic benefits, carbon neutrality, Colombia, costs, energy, externalities, mitigation, transportation, waste.



# RESULTADOS GENERALES

El análisis reportado en este documento presenta un escenario de transformaciones sectoriales que permitirían al país alcanzar la neutralidad de carbono en el año 2050 y cuantifica tanto los costos asociados como los beneficios económicos derivados de la implementación de esas transformaciones. Las alternativas presentadas no pretenden ser prescriptivas, puesto que existen múltiples opciones disponibles para alcanzar las metas climáticas definidas por el país. El aporte más relevante de este análisis tiene que ver con la estimación del nivel de los cambios requeridos y los costos y beneficios asociados.

Se evaluaron los siguientes sectores: agricultura, energía, transporte y gestión de residuos. Se identificó que los tres primeros sectores logran beneficios netos al implementar las trayectorias de descarbonización si se contabilizan no solamente los costos de implementación sino también los ahorros relacionados con, por ejemplo, menores costos de operación, mayor productividad, ahorros en daños a la salud o costos evitados por los efectos del cambio climático en la economía. Para la estimación de estos últimos, se seleccionaron dos niveles de daño causado por el cambio climático a la economía basados en la literatura, teniendo en cuenta que los autores no conocen una valoración de este impacto calculado localmente para Colombia. El primer nivel es el costo social del carbono en un mundo con insuficiente acción climática que lleva a que, por la mayor acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, el daño por emitir carbono sea más alto (13,7 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub>e) que en el

segundo caso, en el que se supone que, gracias a una acción climática más decidida, los daños causados por el cambio en el clima son menores (3,16 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub>e). Las tasas de descuento utilizadas son: 6,4 %, que es la tasa utilizada para valorar los beneficios de la actualización de la contribución nacionalmente determinada (ndc por sus siglas en inglés) en Colombia (Gobierno de Colombia, 2020); 3,1 %, que corresponde a la tasa propuesta por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) para la valoración de proyectos ambientales (Hernández et al., 2018), y 9,0 %, que es la tasa empleada para valorar proyectos públicos en Colombia calculada, igualmente, por el DNP (Piraquive et al., 2018)<sup>[1]</sup>.

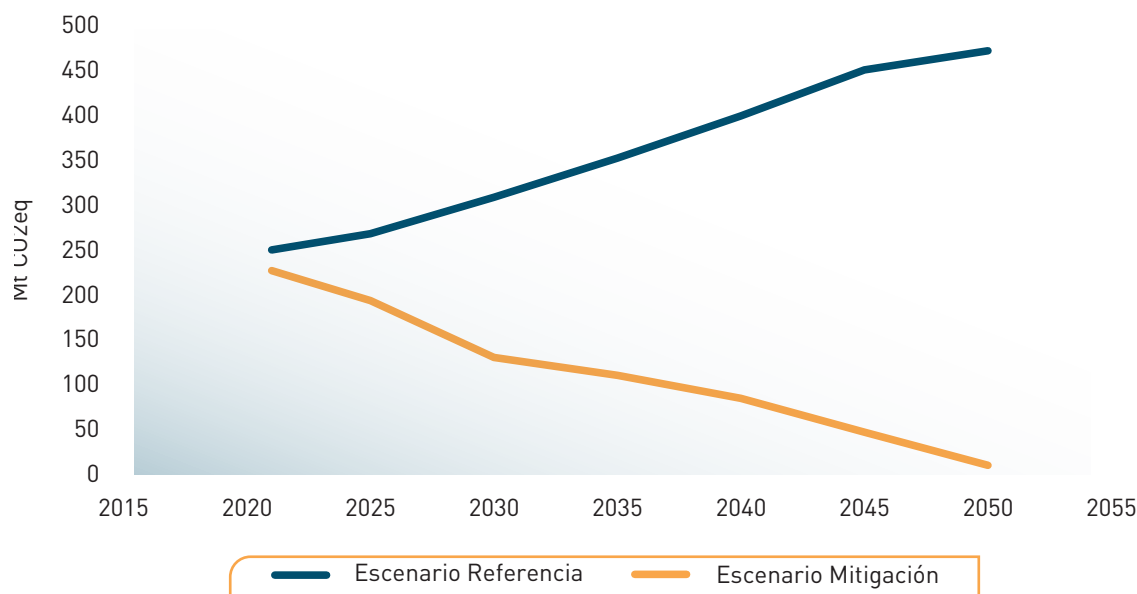
Los resultados del análisis realizado indican que las trayectorias conducentes a la carbono neutralidad sectorial requieren inversiones y costos que son inferiores a los ahorros y beneficios económicos que podrían obtenerse. Esto quiere decir que el desarrollo bajo en carbono para Colombia es deseable desde el punto de vista económico y produce utilidades económicas netas positivas, aunque los costos y los beneficios son asumidos y percibidos por diferentes agentes involucrados.

La figura 1 muestra las trayectorias de emisiones de gei que se generarían en el escenario de referencia (resultado del desarrollo “usual” de la economía) y en el escenario de mitigación generado en este estudio. Allí se aprecia el enorme esfuerzo que es necesario realizar para llegar a la carbono neutralidad en el 2050, lo cual implica cuantiosas inversiones a lo largo del periodo. No obstante la

1 Los documentos citados son: Gobierno de Colombia. (2020). Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC). Hernández, G., Piraquive, G., & Matamoros, M. (2018). Una estimación de la tasa de descuento para proyectos ambientales (Archivos de Economía). Piraquive, G., Matamoros, M., Cespedes, E., & Rodríguez, J. (2018). Actualización de la tasa de rendimiento del capital en Colombia bajo la metodología de Harberger (Archivos de Economía).



**Figura 1.** Emisiones agregadas en los escenarios modelados



magnitud de las mismas, como se observó arriba, el análisis costo-beneficio realizado señala que, en general, el costo incremental asociado a la implementación y operación de las medidas de mitigación es negativo, generando beneficio económico.

La tabla 1 muestra los valores presentes de los flujos de beneficios netos generados por las medidas sectoriales, calculados con las tres tasas de descuento mencionadas. Como se aprecia, las medidas del sector transporte

generan los mayores beneficios, seguidas por las del sector Agricultura, Silvicultura y Otros Usos del Suelo (AFOLU por sus siglas en inglés) y, luego, las de los sectores energía y residuos (las menores dado el tamaño relativo del sector). Los valores son sustanciales, dado que oscilan entre 183 millardos de dólares del 2015 y 747 millardos de 2015. Una perspectiva de su magnitud relativa se presenta en la tabla 2, en la cual estas cifras se representan como porcentaje del pib nacional en el 2019.

**Tabla 1.** Costo incremental incluyendo costo social del carbono (Mitigación – Referencia) en millardos de dólares del 2015

	Costo incremental incluyendo csc (Mitigación – Referencia) Millardos de dólares del 2015		
	Tasa de descuento		
	9,00 %	6,40 %	3,0 %
AFOLU	-34,9	-55,5	-105,1
Energía sin transporte	-16,5	-36,4	-71,0
Transporte	-134,0	-247,0	-574,0
Residuos	2,4	2,8	3,1
<b>Total</b>	<b>-183,0</b>	<b>-336,1</b>	<b>-747,0</b>

Si tomamos como base la tasa de descuento de 6,4 %, los flujos de beneficios ascienden al 77 % del pib del 2019 para el sector transporte, 17 % para el sector afolu, 11 % para el sector energía y 1 % para el sector residuos. Conjuntamente, los

beneficios representan 105 % del pib de dicho año. Calculado como promedio simple, esto equivale a unos beneficios anuales del orden de 3,75 %, siendo este valor cercano en magnitud a la tasa de crecimiento de largo plazo de la economía.

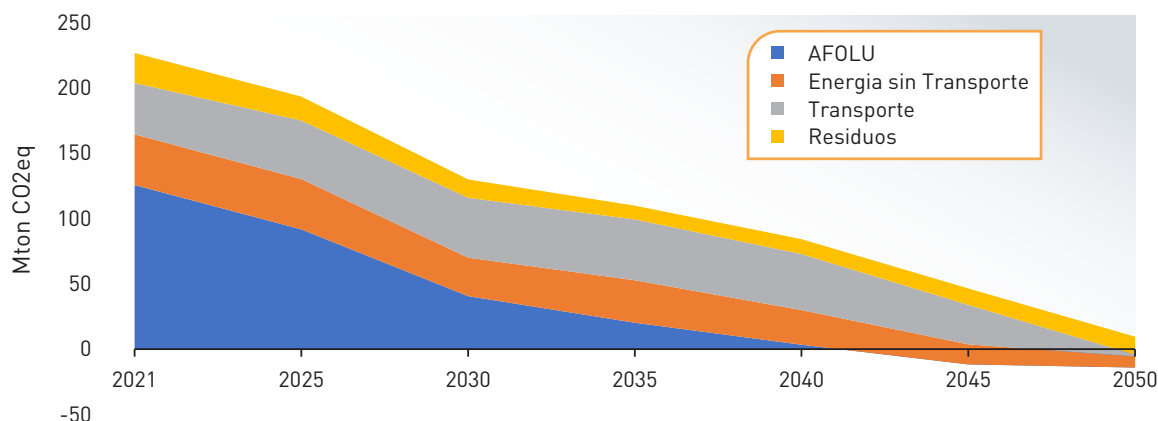
**Tabla 2.** Costo incremental incluyendo costo social del carbono (Mitigación – Referencia) con respecto al PIB colombiano del 2019

Costo incremental incluyendo csc (Mitigación – Referencia) respecto al pib del 2019			
	Tasa de descuento		
	9,00 %	6,40 %	3,10 %
AFOLU	-11 %	-17 %	-33 %
Energía sin transporte	-5 %	-11 %	-22 %
Transporte	-42 %	-77 %	-179 %
Residuos	1 %	1 %	1 %
Total	-57 %	-105 %	-233 %

Desde el punto de vista sectorial, como se ilustra en la figura 2, la trayectoria de emisiones en el escenario de mitigación indica que, con la excepción del sector afolu, ningún sector logrará alcanzar la carbono neutralidad en el 2050. Para el logro de esta meta conjunta se requiere que el

sector afolu genere emisiones negativas a partir del 2041, de manera creciente, de suerte que estas compensen las emisiones residuales de los demás sectores. Por ello, el avance temprano y sostenido de la mitigación en este sector es fundamental para la descarbonización del país.

**Figura 2.** Emisiones de gases de efecto invernadero sectoriales en el escenario de mitigación



## SECTOR AGRÍCOLA Y FORESTAL

Estimando el tamaño de la demanda por productos agrícolas a partir del consumo aparente (producción nacional, más importaciones, menos exportaciones), se calcula que entre el 2020 y el 2050 la demanda doméstica se multiplicará por 1,9. Considerando que parte de ella se satisface con importaciones y que parte de la producción nacional tiene como destino el mercado internacional, se espera que la producción agrícola nacional se incremente 92 % entre estos años, es decir, el equivalente a una tasa anual promedio de crecimiento del 2,3 %.

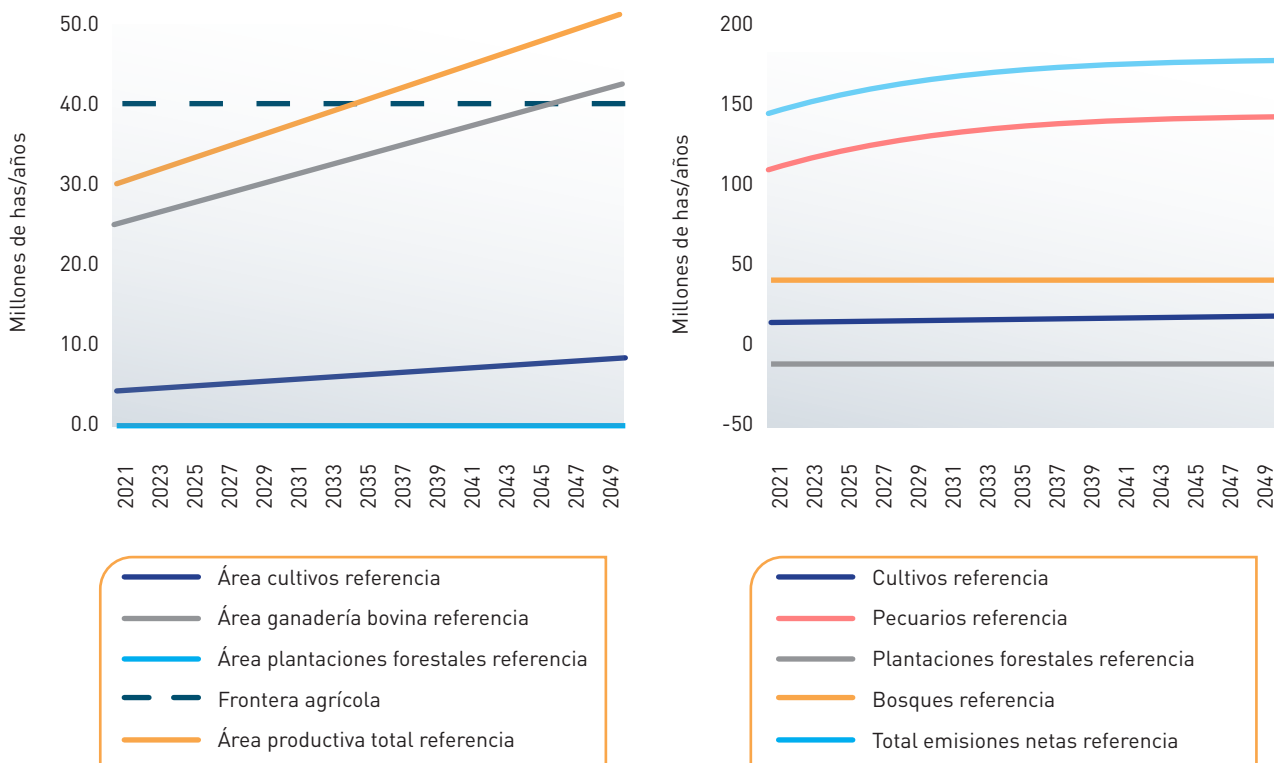
Si la productividad del sector permaneciera constante, la satisfacción de la demanda por producción nacional implicaría un aumento en el uso productivo de la tierra a aproximadamente el doble del área usada en el 2020, llegando a un total de 51,6 millones de hectáreas, de las cuales 43,1 millones se destinarían a la producción pecuaria (esencialmente bovina) y 8,2 millones a todos los cultivos. El país tiene aproximadamente 59,1 millones de hectáreas en bosques y 40 millones de hectáreas en la frontera agrícola (el área identificada por el Estado como disponible para uso productivo agrícola). Por tanto, en las condiciones indicadas, la demanda por producción nacional en el 2050 implicaría usar los 40 millones de hectáreas dentro de la frontera agrícola, más 11,6 millones de hectáreas de bosque deforestado y convertido a uso productivo. Una situación insostenible desde el punto de vista ambiental, climático y de uso del capital natural.

Por otra parte, si se calculan las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del sector

a partir de los valores utilizados en el *Segundo Reporte Bienal de Actualización* del 2018, y en la evolución de la producción que se desprende del anterior análisis, para el 2050 las emisiones aumentarían hasta 179,4 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, aproximadamente, a un 33 % por encima del nivel estimado para el 2015. Dado que la agricultura es uno de los sectores que no cuenta con tecnologías capaces de eliminar las emisiones de GEI, la meta de llegar en el sector a la neutralidad en carbono para el 2050 solo es alcanzable utilizando a plenitud las tecnologías que permiten reducir las emisiones y compensar su remanente con actividades que generan absorciones netas de carbono (control de la deforestación, restauración de bosques y otros sumideros, plantaciones forestales comerciales y fijación de carbono en el suelo).

El panel izquierdo de la figura 1 ilustra el comportamiento proyectado del uso de la tierra, y el derecho, el de las emisiones netas de CO<sub>2eq</sub>. La diferencia entre el valor del área dentro de la frontera agrícola y la demanda total por tierra para usos productivos (la suma de las áreas usadas para cultivos, ganadería bovina y plantaciones forestales) se hace cero aproximadamente en el 2034, con lo cual el desarrollo de las actividades productivas tendría que darse en nuevas zonas deforestadas hasta llegar en el 2050 a los 11,6 millones de hectáreas de deforestación referidos arriba. Por su parte, el panel derecho indica que, incluido el efecto de los cambios en el uso del suelo, la mayor contribución a las emisiones en el sector se origina en la actividad pecuaria (en particular, en la ganadería bovina).

**Figura 1.** Uso del suelo y emisiones netas en el escenario de referencia



Fuente: Cálculos propios del estudio con modelo DDPLAC

## MEDIDAS DE MITIGACIÓN

Las medidas de mitigación consideradas para llegar a la neutralidad en carbono se pueden sintetizar como sigue: (i) intensificación sostenible de los cultivos; (ii) intensificación sostenible de la ganadería bovina; (iii) reforestación comercial; (iv) disminución de la demanda por carne de bovinos y, (v) conservación de bosques.

La intensificación sostenible de los cultivos tiene como objetivos el aumento de la productividad y el uso de tecnologías de producción que reduzcan emisiones. El primero contribuye a disminuir la demanda por tierra para usos productivos, aliviando la presión sobre la frontera

agrícola y sobre el cambio de uso de suelo de las áreas en bosques, haciendo posible, adicionalmente, la destinación de mayores áreas para el desarrollo de proyectos de restauración y de plantaciones forestales comerciales. El segundo favorece la reducción de emisiones de N<sub>2</sub>O (asociadas al uso de fertilizantes) y la fijación de carbono en el suelo, a la par que se incrementa la productividad.

Con la intensificación sostenible de la ganadería se busca aumentar la productividad y disminuir las emisiones. Los medios para lograr estos fines son variados y comprenden la optimización en la intensidad del pastoreo, el uso periódico de legumbres en las pasturas (aumen-

tando la alimentación de los animales y contribuyendo a la fijación de carbono en el suelo), el uso de alimentos más densos en energía (que ayudan a aminorar la fermentación entérica) y el mejoramiento en la administración del pastoreo. Estas prácticas permiten aumentar el número de animales por hectárea y el porcentaje de animales del hato que salen efectivamente al mercado, con lo cual se disminuye el crecimiento en la demanda por tierra para la actividad y el número de cabezas necesario para atender la demanda por leche y carne.

La reforestación comercial tiene como propósito el fomento de esta actividad económica en unas condiciones tales que permitan mantener unos niveles deseados de absorción de carbono en la biomasa, lo cual se logra con el balance entre el uso comercial de la madera (así se impide que los árboles cortados sigan absorbiendo) y nuevas áreas sembradas que compensan la capacidad de absorción perdida.

Disminuir la demanda por carne de bovinos tiene la finalidad de reducir la cantidad de animales requerida para satisfacer la demanda, y se basa en la idea de que es posible fomentar un patrón de consumo más responsable con el cambio climático, sin desmedro de las necesidades nutritivas de la población. Esto puede lograrse con cambios en el comportamiento de consumidores de alto ingreso y, especialmente, en el de las nuevas generaciones que muestran ya una tendencia en este sentido.

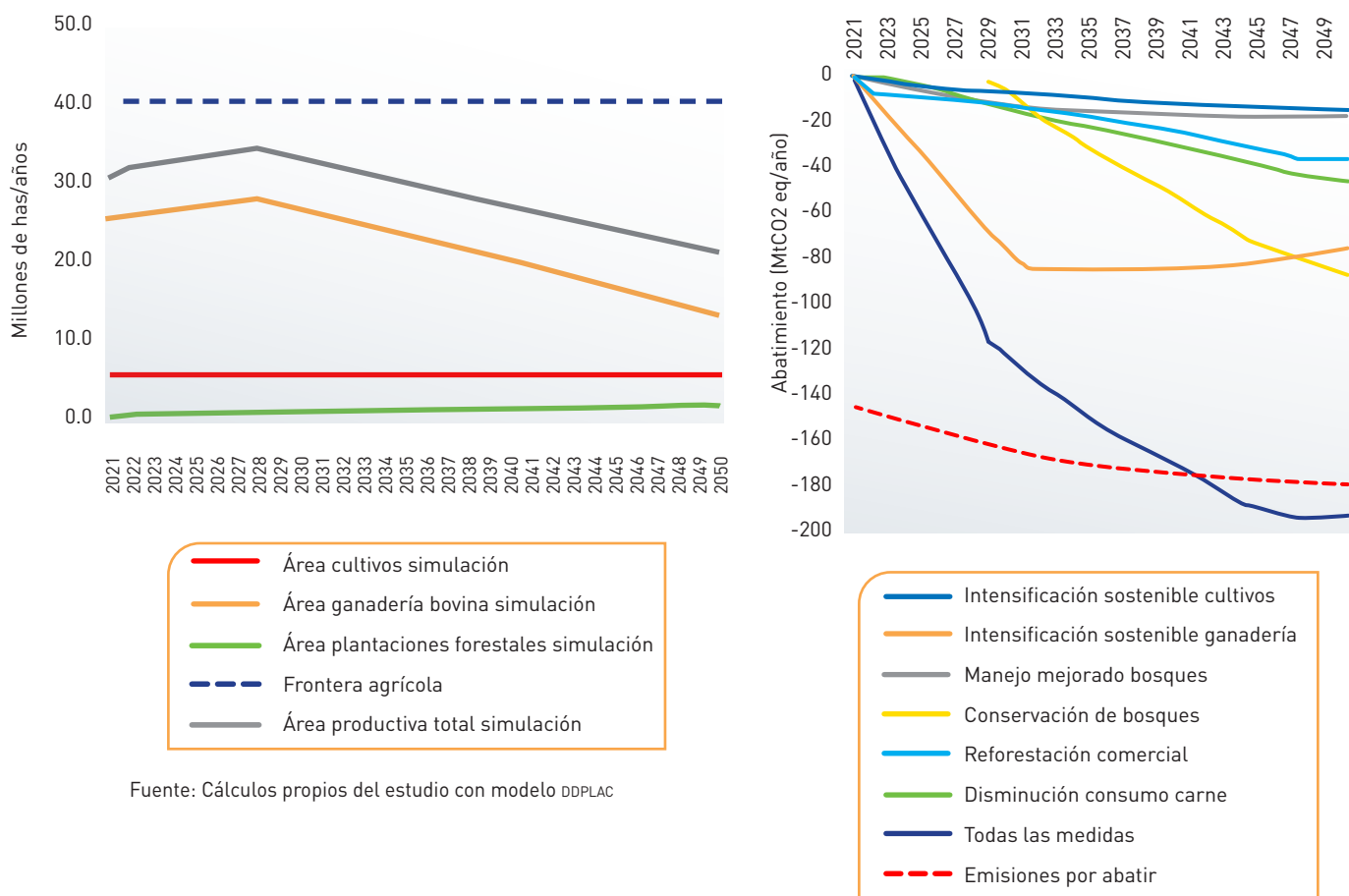
Finalmente, la medida de conservación es un paquete de medidas que comprende el manejo mejorado de los bosques naturales para minimizar la extracción de biomasa, reforestación para conservación y restauración de bosques, estas últimas desarrolladas en las áreas en donde la

intensificación de los cultivos y de la ganadería dejan de demandar para su crecimiento. Lo anterior permitiría, adicionalmente (aunque no es un elemento considerado en este trabajo), plantear una base para el desarrollo de actividades generadoras de ingreso relacionadas con el turismo sostenible, la provisión de insumos para las industrias de la cosmética, la farmacéutica y la de alimentos.

Con estas medidas, aplicadas a la totalidad de las actividades productivas (cultivos y ganadería), a dos millones de hectáreas en plantaciones forestales comerciales, con una reducción equivalente al 14 % en el número de cabezas de ganado como consecuencia de la reducción en el consumo, y con aproximadamente 30 millones de hectáreas (incluyendo la deforestación evitada) asociadas a las medidas de conservación, se alcanzaría la neutralidad en emisiones del sector en el 2041, y a partir de allí se generarían emisiones negativas que aumentan el nivel de absorción neta hasta alcanzar 14,1 millones de toneladas de CO<sub>2eq</sub> en el 2050, las cuales compensarían emisiones remanentes en otros sectores para llegar a la neutralidad en carbono para el país.

La figura 2 muestra en el panel izquierdo el comportamiento de uso del suelo asociado a las medidas discutidas, en tanto que en el panel derecho presenta el comportamiento de las emisiones netas por subsector. Como se aprecia en el panel izquierdo, el área total utilizada en actividades productivas ascendería a 21 millones de hectáreas, lo que dejaría al interior de la frontera agrícola un remanente de 19 millones de hectáreas en las cuales se pueden desarrollar las actividades de conservación. Por su parte, el panel derecho muestra la importante contribución que hacen a la mitigación la intensificación sostenible de la ganadería bovina y la conservación de bosques.

**Figura 2.** Uso del suelo y emisiones netas en el escenario de mitigación



Fuente: Cálculos propios del estudio con modelo DDPLAC

## VALORACIÓN DE LAS MEDIDAS

Para la valoración de las medidas se asume, como regla general, que los beneficios están dados por los siguientes componentes: (i) la valoración de las emisiones evitadas, calculadas como la diferencia entre las emisiones del escenario de referencia y las del escenario de mitigación, usando como precio el costo social del carbono, y (ii) la diferencia en costos de producción entre el escenario de referencia y el de mitigación para el total de la actividad considerada. Para algunos casos —notablemente el de las plantaciones forestales—, se tomó en cuenta también la diferencia en los ingresos generados por la actividad con

y sin medidas de mitigación, para la valoración de los beneficios. El análisis costo-beneficio de las medidas de mitigación produce valores positivos, utilizando diferentes tasas de descuento, lo cual indica la conveniencia económica de estas. Los análisis se realizaron utilizando distintas tasas de descuento: 3,1 %, 6,4 % y 9,0 %.

Si se toma como referencia la tasa de 6,4 %, se tiene que las medidas de conservación generan un valor presente neto positivo de 19 600 millones de dólares del 2015; las medidas de intensificación sostenible de los cultivos, uno de 9400 millones; las de intensificación sostenible de la ganadería, 16 900 millones; las plantacio-

nes forestales, 8500 millones, y la reducción en el consumo de carne, 1000 millones. En conjunto, las medidas del sector denominado AFOLU, generan un valor presente neto de 55 400 millones de dólares del 2015.

En todos los casos, con la excepción de la intensificación de los cultivos, el beneficio privado neto de las medidas es positivo. Del mismo modo, en todas las medidas hay un beneficio social derivado de la mitigación. Por lo tanto, la implementación de las medidas da lugar a un doble dividendo: ganancias económicas directamente apropiables a nivel privado y ganancias sociales derivadas de la valoración de la mitigación. En la medida en que el resultado del esfuerzo de mitigación puede ser monetizado y al menos parcialmente apropiado a nivel privado (por ejemplo, mediante la operación de un mercado de carbono), todas las medidas tendrían incentivos compatibles a nivel privado.

No obstante, es importante resaltar que para casi todas las medidas, los mayores beneficios se realizan lentamente en el tiempo, mientras que los costos de inversión deben asumirse en un periodo corto. Por ende, se suscita una situación financiera desfavorable que requiere la provisión de mecanismos que hagan viable el desarrollo de los proyectos necesarios para implementar las medidas.

## MENSAJES CLAVE

Los principales resultados del estudio pueden resumirse como sigue:

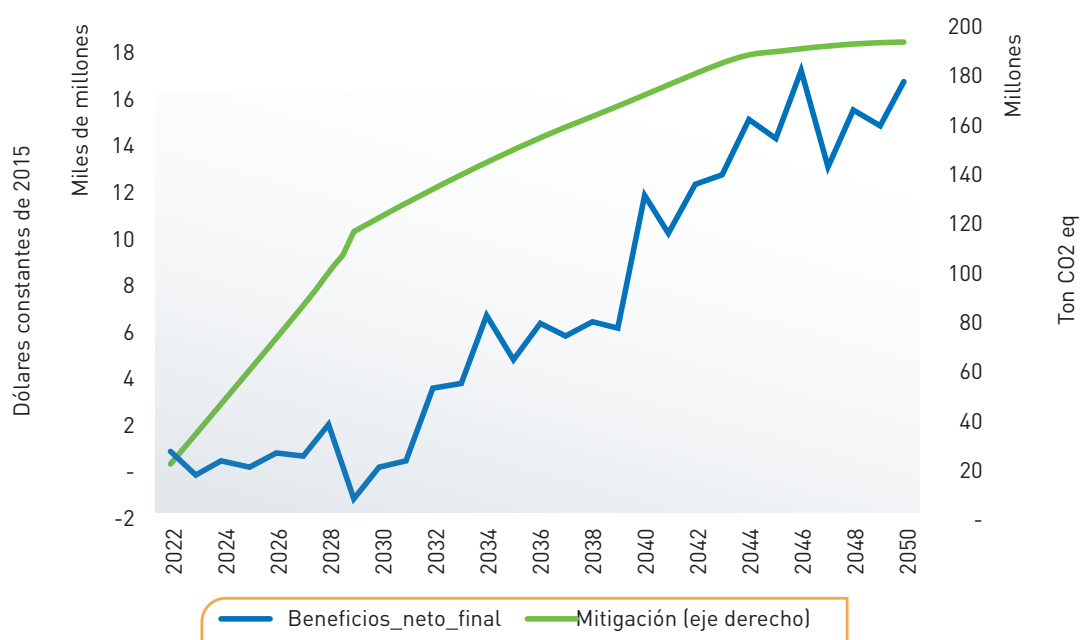
- i) Desde el punto de vista técnico, las tecnologías disponibles para el sector hacen viable su descarbonización al 2050.
- ii) Aunque las medidas varían en cuanto a su capacidad de mitigación, no hay una sola medida que pueda conducir al sector a la

descarbonización total. Se requiere del concurso integrado de todas las medidas consideradas para lograr este propósito.

- iii) La intensificación sostenible de los cultivos y de la ganadería tiene sentido en sí misma como tecnología de mitigación, pero, adicionalmente, es indispensable para hacer viable el uso de tecnologías de emisiones negativas (reforestación, plantaciones comerciales y restauración) al crear un balance de uso del suelo favorable para estas.
- iv) La descarbonización del sector implica un gran esfuerzo en todo sentido y requiere el avance temprano de las acciones necesarias. Las tecnologías disponibles permiten llegar a la descarbonización, pero su adopción demanda tiempo. La agricultura es específica al sitio, lo que significa que las tecnologías deben ser adaptadas y luego adoptadas. La experiencia internacional muestra que la tasa de adopción de estas tecnologías ha sido muy lenta, y no hay razón para esperar que el ritmo de adopción en Colombia sea particularmente alto.
- v) Existen incentivos económicos positivos para la implementación de las medidas, tanto cuando se valoran desde el punto de vista social como desde el privado.
- vi) La mayor parte de medidas generan periodos relativamente prolongados de flujos negativos de fondos, lo que supone un reto importante para su implementación. Además, algunas de las inversiones son cuantiosas, considerando el perfil de los usuarios, lo que hace necesario tomar medidas apropiadas para impedir que se conviertan en barreras infranqueables a la entrada para grupos de estos (lo cual generaría inequidad).

La figura 3 y la tabla 1 presentan el resumen de los flujos económicos netos y la mitigación alcanzada por la implementación de las diferentes medidas evaluadas en el sector AFOLU.

**Figura 3.** Flujos de beneficios netos y mitigación de emisiones de las medidas de mitigación (2022-2050)



Fuente: Modelo de simulación para DDPLAC2

**Tabla 1.** Flujos de costos y de beneficios y nivel de abatimiento de emisiones alcanzado en el portafolio de mitigación evaluado

Años	2022	2030	2040	2050
Costo referencia (millardos de dólares)	27,54	20,19	27,20	28,31
Costo medidas (millardos de dólares)	28,37	23,74	25,03	23,02
Ingreso referencia (millardos de dólares)	0,06	0,23	0,46	0,25
Ingreso medidas (millardos de dólares)	0,14	1,94	7,87	9,20
Beneficio referencia (millardos de dólares)	0,06	0,22	0,44	0,24
Beneficio medidas (millardos de dólares)	0,11	-0,88	4,98	8,21
Beneficio social (millardos de dólares)	1,63	2,13	2,39	2,50
Beneficio neto medidas (millardos de dólares)	0,86	0,29	11,98	16,74
Mitigación (toneladas de CO <sub>2eq</sub> )	22,18	124,11	172,23	193,52

Fuente: Elaboración propia



# SECTOR ENERGÉTICO

El sector energía incluye desde la producción de energía primaria, pasando por la transformación y el consumo final de todos los sectores, exceptuando el sector transporte, el cual se analizó como un sector separado.

Las demandas de energía se estimaron usando *drivers* de crecimiento que, en la medida de lo posible, son consistentes con los utilizados en la actualización de la NDC. Los *drivers* principales son el crecimiento de la población, y del PIB agregado y sectorial. El modelo empleado minimiza el costo total de atender las demandas útiles de energía considerando restricciones técnicas, ambientales y de política. Por ende, pese a que las demandas por ser satisfechas son las mismas en todos los escenarios modelados, los consumos de combustibles varían según las restricciones y requerimientos de cada uno.

Se modelaron demandas de energía útil para los siguientes sectores: residencial urbano y rural; comercial; industrial diferenciado en seis sectores; agricultura, minería y otros consumos. Del mismo modo, se modelaron las refinerías y plantas de generación eléctrica, y las demandas de los energéticos producidos en estos centros se calcularon endógenamente, así que cambios en las tecnologías de demanda final se ven reflejados en cambios en las tecnologías y demandas de los centros de transformación.

## MEDIDAS DE MITIGACIÓN

Durante el proceso de modelamiento se identificó que, en un escenario construido bajo la lógica de minimización de costos del sistema

energético, se lograría una mayor reducción de emisiones a un menor costo que en el escenario de referencia de la actualización de la NDC colombiana. En otras palabras, seguir la senda de emisiones del escenario de referencia actualizada no es una solución de mínimo costo. Este resultado refleja el hecho de que las mejoras en eficiencia energética, la electrificación de algunos usos finales y la reducción de los costos de inversión de algunas tecnologías que aún se encuentran en desarrollo (como las tecnologías de generación eléctrica con fuentes renovables, de producción de hidrógeno y de almacenamiento de electricidad) pueden llevar a ahorros económicos al tiempo que generan menores emisiones con respecto a las tecnologías usadas en la actualidad. Con esto en mente, se construyeron tres escenarios diferentes:

1. *Escenario de referencia*: este escenario se usa para facilitar la comparación con el escenario de referencia de la NDC. Es importante resaltar que el nivel de emisiones alcanzado en un escenario de minimización de costos al 2050 resulta inferior al escenario de referencia de la NDC. Por este motivo, se impuso una restricción para “forzar” al modelo a emitir mínimo lo emitido en la aproximación al escenario de referencia de la NDC.
2. *Escenario de mínimo costo*: este escenario no considera ninguna restricción a las emisiones. La selección tecnológica y de combustibles se hace basado únicamente en el criterio de minimización de costos, y toma en cuenta las posibilidades de evolución tecnológica en el tiempo.

3. *Escenario de mitigación*: se definió un nivel máximo de emisiones en una senda que parte del nivel del 2015 y llega a 8,5 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e, equivalente a una descarbonización de más del 90 %, lo cual es consistente con los escenarios modelados en el marco de la formulación de la estrategia colombiana de largo plazo E2050.

Contrario a lo que se presenta para los otros sectores, en el sector energía no se modelaron medidas individuales de mitigación, sino que construyeron canastas tecnológicas y energéticas de mínimo costo compatibles con las restricciones de emisión de cada escenario. La selección de las tecnologías y la configuración de la canasta energética son el equivalente a las medidas de mitigación sectoriales y se identifican durante el proceso de optimización que realiza el modelo.

## VALORACIÓN DE LAS MEDIDAS

El proceso de estimación de costos y beneficios se llevó a cabo en dos etapas. En la primera de ellas, se estimaron los costos totales del sistema energético para cada uno de los escenarios. Las diferencias entre estos costos se pueden entender como requerimientos adicionales o evitados de gastos e inversiones, según sea el caso. El costo total del sistema es el valor presente, descontado a la tasa correspondiente, de los flujos anuales. Estos flujos anuales son la suma de los siguientes rubros: (i) costos de capital; (ii) costos fijos y variables de operación y mantenimiento de cada una de las tecnologías instaladas y en operación; (iii) costos de producción de recursos, y (iv) costos de importación o ingresos por exportación de energía.

La segunda etapa en la estimación de costos y beneficios corresponde a la valoración del daño causado por la emisión de GEI. Para este análisis, se rastreó el nivel de emisiones de cada escenario y se ponderó el daño causado utilizando un valor para el costo social del carbono. En cada periodo se totalizó el costo del daño causado por la emisión de GEI con un costo social del carbono alto para los escenarios de baja ambición climática (Referencia y Mínimo costo) y bajo para el escenario de Mitigación. Estos costos anuales se trajeron a valor presente utilizando la tasa de descuento correspondiente.

Los costos evitados (que equivalen a ahorros, dado que en todo caso hay que atender la demanda de energía) varían de entre 0,15 millardos de dólares constantes del 2015 (escenario de Mitigación frente a escenario Mínimo costo con tasa de descuento del 9,0 %), hasta 46,9 millardos de dólares (escenario Mitigación frente a escenario de Referencia con tasa de descuento del 3,1 %). La mitigación total alcanzada en el escenario de Mitigación frente a los otros dos escenarios está entre 1042 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e y 2210 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e, con lo que se tiene un costo medio de mitigación, dependiente de la tasa de descuento seleccionada, de entre -0,1 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub>e hasta -21,2 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub>e. Estos valores representan los ahorros medios que tendría el sistema energético por la mitigación de cada tonelada de CO<sub>2</sub>e. Sin embargo, es importante revisar la estructura de costos para identificar las posibles barreras que pueden hacer que estos ahorros en costos y en emisiones se den: la mitigación requiere mayores costos de inversión al inicio de los proyectos y genera ahorros durante la operación de estos. Otro punto para tener en cuenta es que, si bien el costo medio<sup>2</sup> de mitigación es negativo, el costo

2 El cálculo no incluye las barreras adicionales y los costos para superarlas. Por ejemplo: barreras financieras al requerir altos costos de inversión y recibir retornos a lo largo del proyecto, costos de adopción y difusión de nuevas tecnologías, barreras culturales y los costos para superarlas mediante campañas de educación o publicitarias, entre otros.

marginal de mitigación supera los varios cientos de dólares por tonelada de CO<sub>2</sub>e. Este hecho es importante porque los pagadores (de las inversiones) y los beneficiarios de los ahorros no necesariamente son los mismos. En su conjunto, la sociedad percibe beneficios netos por la mitigación, pero dentro de ella hay unos agentes que podrían enfrentar costos muy altos y otros percibir ahorros muy grandes. Esta situación debe ser abordada para posibilitar la implementación real del resultado de modelación.

La estimación de ahorros por los daños evitados al disminuir la emisión de GEI, cuantificados utilizando el costo social del carbono, muestra que en todos los casos la disminución de emisiones implica un ahorro cuando se toma el escenario de mitigación en lugar de un escenario intensivo en emisiones. Estos costos evitados hacen que en el escenario de mitigación se alcancen niveles de ahorro totales de entre 6100 millones de dólares y hasta 71 000 millones de dólares, dependiendo de la tasa de descuento utilizada y el escenario de comparación seleccionado.

## MENSAJES CLAVE

- i) Los costos estimados muestran que hay beneficios económicos netos derivados del desarrollo de un sector energético bajo en carbono. El modelo indica que se pueden sostener las exportaciones de energía, sujetas a la disponibilidad de reservas y a la competitividad de los recursos en los mercados internacionales, y realizar las transformaciones de la demanda y de la oferta interna de combustibles y electricidad. Sin embargo, esas exportaciones están sujetas a los comportamientos exógenos de demanda internacional y de precios a los que se comercian esos energéticos, siendo posible
- ii) La trayectoria de desarrollo bajo en carbono requiere mayores niveles de inversión inicial y ofrece retornos en forma de menores costos operativos y de comercio internacional de energía a lo largo de varios años (siendo que la inversión debe realizarse antes en el tiempo). Otro punto importante es que, a pesar de que el costo medio de mitigación es negativo (en promedio se ahorra dinero por cada tonelada mitigada), el costo marginal de mitigación supera en algunos casos los 400 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub>e. Esto sucede porque mientras hay actividades del sector energético que pueden mitigar a bajo costo o incluso ahorrar dinero, hay otros sectores en los que la transformación es técnicamente más difícil. En este estudio se identificó que la industria es el sector de más difícil descarbonización, particularmente por sus requerimientos de calor directo. Esta disparidad entre agentes con ahorros por mitigación o que deben incurrir en costos mayores necesita atención para lograr una distribución, entre la sociedad, de los costos y de los beneficios de la mitigación.
- iii) En los diferentes escenarios evaluados el uso de combustibles fósiles tiene un comportamiento diferenciado en el tiempo. En primer lugar, está el carbón mineral que es el energético que reduce su consumo interno rápidamente conforme se sigue una senda de desarrollo bajo en carbono. Incluso en un escenario sin restricción de emisiones, la evolución de los costos de

que algunas reservas de hidrocarburos nacionales pierdan competitividad en el futuro (por bajos precios internacionales derivados de menores demandas si el mundo avanza hacia la reducción de emisiones) y no lleguen a ser extraídas.

las tecnologías renovables hace que la generación a carbón disminuya, aunque su bajo costo le hace permanecer como energético en el sector industrial.

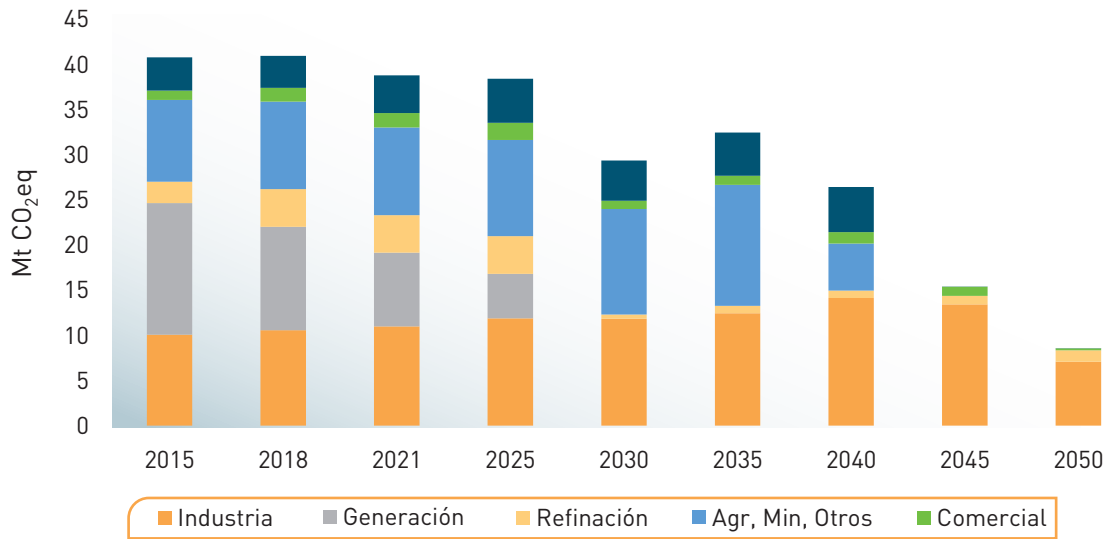
iv) El gas natural, por su parte, permanece como energético hasta el final del horizonte de estudio en todos los escenarios modelados. Su uso, sin embargo, varía de acuerdo con el escenario, siendo que en aquellos en los que no hay restricción de emisiones se alcanza una estabilización del consumo de ese combustible hacia el 2050, mientras que en el escenario de carbono neutralidad se alcanza el pico de consumo hacia el 2035 y luego una reducción en la utilización del gas natural.

v) Finalmente, el petróleo y sus derivados. Estos energéticos se exploran con mayor detalle en la siguiente sección, que evalúa la canasta energética y las emisiones en el sector transporte. Desde el punto de vista agregado del sector energético, las reservas de petróleo se extraen por completo en todos los escenarios evaluados, y la disminución del consumo interno se ve compensada con aumentos de las exportaciones. Es importante resaltar que estas exportaciones se dan bajo un escenario de precios internacionales que las hacen rentables. Sin embargo, esos precios internacionales están fuera del control del país y podrían, eventualmente, llevar a situaciones en las que esas exportaciones pierdan competitividad y no se realicen. Colombia debe tener en consideración que en escenarios de acción climática global la demanda por combustibles fósiles disminuirá y, por lo tanto, un escenario plausible es el de no lograr la extracción del potencial total de reservas o que algunas de ellas pierdan su viabilidad económica.

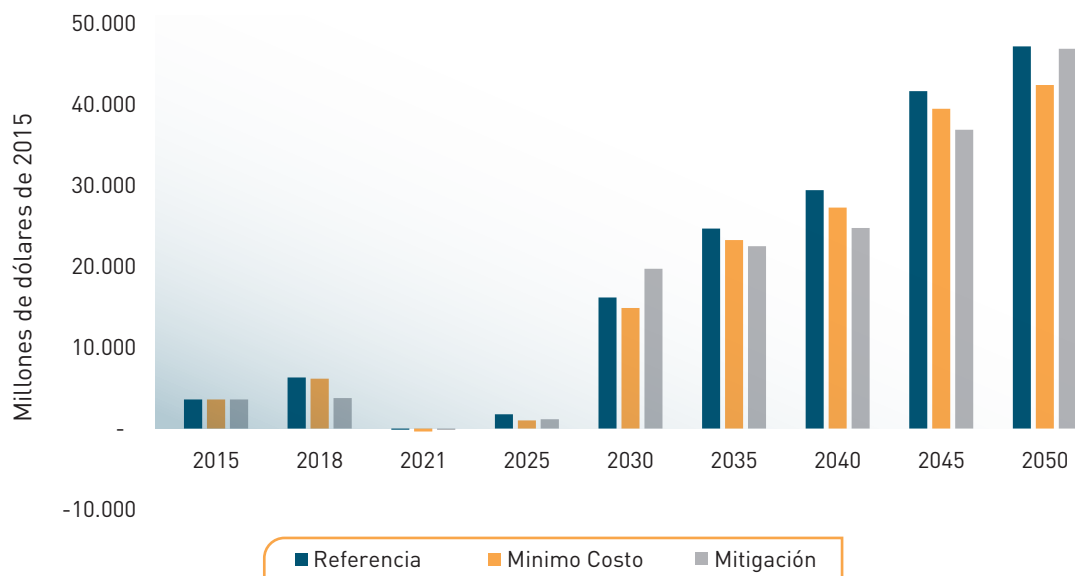
vi) El hecho de que se esté asumiendo que las reservas (de petróleo y carbón) pueden ser extraídas para consumo interno y para exportación posibilita que las actividades mineras sean compatibles con el escenario de descarbonización. Los cambios grandes están dados a nivel de procesos de transformación (cambios en la refinación, en la generación eléctrica y en la producción de hidrógeno) y en los sectores de consumo final. Los resultados muestran que, frente a cambios en los consumos internos de combustibles fósiles, tanto el carbón como el petróleo dependerían de las dinámicas de los mercados internacionales para mantener los niveles de actividad. El gas natural es distinto, y su crecimiento depende de los cambios en el consumo interno, y encuentra un nicho en la industria y en el transporte pesado de larga distancia, hasta que las nuevas tecnologías y la restricción de emisiones logran desplazarlo hacia el final del horizonte.

La figura 4 presenta la composición de emisiones por quema de combustibles a nivel sectorial en el escenario de mitigación. La figura 5, los costos anuales, que son la sumatoria descontada de los costos de capital, de los costos fijos y variables de operación y de los costos/ingresos de comercio internacional de energía. Los costos presentados se obtuvieron al correr el modelo con una tasa de descuento del 9,0 %. Con tasas diferentes, la solución del problema de minimización es distinta y los costos tienen variaciones en los periodos que serán resumidos más adelante en la tabla 2; allí se sintetizan los costos incrementales de los diferentes escenarios evaluados (los valores negativos indican ahorros netos).

**Figura 4.** Trayectorias de emisiones por quema de combustibles discriminadas por sector en el sector energético sin incluir transporte. Escenario Mitigación (2015-2050)



**Figura 5.** Costos anuales totales para diferentes escenarios de emisión con una tasa de descuento del 9,0 %.



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2.** Resumen costos incrementales del sistema energético, estimación del costo social del carbono (csc) y costos-beneficios netos del sistema incluyendo el csc

	Segmento	Sector energía (sin transporte)		
		Tasa de descuento	9,0 %	6,4 %
Costo incremental sistema energético (Mitigación – Referencia)	Millardos de dólares	-8,8	-23,9	-46,9
Costo incremental sistema energético (Mitigación – Mínimo costo)	Millardos de dólares	-0,15	-2,63	-15,6
Diferencia Costo Social del Carbono (Mitigación – Referencia)	Millardos de dólares	-7,6	-12,4	-24,0
Diferencia Costo social del carbono (Mitigación – Mínimo costo)	Millardos de dólares	-6,0	-8,3	-7,6
Costos/beneficios netos incluyendo CSC (Mitigación – Referencia)	Millardos de dólares	-16,5	-36,4	-71,0
Costos/beneficios netos incluyendo CSC (Mitigación – Mínimo costo)	Millardos de dólares	-6,1	-10,9	-23,2

Fuente: Elaboración propia

## SECTOR TRANSPORTE

En el sector transporte se proyecta un crecimiento entre los años 2015 y 2050 de la demanda de pasajeros del 3,39 % anual equivalente y del 3,44 % en carga.

En el escenario de línea base, la participación prioritaria del segmento carretero, sumado a la matriz energética basada en combustibles fósiles, se refleja en una alta contribución en las emisiones GEI. En pasajeros, el segmento carretero representa entre el 83 % y el 87 % de las emisiones GEI en el periodo 2015-2050, seguido por la aviación nacional (entre el 13 % y el 17 %), y en último lugar la navegación y el transporte férreo (4 %). De manera similar, en el transporte de carga las emisiones son aportadas principalmente por el segmento carretero (entre el 91,7 % y el 93,4 %), seguido por aviación (entre el 2,2 % y el 38 %), navegación (entre el 2,6 % y el 2,5 %) y tren (entre el 0,7 % y el 2,0 %). Debido a la configuración de los segmentos, modos y canasta energética, la demanda de transporte, el consumo de energía y las emisiones GEI crecen de manera acoplada en el escenario de línea base.

### MEDIDAS DE MITIGACIÓN

El análisis de mitigación consistió en el diseño de un escenario que permitiera cubrir la demanda de carga y pasajeros con la menor cantidad de emisiones GEI, buscando la descarbonización del sector hacia el año 2050. De acuerdo con los resultados, la multimodalidad es fundamental para aumentar la eficiencia del transporte, reconociendo que diferentes alternativas tienen cabida en un escenario de des-

carbonización porque pueden actuar de manera complementaria (por ejemplo, tren-río-carretera en carga interurbana y metro-caminata o bus-bicicleta-caminata en transporte urbano de pasajeros). El segundo factor para reducir las emisiones GEI es aprovechar las ventajas que presentan las tecnologías nuevas y los energéticos de bajas emisiones, para cumplir con los requerimientos para los diferentes usuarios del transporte en aspectos como autonomía y nivel de actividad.

En transporte urbano de pasajeros, se evaluó el incremento de viajes en caminata y bicicleta, manteniendo el transporte público como el principal modo en los centros urbanos, pero combinando buses con otras tecnologías para transporte colectivo y masivo, como trenes urbanos, metros, tranvías y cables. En transporte interurbano de pasajeros, se analizó una combinación entre viajes en avión, trenes, navegación y modos carreteros. En este caso, se tuvo en cuenta el resultado de estudios previos a nivel nacional, que indican que es posible aumentar la participación de navegación y trenes, y, además, que estos se caracterizan por una menor intensidad de carbono para viajes cortos interurbanos respecto a otros modos como la aviación. De esta manera, se configuró un escenario "ideal" para minimizar emisiones GEI. En el 2050, el 40 % de la demanda de transporte de pasajeros se cubre con trenes (urbanos e interurbanos), cables y metros, seguido por buses (20 %); vehículos livianos (20 %); caminata y bicicleta (15 %), y la proporción restante entre aviación y navegación. En transporte de carga, los trenes cubren el 42 % de la demanda, seguido por camiones (25 %), vehículos livianos (18 %), navegación

(15 %) y aviación nacional para el resto. Se consideraron los tiempos de entrada para las nuevas tecnologías según la literatura internacional, y se tuvo en cuenta un cambio gradual desde el 2026 hasta el 2050. En la modelación no se incorporaron posibles tiempos adicionales necesarios para el alistamiento de las nuevas tecnologías en el país.

El escenario de mitigación implica cambios drásticos en la canasta energética. En el 2050, la electricidad se vuelve la fuente dominante, representando el 62 % de la canasta en transporte de pasajeros y el 84 % de la de carga. En el segmento de pasajeros le siguen los biocombustibles avanzados (18 %), el hidrógeno (16 %) y los fósiles (2 %), mientras que en el de carga le siguen el hidrógeno (9,3 %), los biocombustibles avanzados (5,3 %) y los fósiles (2 %).

## VALORACIÓN DE LAS MEDIDAS

En términos de costos, el escenario de mitigación resulta muy favorable. Los ahorros en consumo de energía derivados de contar con sistemas de transporte mucho más eficientes son la principal ventaja, y éstos superan las mayores inversiones que representan algunas de las nuevas tecnologías. Dado que el transporte se ha caracterizado por ser el principal sector consumidor de energía en el país, esto tendría implicaciones en todo el sistema energético nacional. La demanda energética del transporte en el escenario de mitigación es el 40 % de la demanda estimada en el escenario de línea base.

El escenario de mitigación genera ahorros entre 133 500 y 573 600 millones de dólares en el periodo 2020-2050 según la tasa de descuento que se utilice para la evaluación (3,1 % - 9,0 %). Estos ahorros se refieren a costos de inversión, operación y mantenimiento de las nuevas tecnologías más el consumo de energía.

El portafolio de mitigación en transporte permite una reducción de 894 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e en todo el periodo de análisis, lo que equivale a mitigar el 40 % de las emisiones proyectadas en la línea base y el 99 % de las emisiones del año 2050.

Además de la reducción de emisiones GEI, el escenario de mitigación genera por cobeneficios entre 58 300 y 69 300 millones de dólares al 2050. Los beneficios en salud por aumentar la actividad física (caminata y bicicleta) representan el 45 % de los cobeneficios, la reducción de la congestión el 39 %, la disminución de la accidentalidad aporta el 12 %, las mejoras en la calidad del aire el 3.4% y la reducción del ruido aporta el 0,4 % de los cobeneficios netos.

El escenario de mitigación implica beneficios netos hasta de 237 000 millones de dólares al año. La mayor parte se explica por los ahorros en inversión, operación, mantenimiento de las tecnologías y costo de la energía. Los cobeneficios llegan a aportar el 34 % de los beneficios totales, y los ahorros del csc un 0,5 % adicional.

## MENSAJES CLAVE

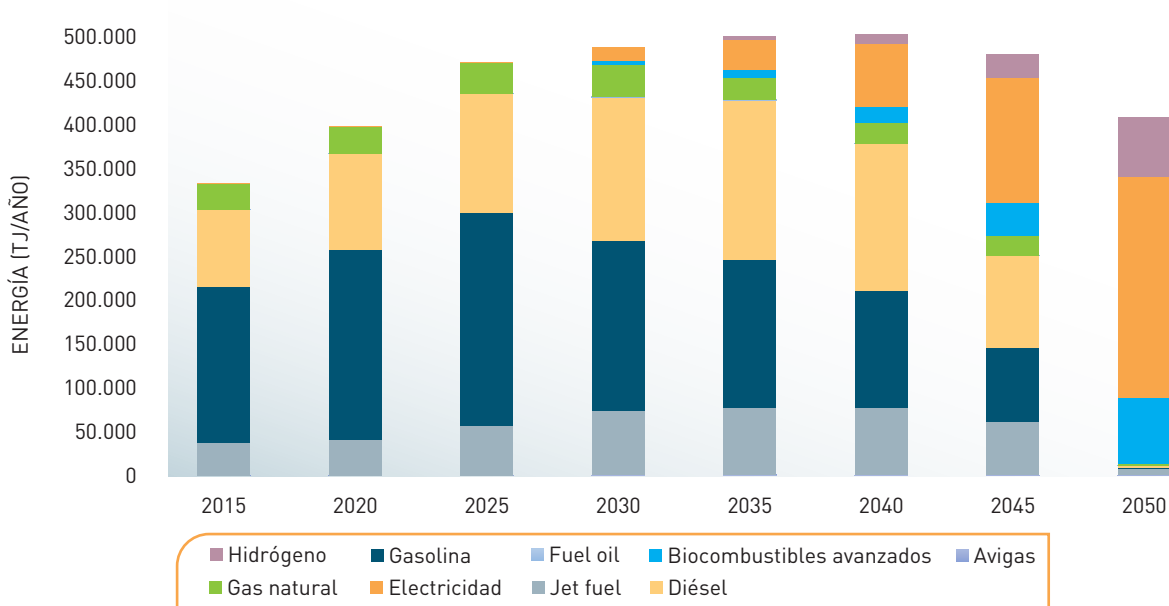
Del análisis se resaltan los siguientes mensajes:

- i) El portafolio de mitigación analizado en este ejercicio muestra que una apuesta por una distribución modal más eficiente y por tecnologías y energéticos de menor intensidad de carbono permitiría reducir de manera significativa el consumo de energía del sector transporte. Dado que el transporte se ha caracterizado por ser el principal sector consumidor de energía, esto tendría implicaciones en todo el sistema energético nacional. Bajo el escenario de mitigación, la demanda de



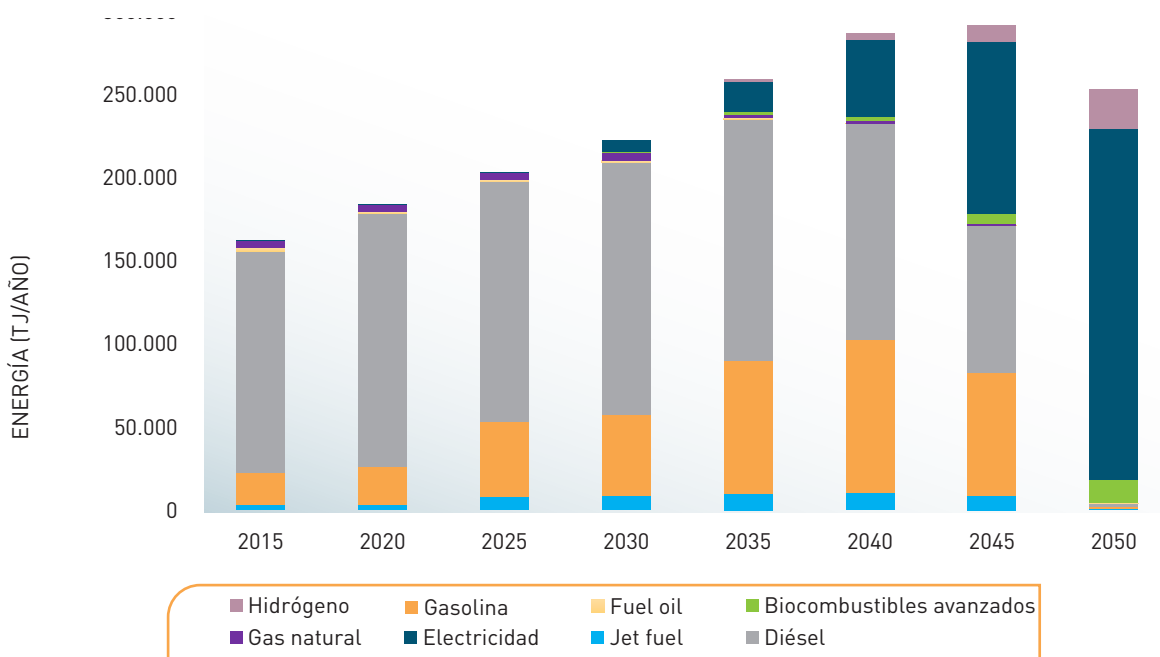
- energía en el año 2050 es el 40 % de la demanda del escenario de referencia.
- ii) Para las nuevas tecnologías (por ejemplo, flota eléctrica y tecnologías de hidrógeno) se proyecta una reducción del costo de inversión en las próximas décadas, que hace que en varios casos se vuelvan competitivas frente a las opciones convencionales. Estas ventajas no se hacen evidentes en los análisis de corto plazo, y, por ende, se tienden a dejar por fuera esas posibilidades.
  - iii) Hay costos adicionales en aspectos como producción, comercialización y servicios asociados a las nuevas tecnologías; sin embargo, estos factores a su vez son reconocidos en la literatura por sus potenciales cobeneficios en creación de nuevas industrias y generación de empleos.
  - iv) Los costos de la infraestructura no se incluyeron en la comparación de los escenarios. Tanto para mantener el *statu quo* con el modo carretero predominante, como para lograr una mayor participación de diferentes segmentos y modos, se necesitan inversiones para creación, operación y mantenimiento de la infraestructura. Es preciso evaluar los costos tanto de la línea base como del escenario de mitigación en próximos estudios para la descarbonización del transporte en Colombia.
  - v) Los tiempos de adopción de nuevas tecnologías pueden tomar décadas; por esa razón no es claro el beneficio de pasar por un conjunto de tecnologías y energéticos de transición antes de implementar las correspondientes a un escenario de descarbonización. Diferentes estudios a nivel internacional sustentan que el paso por tecnologías y energéticos de transición podrían generar mayor dependencia de los fósiles en el largo plazo, adicionando barreras a la descarbonización de los sectores. Dado que la selección de las tecnologías y energéticos para la descarbonización en cada uno de los sectores de consumo final de energía tendrá que ser consistente con un portafolio optimizado para toda la economía nacional, y no solo para el transporte, se requiere entender mejor cómo apuestas por energéticos de transición como el gas natural (Ley 2128 de 2021) o el uso de mezclas de biocombustibles convencionales pueden aportar en la descarbonización de la economía.
- Las figuras 6 y 7 presentan los resultados para la demanda de energía del sector de transporte de pasajeros y carga, respectivamente. La tabla 3 resume los costos incrementales en los escenarios evaluados. Como se puede observar, aún sin incluir los ahorros por daños evitados por la emisión de carbono, las medidas evaluadas ya representan ahorros económicos para la sociedad (valores negativos de costo).

**Figura 6. Canasta energética en el escenario de mitigación del transporte de pasajeros**



Nota: \*Avigas: gasolina de aviación / Fuente: Elaboración propia

**Figura 7. Canasta energética en escenario de mitigación del transporte de carga**



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.** Costos incrementales entre escenario de mitigación y línea base: inversión, operación, mantenimiento y energía\*

	Segmento	Transporte de pasajeros			Transporte de carga			Transporte total		
		Tasa de descuento	9,0 %	6,4 %	3,1 %	9,0 %	6,4 %	3,1 %	9,0 %	6,4 %
Costo Escenario línea base	Millardos de dólares	832	1157	1946	255	361	623	1087	1518	2569
Costo Escenario de mitigación	Millardos de dólares	725	959	1485	229	312	510	954	1271	1995
Costo incremental (mitigación – línea base)	Millardos de dólares	-107	-199	-461	-27	-49	-113	-134	-247	-574
Emisiones CO <sub>2</sub> e reducidas	Millones de toneladas		579,1			315,3			894,4	
Costo efectividad	USD/t CO <sub>2</sub> e	-185	-343	-796	-84	-155	-357	-149	-276	-641

Nota: \*Excluyendo el costo social del carbono. / Fuente: Elaboración propia

# GESTIÓN DE RESIDUOS Y AGUAS RESIDUALES

Este estudio se enfocó en la gestión de residuos sólidos municipales y aguas residuales industriales. En el escenario de referencia, las emisiones GEI predominantes son las generadas por la disposición final de residuos sólidos municipales (39,4 % en el 2050) y por la gestión de aguas residuales industriales (50,8 % en el 2050). El 71,6 % de las emisiones por aguas residuales industriales provienen de los subsectores de almidón, sustancias químicas orgánicas y otros alimentos.

Se diseñó un escenario de mitigación buscando satisfacer las necesidades de gestión de los materiales y tratamiento de residuos (sólidos y aguas residuales) con el mínimo nivel de emisiones GEI posible.

## MEDIDAS DE MITIGACIÓN

Para los residuos sólidos domiciliarios se evaluó el impacto de hacer digestión anaerobia de la totalidad de los residuos de comida y jardín y posterior compostaje de los biosólidos obtenidos de la digestión para su uso como fertilizante. Esta acción se complementó con el reciclaje del 70 % del papel que es enviado a sitios de disposición final. Se evaluó también la incineración con aprovechamiento energético de la totalidad de la fracción de pañales de los residuos sólidos domiciliarios, así como del 30 % restante del papel.

Las plantas de digestión anaerobia propuestas para el aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos municipales podrían evolucionar en el futuro hacia el concepto de biorrefinerías, en las que, además de fertilizantes y de biogás para la producción de energía, se

pueden obtener productos como combustibles, plásticos, materiales sintéticos e insumos para la industria química. Las biorrefinerías también podrían incluir sistemas de tratamiento de aguas residuales y aprovechamiento de los lodos generados. Este concepto de biorrefinerías requiere la maduración de las tecnologías empleadas —la mayoría se encuentra aún en etapa de investigación y desarrollo piloto o de demostración a pequeña escala—, y se identifican desafíos respecto a la financiación del desarrollo tecnológico para alcanzar la escala industrial.

El escenario de mitigación evaluado para residuos sólidos domiciliarios permite reducir, respecto a las emisiones de la línea base, el 49 % de las emisiones GEI del 2030, el 83 % de las emisiones en el 2050, y el 52 % de las emisiones de CO<sub>2</sub>e acumuladas entre el 2015 y el 2050. Para el subsector de tratamiento y eliminación de aguas residuales, se reduce el 58 % de las emisiones en el 2050 y el 45 % de las emisiones acumuladas en este mismo periodo (2015-2050).

En el escenario de mitigación continúan presentándose emisiones GEI en el 2050. A pesar de que no todas las fuentes de emisión fueron impactadas por las medidas propuestas, los subsectores en los que se implementaron las medidas presentan igualmente una brecha para alcanzar la carbono neutralidad, debido a fugas de GEI en los sistemas y al uso de combustibles fósiles dentro de los procesos. Para lograr la carbono neutralidad en el sector, pueden considerarse, por un lado, los ahorros en emisiones atribuidos a los excedentes en la producción de energía eléctrica y calor de los sistemas de digestión anaerobia e incineración propuestos y,

por otro lado, la compensación de emisiones en otros sectores como el agrícola. De igual forma, si se tiene en cuenta una tendencia a aumentar el tratamiento de aguas residuales domésticas, sería necesario contemplar sistemas de aprovechamiento de los lodos resultantes que reduzcan la emisión de GEI y contribuyan a suplir la energía requerida para el proceso de tratamiento.

Además, aunque las propuestas lograrían una mitigación de las emisiones por la desviación de los residuos orgánicos de los sitios de disposición final, es importante considerar que los residuos serían gestionados mediante otras alternativas solo desde el año 2025, y que los sitios de disposición final continuarán emitiendo GEI producto de la descomposición anaerobia de los residuos dispuestos en años anteriores. Por esta razón, adicional a las medidas de mitigación propuestas para los residuos generados desde el 2025, se recomienda tener presente la implementación de sistemas de captura y quema o aprovechamiento de biogás en los sitios de disposición final durante su periodo operativo remanente y de clausura.

## VALORACIÓN DE LAS MEDIDAS

Los resultados de los costos de las medidas de mitigación muestran para todos los casos un costo superior a los costos de la gestión de los residuos en la línea base. La digestión anaerobia de residuos sólidos resultó ser la medida con mayores costos incrementales (entre 3200 y 7000 millones de dólares según la tasa de descuento), pero, a su vez, es la medida que representa la mayor mitigación de emisiones dentro de las opciones propuestas para el tratamiento de residuos sólidos. Esto se atribuye a los elevados costos de capital requeridos al inicio de la puesta en marcha de la medida, que aprovecha la totalidad de los residuos de comida y de jardín, principal fuente de emisión del subsector de residuos sólidos.

Cabe destacar que las medidas propuestas para el aprovechamiento de residuos sólidos en el escenario de mitigación se están comparando con la disposición final en rellenos sanitarios, que es una de las alternativas con menor costo para la gestión de residuos. El costo incremental del escenario con incineración está entre 120 y 390 millones de dólares, y el del reciclaje, entre 146 y 307 millones de dólares.

Respecto al aprovechamiento de los lodos de las aguas residuales industriales, la digestión anaerobia presentó el mayor abatimiento de emisiones GEI de todas las medidas propuestas, y el alto potencial de mitigación compensa el elevado costo de capital que se debe invertir al inicio de la puesta en marcha de la medida. En este caso, se estimó el costo incremental entre 714 y 1600 millones de dólares.

Para el sector de residuos, los cobeneficios evaluados incluyen la venta de materiales reciclados y fertilizantes, el potencial de producción de energía eléctrica y el csc. Entre los cobeneficios netos de las medidas, el csc sobresale en la digestión anaerobia de los residuos y de los lodos. En el caso del reciclaje, el mayor cobeneficio es el aportado por la venta de papel a la industria, lo cual permite obtener ahorros de dinero por la implementación de la medida. El cobeneficio asociado a los aportes de electricidad a la red representa un porcentaje significativo, especialmente en la incineración con aprovechamiento energético. Al examinar los cobeneficios en los costos netos de las medidas de mitigación, se genera una disminución significativa de los costos de abatimiento por tonelada; estos se reducen entre el 44 % y el 66 % respecto a los costos de abatimiento sin considerar los cobeneficios. El escenario de mitigación para todo el sector residuos (residuos sólidos y aguas residuales) considerando los cobeneficios resulta en un costo marginal de abatimiento entre 5,5 y 4,7 dólares por tonelada, según la tasa de descuento que se utilice.

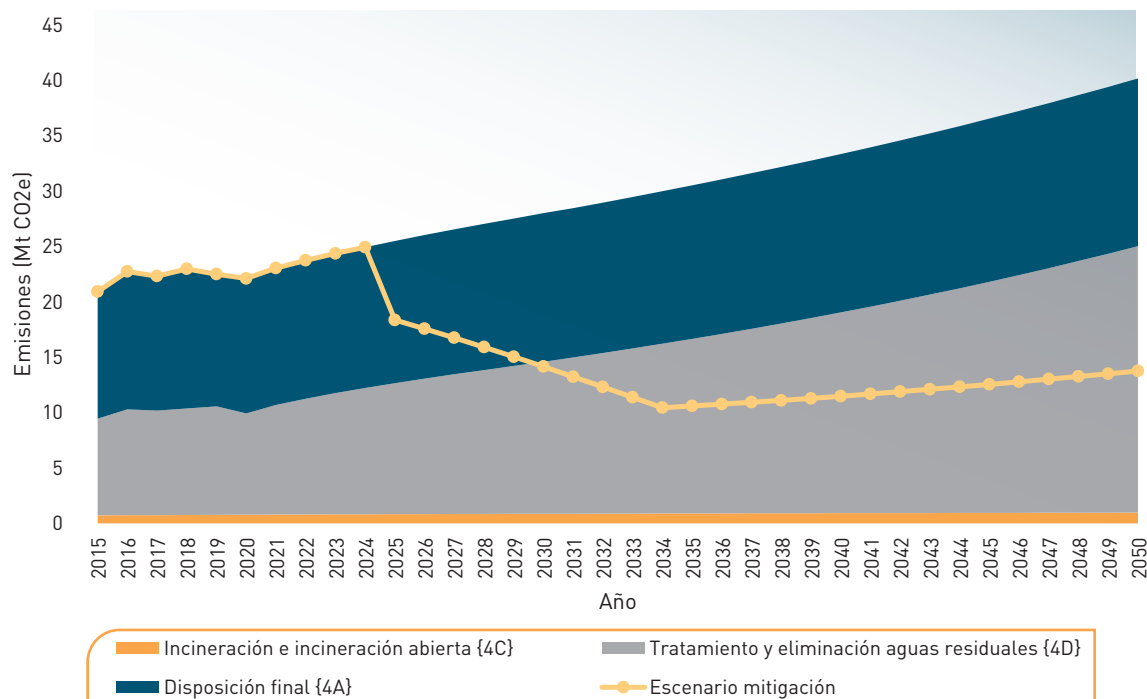
## MENSAJES CLAVE

- i) Uno de los principales retos para la implementación de las medidas en el país sigue siendo la separación en la fuente y la recolección diferenciada de residuos. Sin este factor no será posible generar mejores alternativas de gestión de los residuos. La velocidad de implementación de las medidas propuestas depende, por un lado, del tiempo requerido para implantar el esquema de la recolección diferenciada, y, por el otro lado, del tiempo para la instalación y puesta en marcha de las tecnologías.
- ii) El escenario de mitigación para todo el sector residuos (residuos sólidos y aguas residuales) considerando los cobeneficios resulta en un costo marginal de abatimiento entre 5,5 y 4,7 dólares por tonelada, según la tasa de descuento que se utilice.
- iii) Residuos es el único sector de los evaluados en este estudio en donde la trayectoria hacia la carbono neutralidad resulta en costos netos positivos. Aunque se cuantificaron los cobeneficios que típicamente se consideran para el sector, existen otros beneficios que podrían complementar el

análisis de costos netos derivados de la trayectoria de mitigación de emisiones GEI en la gestión de residuos. Beneficios adicionales que se generan en las medidas y que podrían incluirse en el análisis de costos incluyen: mayor eficiencia en el uso de materiales al reincorporarlos en las cadenas productivas (materiales adicionales a los evaluados en este estudio); menores impactos ambientales sobre el suelo y los cuerpos de agua por una mejor gestión de los residuos; menores impactos sobre la salud humana por factores como exposición a olores y proliferación de vectores de enfermedades por gestión inadecuada de residuos; mejor calidad ambiental de los entornos; menores impactos en calidad del aire y por ende en salud pública; y menor alteración de usos del suelo. Estos cobeneficios implican ganancias para la sociedad, y su inclusión en posteriores análisis llevará a resultados económicos más favorables de los escenarios de mitigación para el sector de gestión de residuos.

La figura 8 presenta los escenarios de emisión modelados para el sector residuos, y la tabla 4, un resumen de los costos incrementales entre los escenarios modelados.

**Figura 8.** Escenario de mitigación sector residuos 2015-2050



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.** Costos incrementales entre escenario de mitigación y línea base y cuantificación de cobeneficios para las medidas de mitigación propuestas

	Segmento	Digestión anaerobia residuos sólidos			Incineración			Reciclaje		
		Tasa de descuento	9,0 %	6,4 %	3,1 %	9,0 %	6,4 %	3,1 %	9,0 %	6,4 %
Costo incremental (mitigación – línea base)	Millones de dólares	3205	4402	7003	118,3	194,3	388,4	146,1	198,5	307,3
Cobeneficios*	Millones de dólares	611,0	1035	2136	58,5	99,6	206,6	270,5	456,8	939,0
Emisiones CO <sub>2</sub> e reducidas	Millones de toneladas		194,2			19,9			38,5	
Costo eficiencia	Dólares/t CO <sub>2</sub> e	13,35	17,34	25,06	3,00	4,76	9,14	-5,28	-8,92	-18,33

	Segmento	Digestión anaerobia lodos			
		Tasa de descuento	9,0 %	6,4 %	3,1 %
Costo incremental (mitigación – línea base)	Millones de dólares		714,3	979,9	1,555,8
Cobeneficios*	Millones de dólares		88,5	145,9	293,5
Emisiones CO <sub>2</sub> e reducidas	Millones de toneladas			247,5	
Costo-eficiencia	Dólares/t CO <sub>2</sub> e		2,53	3,37	5,10

Nota: \*Excluyendo el costo social del carbono / Fuente: Elaboración propia

# CONCLUSIONES

Los resultados del análisis realizado muestran que las trayectorias conducentes a la “carbono neutralidad” sectorial requieren inversiones y costos que son inferiores a los ahorros y beneficios económicos que podrían obtenerse. El único sector en donde el escenario de mitigación es más costoso que el escenario de referencia es el sector de gestión de residuos. Para los sectores de agricultura, energía y transporte, los escenarios de mitigación evaluados, incluyendo los beneficios sociales, resultan en ahorros netos.

En el sector de agricultura se identificaron opciones de mitigación que, en conjunto, permitirían reducir 154 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e en el 2050 y arrojarían un beneficio entre 35 y 105 millardos de dólares (dependiendo de la tasa de descuento utilizada), incluyendo los beneficios por mayor productividad de los cultivos y por los daños evitados al reducir las emisiones de GEI.

En el sector energía, sin incluir transporte, se estimaron ahorros en la operación del sistema energético de entre 0,15 y 47 millardos de dólares variando según la tasa de descuento utilizada. Si se tiene en cuenta el costo social del carbono, los beneficios netos ascienden a entre 6,1 y 71,0 millardos de dólares (que varían según la tasa de descuento y el escenario de comparación). Es importante resaltar que, si bien el costo total del sistema es menor en el escenario de mitigación, el costo marginal de mitigación alcanza los 488 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub>e. Esto implica que, aunque los escenarios bajos en carbono tienen un beneficio neto para la so-

ciudad, hay que prestar atención al hecho de que los costos y los beneficios se distribuyen entre cada agente de manera distinta.

El portafolio de mitigación en transporte lleva a una reducción de 106 Mt CO<sub>2</sub>e en el 2050, una reducción del 99 % de las emisiones respecto a las de la línea base en el 2050, y genera ahorros de entre 133 y 574 millardos de dólares durante el 2020 y el 2050, según la tasa de descuento que se utilice para la evaluación (9,0 %, 6,4 % o 3,1 %). Estos ahorros se refieren a costos de inversión, operación, mantenimiento y consumo de energía. Adicionalmente, los cobeneficios en salud por aumentar actividad física, la reducción de la congestión, la disminución de la accidentalidad, las mejoras en calidad del aire y la reducción del ruido generan un valor adicional de entre 58 y 69 millardos de dólares en el mismo periodo.

Finalmente, en el sector residuos se alcanza una reducción de 14 Mt CO<sub>2</sub>e, el 83 % de las emisiones GEI que se tendrían en el 2050 en la línea base. La evaluación de costo-efectividad del escenario de mitigación arrojó costos de abatimiento de entre 8,36 y 18,5 usd/t CO<sub>2</sub>e (dependiendo de la tasa de descuento). Al incluir los cobeneficios por venta de materiales reciclados y fertilizantes, potencial de producción de energía eléctrica y creación de puestos de trabajo por la incorporación de nuevas prácticas, tecnologías para la gestión de residuos y el csc en la evaluación, el costo de abatimiento llega a ser incluso menor a 4 usd/t CO<sub>2</sub>e, aumentando su viabilidad económica en un contexto de mitigación de emisiones.



En conjunto para los cuatro sectores evaluados, las medidas generan beneficios económicos en el orden de 183 millardos de dólares del 2015, usando una tasa de descuento del 9 %; de 336,1 millardos cuando se usa una tasa de 6,4 %, y de 747 millardos cuando la tasa de descuento es 3,1 %. Estos valores son sustanciales y representan el 57 %, 105 % y 233 % del PIB del 2019. *Grosso modo*, esto es equivalente a una obtención de beneficios, como promedio simple, de 3,75 % anual durante el periodo de implementación de las medidas.

Desde el punto de vista sectorial, la trayectoria de mitigación evaluada indica que, con la excepción del sector AFOLU, ningún sector logra-

ría alcanzar la carbono neutralidad en el 2050. Para el logro de esta meta conjunta se requiere que el sector AFOLU genere emisiones negativas a partir del 2041, de manera creciente, de suerte que estas compensen las emisiones residuales de los demás sectores. Por ello, el avance temprano y sostenido de la mitigación en este sector es fundamental para la descarbonización del país.

Esto quiere decir que el desarrollo bajo en carbono para Colombia es deseable desde el punto de vista económico y produce utilidades económicas netas positivas, aunque los costos y los beneficios son asumidos y percibidos por diferentes agentes involucrados.



