

Documento N° 566

ARCHIVOS DE ECONOMÍA

DESCARBONIZACIÓN Y COSTOS EFECTIVOS: EVALUACIÓN DEL IMPACTO

Camilo Álvarez-Espinosa

Agosto del 2024

DESCARBONIZACIÓN Y COSTOS EFECTIVOS: EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE SISTEMA DE COMERCIO DE EMISIONES EN COLOMBIA EN EQUILIBRIO PARCIAL.

Autor: Camilo Álvarez-Espinosa

acalvarez@dnp.gov.co

Resumen^α

El cambio climático es un desafío global que demanda diversas estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI). Entre estas estrategias, los Sistemas de Comercio de Emisiones (SCE) son instrumentos eficaces para reducir costos de cumplimiento y fomentar la innovación tecnológica. Este estudio evalúa la eficiencia económica de un SCE en Colombia, identificando sectores clave para la descarbonización y reindustrialización responsable. Utilizando un modelo de equilibrio parcial y curvas de costos marginales de abatimiento, se determinaron los precios por tonelada reducida de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq). En un escenario con comercio de emisiones, el costo por tonelada es de \$37,70 USD, y disminuye a \$0,20 USD/tCO₂eq al incluir el potencial del sector AFOLU (Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra, por sus siglas en inglés). Esto demuestra la alta rentabilidad de las medidas en el sector AFOLU. El estudio subraya la necesidad de políticas complementarias en sectores como procesos industriales, transporte y demanda de energía por parte de la industria, además del SCE, para maximizar la eficiencia de las estrategias de descarbonización. Los costos totales de cumplimiento sin comercio alcanzan el 5% del PIB anual, pero se reducen significativamente con la inclusión del SCE y el sector AFOLU, liberando recursos para otros objetivos sociales y económicos.

Palabras clave: Mitigación de gases de efecto invernadero, Sistemas de Comercio de Emisiones, Descarbonización.

Clasificación JEL: F18, Q54, O44.

^α Contratista externo en la Subdirección de Gestión del Cambio Climático y Riesgo de Desastres del Departamento Nacional de Planeación. El autor agradece los comentarios realizados por Alexandra Romo, Alexander Rincón, Liliana Merchan y Carolina Diaz. Los errores, opiniones y omisiones son responsabilidad del autor y no comprometen a ninguna institución.

1 Introducción

El cambio climático es un desafío global que requiere diversas estrategias para mitigar los gases de efecto invernadero (GEI) que lo producen. Estas estrategias para promover la descarbonización de las economías van desde mecanismos de comando y control, regulaciones, establecimiento de estándares, creación de subsidios e instrumentos de precio al carbono (D’Arcangelo, Levin, Pagani, Pisu, & Johansson, 2022). La efectividad de esas estrategias radica en que su implementación sea conjunta y que no se dependa exclusivamente de un solo medio de implementación.

Es importante promover la implementación de estrategias de mitigación de GEI y la transición hacia una economía descarbonizada, los retrasos actuales exigirán una descarbonización drástica y costosa en el futuro. Sin embargo, actuar pronto no implica hacerlo todo de inmediato (Fay, y otros, 2015). Por lo anterior, es necesario identificar y focalizar los esfuerzos en sectores cuyos potenciales de reducciones de emisiones de GEI, en países como Colombia, sean factibles y que tengan sentido dentro de una estrategia general de innovación tecnológica para la descarbonización, la reindustrialización responsable que aumente la productividad y genere empleo, fomente actividades productivas acordes con la protección de la naturaleza y promuevan la reducción de la desigualdad social, entre otros.

En cuanto a los instrumentos de precio al carbono, los sistemas de comercio de emisiones (SCE) son efectivos en el corto plazo ya que tienden a minimizar e igualar los costos de reducción entre los distintos sectores cuyas emisiones hagan parte del alcance del sistema propuesto; son eficaces para promover la innovación tecnológica siempre y cuando no haya volatilidad en los precios que pueda desestimular las inversiones en las medidas de mitigación sectorial; y generan certidumbre sobre los beneficios ambientales expresado en la cantidad de emisiones a reducir. No obstante, establecer un SCE implica altos costos debido a la necesidad de establecer un marco legal e institucional (D’Arcangelo, Levin, Pagani, Pisu, & Johansson, 2022).

El presente estudio evalúa la eficiencia económica de un SCE obteniendo los precios por tonelada reducida para el caso colombiano y determinar los costos de cumplimiento de los objetivos de mitigación de GEI propuestos, en este caso de 24% respecto a las emisiones de referencia. Además, identificar los sectores estratégicos para la descarbonización y

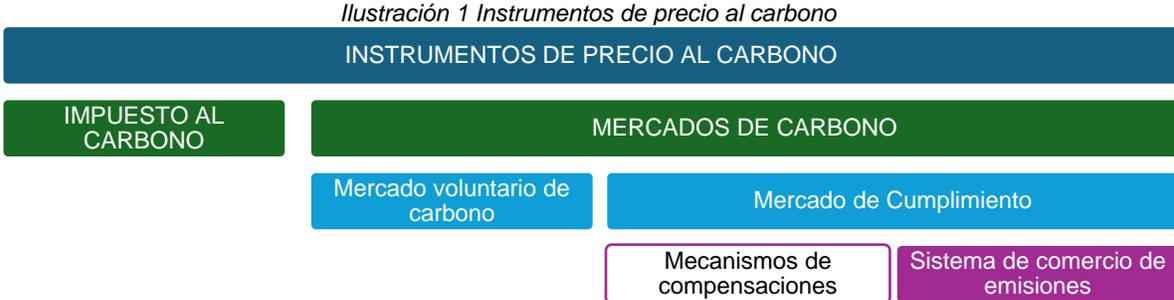
reindustrialización en Colombia, definiendo aquellos con mayor potencial para reducir emisiones de GEI de manera eficiente.

En este sentido, a partir del trabajo de Böhringer, Hoffman, Lange, Loschel y Moslener (2005) se desarrolla un modelo económico de equilibrio parcial haciendo uso de las curvas de costos marginales de abatimiento –relación entre el nivel de emisiones que un sector puede reducir y el costo por unidad– calculadas para Colombia (Banco Mundial, 2022). La interacción de cada sector o categoría de emisión permite calcular el precio por tonelada de dióxido de carbono equivalente requerido para cumplir un objetivo ambiental de emisiones de GEI, este ejercicio también permite identificar los sectores que contribuirían más al cumplimiento de las metas e identificar aquellas categorías de emisiones que requieren de un conjunto de medidas más allá que un SCE.

El documento se compone de cinco secciones, incluida esta introducción. En la sección 2, se presenta un estado del arte sobre la evaluación de los SCE y su efecto en la innovación tecnológica. En la sección 3 se presenta el modelo de equilibrio parcial propuesto y las fuentes de información utilizadas. En la sección 4, se detallan los escenarios de política propuestos y los resultados obtenidos expresados en dólares por tonelada de dióxido de carbono equivalente, las reducciones de GEI por categoría de emisión o sector en millones de toneladas y el costo de cumplimiento en millones de dólares. La sección 5 ofrece las conclusiones y, finalmente, la sección 6 incluye las referencias consultadas.

2 Sistema de comercio de emisiones y su impacto

Los instrumentos de precio al carbono buscan internalizar el costo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en los sectores económicos (DNP, 2023). Estos instrumentos se dividen en dos tipos: impuestos al carbono y mercados de carbono (ver Ilustración 1).



Fuente: elaboración propia a partir de (ICAP, 2024)

Un impuesto al carbono es una carga fiscal sobre el contenido de carbono de los combustibles, y su propósito es reducir su uso y promover la utilización de fuentes de energía con cero o menor contenido de carbono¹. Los mercados de carbono pueden ser Voluntarios o de Cumplimiento. En el Mercado Voluntario de Carbono, los interesados adquieren créditos de carbono por iniciativa propia para compensar² sus emisiones de GEI.

El Mercado de Cumplimiento es un mercado donde las empresas deben comprar permisos o cupos de emisión para cumplir con los límites legales de emisiones de GEI. Este mercado se basa en Mecanismos de Compensaciones (como el Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation³, o Corsia por sus siglas en inglés) y los Sistema de Comercio de Emisiones (SCE). En este último se establece un límite a las emisiones totales y se permite el comercio de los permisos o cupos de emisión⁴. Implícitamente, un SCE tiene como objetivo generar cambios en las tecnologías y en el comportamiento de los agentes económicos (productores, consumidores e inversores), a fin de reducir las emisiones de GEI.

En las jurisdicciones donde ya se ha implementado un SCE ha sido de especial interés evaluar su efectividad en términos de reducciones de GEI y el efecto sobre la promoción de innovaciones tecnológicas. Lilliestam, Patt y Bersalli (2020) realizan un análisis ex post sobre la efectividad de los instrumentos de precios al carbono en varias jurisdicciones. En general, encuentran que los instrumentos de precios al carbono tienen un impacto positivo en la promoción de cambios tecnológicos – representados como innovación, e inversiones en tecnologías de descarbonización. Sin embargo, no hallan evidencia sobre la adopción de tecnologías de cero emisiones.

¹ Colombia ha implementado un impuesto al carbono fijado en pesos es de \$25.799,56 (aproximadamente USD 6,5 por tonelada de CO₂eq).

² La iniciativa de Objetivos basados en la ciencia (SBTi por sus siglas en inglés) define la compensación como medidas que toman las empresas para ayudar a la sociedad a evitar o reducir las emisiones fuera de su cadena de valor, y la neutralización como las medidas que las empresas adoptan para eliminar el carbono de la atmósfera.

³ CORSIA es la primera medida global basada en el mercado para un solo sector. Ofrece una forma armonizada de reducir las emisiones de la aviación internacional, minimizando la distorsión del mercado, mientras respeta las circunstancias especiales y las capacidades respectivas de los Estados miembros de la Organización de Aviación Civil Internacional. Mas información: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/pages/default.aspx>

⁴ En Colombia se creó un Sistema de Comercio de Emisiones, conocido como el Programa Nacional de Cupos Transables de Emisión de Gases de Efecto Invernadero (PNCTE) mediante la Ley 1931 de 2018.

Van der Bergh y Savin (2021) evalúa la evidencia empírica en respuesta a Lilliestam, Patt y Bersalli (2020) encontrando que se ha tenido un impacto pequeño y positivo en promover tecnologías de cero emisiones. Destacan que las transformaciones tecnológicas requieren períodos prolongados. Haites et al. (2023) analiza la efectividad de los precios al carbono para reducir emisiones y promover la innovación. Encuentran que los instrumentos de precios al carbono pueden ser un componente útil dentro de un paquete de políticas públicas para minimizar el riesgo de impactos económicos adversos.

Lim y Prakash (2023) constata que las políticas de precios de carbono, como los impuestos al carbono y los sistemas de comercio de emisiones, no solo reducen las emisiones, sino que también impulsan la innovación climática vinculada a un incremento en las solicitudes de patentes para tecnologías de mitigación de GEI. Chen y Wang (2023) encuentra que se puede incentivar la adopción de nuevas tecnologías de mitigación, aumentando la reducción de emisiones. Finalmente, Colmer et al. (2024) evidencian que las empresas en Europa redujeron las emisiones sin afectar su desempeño económico.

Para el caso de Colombia, en Rodríguez (2021) se evalúa cómo los elementos hipotéticos de diseño del Programa Nacional de Cupos Transables (PNCTE) –límite de emisiones, probabilidad de monitoreo y el volumen de compensaciones– afectan el precio de los permisos y las emisiones totales. De éste se concluye que ante un aumento en la probabilidad de monitoreo por parte del regulador se aumenta el valor esperado de la penalización, lo cual hace que las empresas se anticipen y disminuyan su nivel de emisiones, adquieran más permisos en el mercado secundario lo cual aumenta su precio. Sousa et al. (2020) muestra un análisis de las consecuencias macroeconómicas de implementar un Sistema de Comercio de Emisiones (SCE). Se identificaron dos efectos principales del SCE: la incorporación del costo marginal de emisiones en la producción por parte de los sectores regulados reduce la producción, y existe sustitución de bienes intensivos en emisiones para minimizar costos, llevando a una disminución de emisiones. Además, se encontró que el uso de ingresos de la venta de permisos para estimular la inversión tiene efectos positivos, contribuyendo a la transformación económica.

3 Marco metodológico

3.1 Modelo de equilibrio parcial

El propósito del análisis de equilibrio parcial para medir el impacto económico de un sistema de comercio de emisiones en Colombia es determinar la eficiencia económica en términos

de precio por tonelada de dióxido de carbono equivalente (USD/tCO₂eq) y el impacto en la reducción de emisiones de diferentes sectores o categorías de emisión de GEI. Esto último se refiere a cómo se establecería la reducción de emisiones sectoriales de forma óptima para contribuir al compromiso nacional. A continuación, se describen las variables, parámetros y condiciones del problema que enfrenta cada sector o categoría de emisión de GEI.

Tabla 1 Variables, parámetros y condiciones del modelo de equilibrio parcial propuesto

Parámetros	
i	Sector o categoría de emisión
$objetivo_i$	Límite de emisiones de la categoría de emisión i
$\alpha_i^1, \alpha_i^2, \alpha_i^3$	Parámetros de la función de costos marginales del sector i
Cantidades endógenas	
D_i	Reducción sectorial
MD_i	Ventas de cupos de emisión del sector i
XD_i	Compras de cupos de emisión del sector i
Precios endógenos	
P_i	Precio marginal de reducción del sector i
PD_i	Precio del cupo de emisión en el mercado secundario (entre los agentes)
Condiciones de cero beneficios	
	Variable asociada
$\alpha_1 D_i^1 + \alpha_2 D_i^2 + \alpha_3 D_i^3 \geq P_i$	D_i
$PD_i \geq P_i$	MD_i
$P_i \geq PD_i$	XD_i
Condiciones de equilibrio	
	Variable asociada
$D_i + MD_i \geq objetivo_i + XD_i$	P_i
$\sum_i XD_i \geq \sum_i MD_i$	PD_i

Fuente: elaboración propia a partir de Bohringer, Hoffmann, Lange, Löschel, y Moslener (2005).

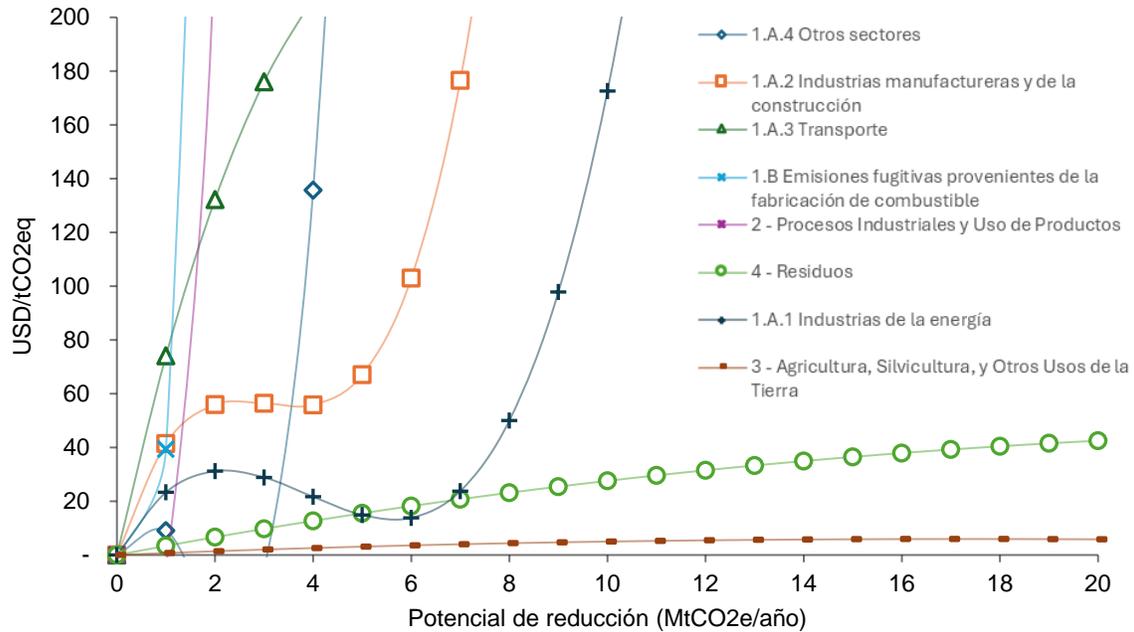
El modelo económico propuesto se centra en analizar el comportamiento económico en un aspecto específico, en este caso reducciones de GEI y en un tipo particular de agente económico, manteniendo constantes los precios y cantidades del resto de la economía. Sin embargo, una de las desventajas de este tipo de enfoques es que no se consideran las interdependencias con otros sectores de la economía, en particular el efecto del incremento en precios de los bienes y servicios derivados de las medidas de mitigación que deben ser asumido por algún agente económico (Burfisher, 2011).

3.2 Fuentes de información

La fuente de información usada para llevar a cabo el análisis de equilibrio parcial es la información de las curvas de costo marginal de abatimiento elaboradas en el marco de la Hoja de ruta para lograr la meta de reducción de emisiones de GEI de Colombia bajo la

NDC actualizada (Banco Mundial, 2022). A partir de dicha información se calibran los parámetros ($\alpha_i^1, \alpha_i^2, \alpha_i^3$) de la Tabla 1. En la Gráfica 1 se encuentran las curvas marginales de abatimiento parametrizadas.

Gráfica 1 curvas marginales de abatimiento parametrizadas



Fuente: elaboración propia a partir de (Banco Mundial, 2022).

Nota: las medidas de mitigación tomadas para calibrar el modelo corresponden a un subconjunto de medidas de mitigación con costo de abatimiento positivo y no mayor a 200 USD/tCO2eq. La razón es que los costos marginales negativos enfrentan restricciones en su implementación de tipo técnico, jurídico o social. Mientras que los costos superiores a los 200 dólares se consideran, para el caso colombiano, prohibitivos.

Vale señalar que las curvas de costo marginal de abatimiento no reflejan las interacciones entre diferentes medidas de reducción de emisiones; tampoco consideran los co-beneficios que pueden surgir tras la mitigación de GEI, lo cual puede implicar una subestimación del costo o beneficio total. Tampoco se incorporan dinámicas Inter temporales, es decir, cómo las decisiones de reducción de emisiones en un momento determinado pueden afectar costos futuros (Kesicki & Strachan, 2011).

Otra información requerida para el análisis económico son las emisiones de GEI por categoría y la reducción objetivo –parámetro $objetivo_i$ de Tabla 1. A continuación, se presentan las emisiones de GEI y el porcentaje de reducción objetivo.

Tabla 2 emisiones del año 2020, 2030 y reducciones objetivo

Categoría de emisiones (i)	Emisiones 2020 ^a (MtCO ₂ eq)	Emisiones 2030 ^a (MtCO ₂ eq)	Emisiones reducidas respecto a 2020 con un límite de 10% (MtCO ₂ eq)	Emisiones objetivo (MtCO ₂ eq)	Reducciones objetivo respecto a 2030 (MtCO ₂ eq)	Porcentaje de reducción objetivo (%) Escenario base*
	A	B	C = A x 10%	D = A-C	E=B-D	F =E/B x 100
1.A.1 Industrias de la energía	16,7	27,2	1,7	15,0	12,1	43,3
1.A.2 Industrias manufactureras y de la construcción	13,2	21,4	1,3	11,8	9,6	44,3
1.A.3 Transporte	39,1	56,1	3,9	35,1	21,0	37,3
1.A.4 Otros sectores	8,4	11,3	0,8	7,6	3,7	34,5
1.B Emisiones fugitivas provenientes de la fabricación de combustible	11,3	8,8	1,1	10,2	-1,3	-10,0
2. Procesos Industriales y Uso de Productos	10,7	18,4	1,1	9,6	8,8	45
3. Agricultura, Silvicultura, y Otros Usos de la Tierra	170,4	174,5	17,0	153,4	21,1	12,6
4. Residuos	21,6	28,1	2,2	19,4	8,7	29,3
Total	291,3	345,8		262,2*	83,6	

Fuente: elaboración propia. ^{a/} Las emisiones de referencia del año 2020 y 2030 son tomadas de (Gobierno de Colombia, 2020). * Este valor es similar al que debería tener Colombia de forma anual para alcanzar el objetivo de compromiso en 2030.

4 Escenarios de política y resultados

En esta sección se presentan los escenarios propuestos que buscan obtener como resultado el precio de la tonelada reducida, o precio del cupo transable de emisiones de GEI, las reducciones óptimas por categoría del inventario y el costo económico de cumplimiento.

4.1 Escenarios de política

Reducciones de GEI sin comercio: El cumplimiento de las metas de reducción de cada sector se logra mediante mecanismos sectoriales como planes de implementación de las medidas de mitigación, estándares, o mecanismos de comando y control. El precio por tonelada corresponde al costo de implementar las medidas de mitigación en los sectores hasta que se cumpla con la reducción objetivo en esa categoría del inventario. No se

asignan cupos de emisión transables. Se excluye de este escenario las emisiones y reducciones de la categoría Agricultura, Silvicultura, y Otros Usos de la Tierra.

Reducciones de GEI con comercio: en este escenario se asignan y permite intercambiar cupos de emisiones entre distintos sectores, es decir, existe la posibilidad de comercio intersectorial. En este escenario, el precio de la tonelada reducida es igual para todos los sectores y corresponden al costo marginal de abatimiento resultado del comercio. El objetivo de reducción se hace de forma total y la contribución sectorial en dicha meta general se obtiene endógenamente y de forma óptima. También se excluye de este escenario las emisiones y reducciones de la categoría Agricultura, Silvicultura, y Otros Usos de la Tierra.

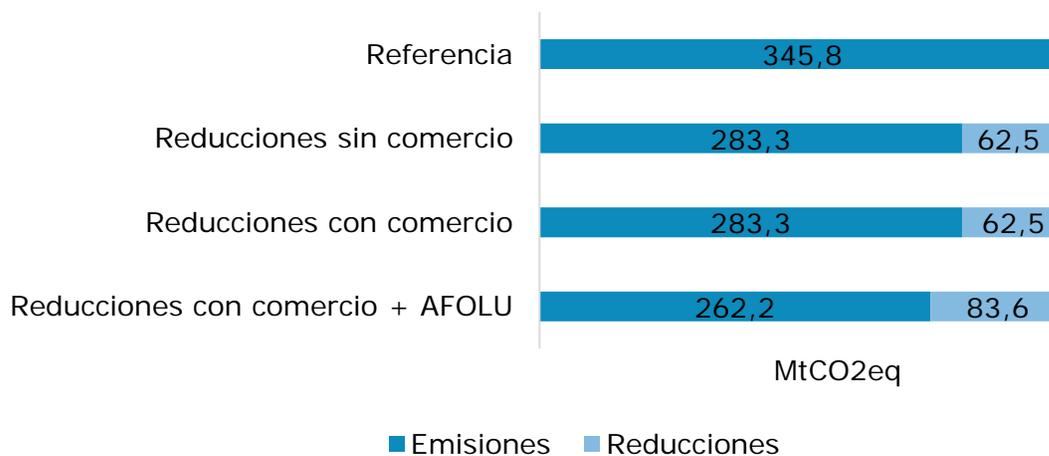
Reducciones con comercio + AFOLU: Similar al escenario con comercio, pero este escenario incluye las emisiones y potencial de reducción de la categoría Agricultura, Silvicultura, y Otros Usos de la Tierra.

Tabla 3 descripción de los escenarios de política

Escenarios de política	Categorías de emisiones incluidas	Meta o contribución sectorial
ESC 1. Reducciones de GEI sin comercio	ESC 01	Exógena (ver Tabla 2). Las metas se logran con instrumentos de planeación sectorial
	1.A.1 Industrias de la energía	
	1.A.2 Industrias manufactureras y de la construcción	
	1.A.3 Transporte	
	1.A.4 Otros sectores	
	1.B Emisiones fugitivas provenientes de la fabricación de combustible	
	2 - Procesos Industriales y Uso de Productos	
ESC 2. Reducciones con comercio	4 - Residuos	Endógenas. Se logran de forma óptima tras el intercambio de los cupos al minimizar el costo de reducción de GEI
	Igual que el ESC 01	
ESC 3. Reducciones con comercio + AFOLU	Igual que el ESC 01 más 3 - Agricultura, Silvicultura, y Otros Usos de la Tierra	Igual que el ESC 2

Fuente: elaboración propia

Gráfica 2 Reducciones de GEI por escenario de política propuesto



Fuente: elaboración propia

4.2 Precios por tonelada

Para el caso del escenario de reducciones de GEI sin comercio el precio por tonelada para el sector de las Industrias de la energía es de 13,00 dólares la tonelada de dióxido de carbono equivalente (USD/tCO₂eq). Esta categoría refleja costos relativamente bajos en comparación con otros. Para las emisiones de la categoría de demanda de energía por parte de las industrias manufactureras y de la construcción el precio por tonelada reducida es de 60,80 USD/tCO₂eq.

La categoría de emisiones relacionadas con la actividad Transporte tiene un precio de 219,10 USD/tCO₂eq, lo que lo convierte en uno de los sectores más costosos para reducir emisiones. Esto es una señal de la dependencia a los combustibles fósiles y la actual infraestructura. Para las emisiones de uso de la energía relacionada con Otros Sectores⁵ (1.A.4) hay un precio de reducción de 14,60 USD/tCO₂eq.

Las reducciones de GEI de la categoría Procesos Industriales y Uso de Productos tienen unos precios prohibitivos de reducción de emisiones. En caso de que no exista la posibilidad de un mecanismo de flexibilidad intersectorial de reducción de emisiones se puede llegar a un precio por tonelada reducida de 7.140,10 USD/tCO₂eq.

⁵ Incluye emisiones por demanda de energía de los sectores Comercial, Institucional, Residencial y Agricultura.

En el caso de las reducciones de la categoría de Residuos se obtienen precios de 13,10 USD/tCO₂eq, las reducciones en este sector son relativamente económicas.

En el caso del precio de las emisiones fugitivas provenientes de la fabricación de combustible su porcentaje de reducción objetivo respecto a 2030 es negativo de acuerdo con las emisiones proyectadas para el año 2030 (ver Tabla 2). Esto significa que, en caso de que se cumpla el benchmark para el año 2030 este sector no incurrirá en costos adicionales para lograr las metas de mitigación propuestas.

Por otro lado, en el escenario de Reducciones de GEI con comercio el precio por tonelada reducida es de 37,70 USD/tCO₂eq para todas las emisiones. En este caso, los beneficios económicos del comercio se reflejan en una señal de precios uniforme que se aplica a todos los sectores. Para el escenario con comercio e incluyendo al sector AFOLU el precio por tonelada reducida para todos los sectores es de 0,20 USD/tCO₂eq. De acuerdo con la información disponible, la inclusión de actividades de mitigación o compensación en este sector ofrece opciones de reducción con costos bajos.

La Tabla 4 muestra el precio por tonelada de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para cada escenario de política propuesto.

Tabla 4 Precio por tonelada reducida por categoría de emisión y escenario

Categoría de emisión	Reducciones de GEI sin comercio	Reducciones de GEI con comercio	Reducciones con comercio + AFOLU
1.A.1 Industrias de la energía	\$ 13,00	\$ 37,70	\$ 0,20
1.A.2 Industrias manufactureras y de la construcción	\$ 60,80		
1.A.3 Transporte	\$ 219,10		
1.A.4 Otros sectores	\$ 14,60		
1.B Emisiones fugitivas provenientes de la fabricación de combustible	\$ -		
2 - Procesos Industriales y Uso de Productos	\$ 7.140,10		
4 – Residuos	\$ 13,10		
3 - Agricultura, Silvicultura, y Otros Usos de la Tierra			

Fuente: elaboración propia

4.3 Reducciones sectoriales de GEI

Reducciones porcentuales

Las reducciones de las emisiones de Industrias de la Energía en el escenario sin comercio son 43,3% respecto a las emisiones de 2030, y pasan al 56,7% en el escenario con comercio. Al incluir las medidas del sector AFOLU pasan a ser 0,2%. En el sector de

demanda de energía de las Industrias Manufactureras y de la Construcción, las reducciones son de 44,3% en un escenario sin comercio y de 8,2% con comercio, cuando se incluye el potencial de las medidas AFOLU su reducción son 0,2% respecto a las emisiones de 2030.

Para el sector de Transporte que enfrenta costos de reducción comparativamente altos (219,10 USD/tCO₂eq en el escenario sin comercio), su reducción de emisiones pasa de 37,3% al 1,7% en el escenario con comercio y al 0,1% cuando se incluyen las medidas de AFOLU. Por el contrario, en las emisiones de la categoría Otros Sectores⁶, el porcentaje de contribución pasa del 34,5% al 62,7% en el escenario con comercio, e igual se reducen a un 0,3% cuando se incluyen las medidas del sector AFOLU.

En cuanto a las emisiones Fugitivas, se tiene un 22% en su reducción respecto a las emisiones de 2030 en el escenario con comercio, y del 10,2% en el caso que se incluya el potencial de reducción del sector AFOLU.

Las reducciones porcentuales de las emisiones por Procesos Industriales y el Uso de Productos pasan del 45% sin comercio al 50,6% con comercio, y una reducción porcentual de 0,5% con medidas del sector AFOLU.

La contribución porcentual de las emisiones de la categoría Residuos pasan del 29,3% sin comercio al 115,1% cuando se habilita la posibilidad de intercambiar. A incluir el potencial AFOLU su contribución respecto a sus emisiones de 2030 es de 0,8%.

Para el escenario Reducciones con comercio + AFOLU El sector de Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU) contribuirá con un 47% de reducción de sus emisiones en 2030. La Tabla 5 presenta las reducciones porcentuales de gases de efecto invernadero (GEI) en los tres escenarios de política propuestos.

⁶ Incluye emisiones por demanda de energía de los sectores Comercial, Institucional, Residencial y Agricultura.

Tabla 5 Reducciones porcentuales por categoría

Categoría de emisión	Escenario base*	Reducciones de GEI sin comercio	Reducciones de GEI con comercio	Reducciones de GEI con comercio + AFOLU
	Porcentaje			
1.A.1 Industrias de la energía	43,3	43,3	56,7	0,2
1.A.2 Industrias manufactureras y de la construcción	44,3	44,3	8,2	0,2
1.A.3 Transporte	37,3	37,3	1,7	0,1
1.A.4 Otros sectores	34,5	39,9	62,7	0,3
1.B Emisiones fugitivas provenientes de la fabricación de combustible	-10	0	22	10,2
2 - Procesos Industriales y Uso de Productos	45	50,6	16,6	0,5
4 - Residuos	29,3	29,3	115,1	0,8
3 - Agricultura, Silvicultura, y Otros Usos de la Tierra	12,6			47

Fuente: elaboración propia. Nota: *ver Tabla 2

Reducciones en cantidades

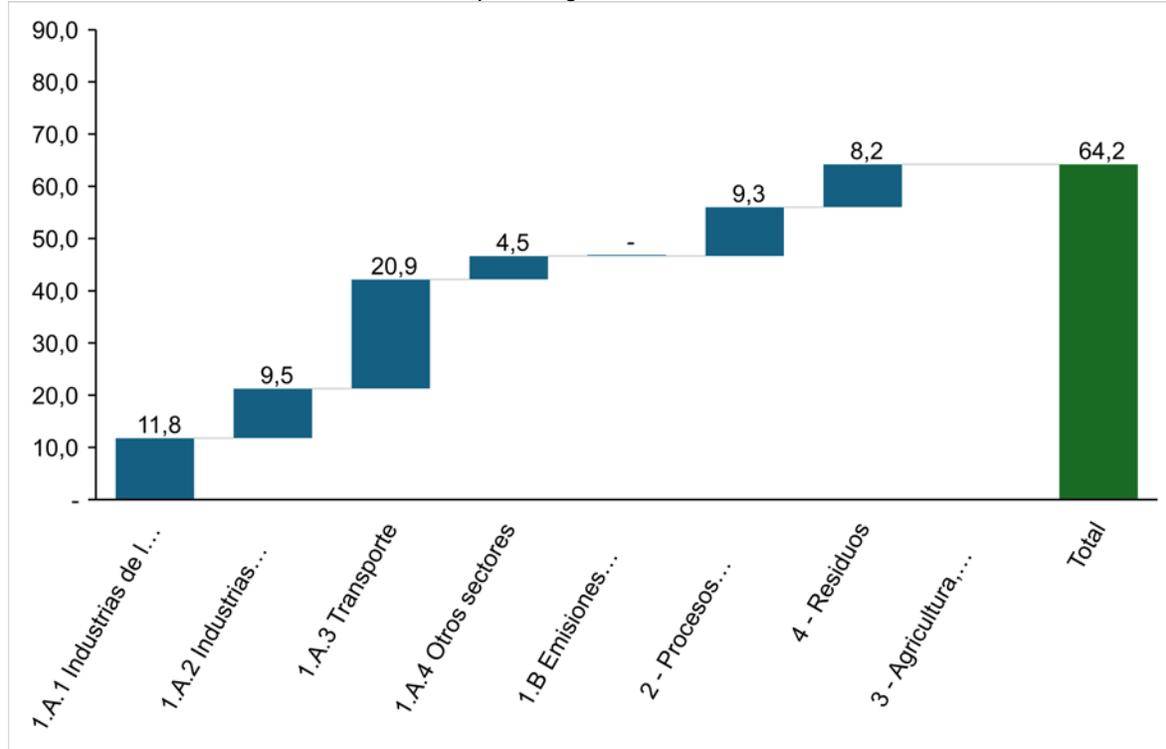
En el escenario Reducciones de GEI sin comercio (ver Gráfica 3) se logra una reducción general de 64,2 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂eq) respecto al escenario de referencia o contrafactual. Las principales contribuciones a esta reducción la hacen las reducciones de las categorías Transporte (20,9 MtCO₂eq) e Industrias de la energía con una reducción de 11,8 MtCO₂eq, seguido de la demanda de energía por parte del sector industrial que contribuye con una reducción adicional de 9,5 MtCO₂eq.

La demanda de energía de Otros Sectores aporta una reducción de 4,5 MtCO₂eq. El sector de Procesos Industriales y Uso de Productos contribuye con una reducción de 9,3 MtCO₂eq, mientras que Residuos aporta 8,2 MtCO₂eq.

Al comparar las anteriores reducciones con las obtenidas en el escenario con comercio (ver Gráfica 4) la categoría Residuos presenta un aumento notable en su contribución a la meta total al pasar de 8,2 MtCO₂eq a 32,3 MtCO₂eq, convirtiéndose en un sector clave para la reducción de emisiones bajo un esquema de comercio, esto considerando que en ausencia de comercio de emisiones, la categoría Residuos enfrenta costos de reducción bajos respecto a otros sectores (ver columna dos, Tabla 4). Otro sector que incrementan sus contribuciones son las emisiones relacionadas con las industrias de la energía al pasar de 11,8 MtCO₂eq a 15,4 MtCO₂eq. La demanda de energía de otros sectores muestra un

incremento en sus reducciones, de 4,5 MtCO₂eq a 7,1 MtCO₂eq en el escenario con comercio.

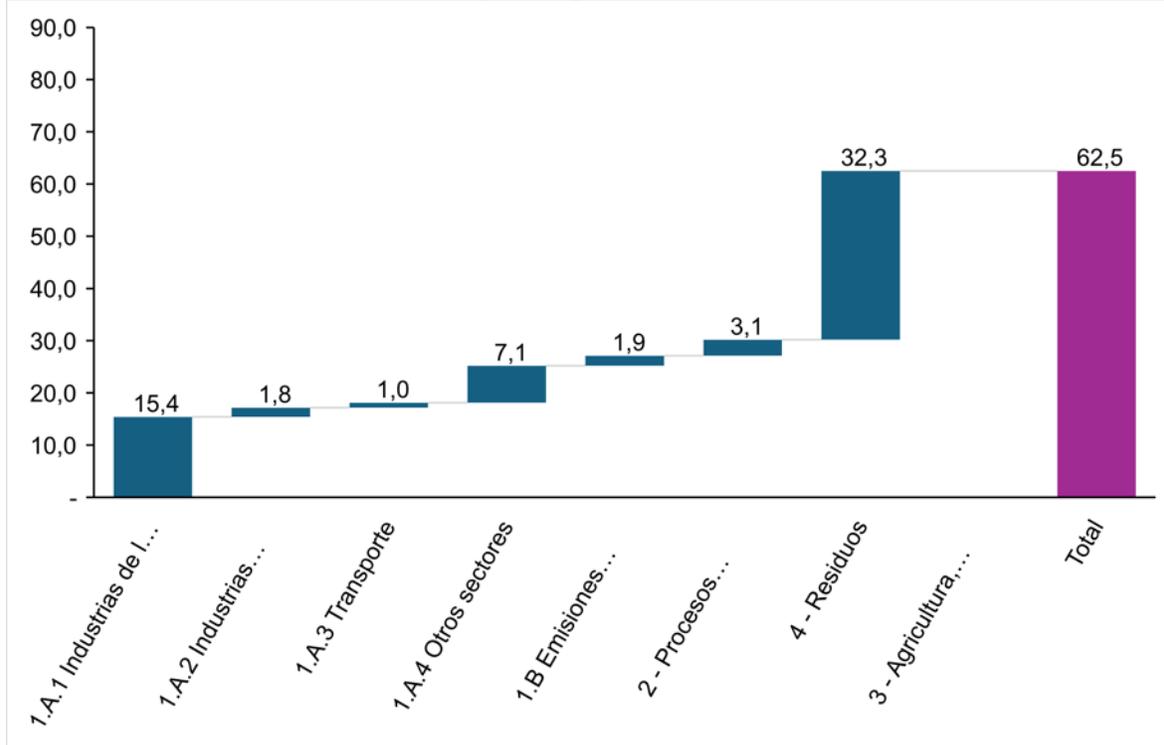
Gráfica 3 Reducciones de GEI sin comercio por categoría de emisión



Fuente: elaboración propia

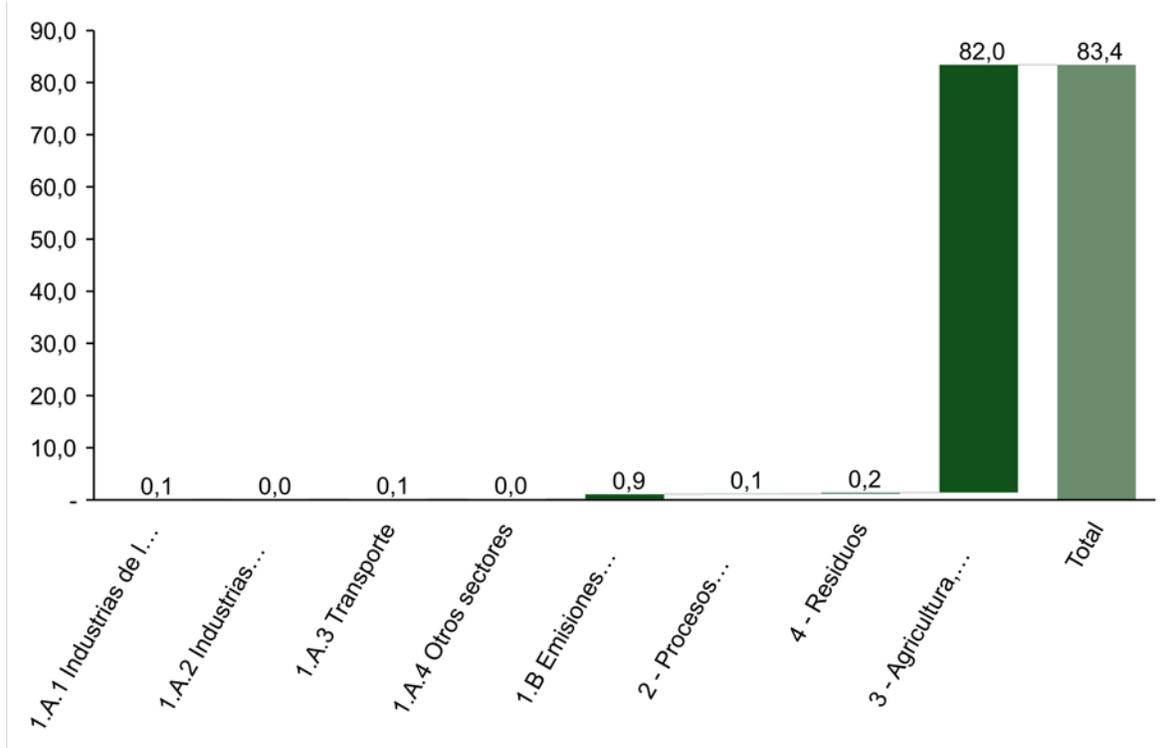
En contraste, las contribuciones del sector Transporte disminuyen en el escenario con comercio al pasar de 20,9 MtCO₂eq a 1,0 MtCO₂eq lo que refleja favorecer reducciones de emisiones más económicas en otros sectores pues la reducción por tonelada en este sector es de 219,10 USD/tCO₂eq. Lo mismo sucede con las emisiones de demanda de energía del sector industria ya que en el escenario con comercio contribuirá con una reducción de 1,8 MtCO₂eq. Las emisiones relacionadas con Procesos Industriales y Uso de Productos también muestran una contribución más baja al compararse con el anterior escenario, pasan de 9,3 MtCO₂eq a 3,1 MtCO₂eq. Las Emisiones Fugitivas logra una reducción de 1,9 MtCO₂eq en el escenario con comercio, este valor es adicional a las reducciones implícitas consideradas como datos de entrada de esta categoría (ver Tabla 2).

Gráfica 4 Reducciones de GEI con comercio por categoría de emisión



Fuente: elaboración propia

Gráfica 5 Reducciones de GEI con comercio + AFOLU



Fuente: elaboración propia

Finalmente, en el escenario de reducciones de GEI con comercio e incluyendo las medidas de mitigación del sector Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU) las reducciones que se encuentran en dicha categoría de emisión a ser de 82 MtCO₂eq (ver Gráfica 5). Esto se debe a que las medidas de la categoría AFOLU usadas en este ejercicio incluyen medidas con un gran potencial y un costo económicos bajo.

4.4 Costos de cumplimiento

Los costos totales de cumplimiento del escenario Reducciones de GEI sin comercio son de 18.256 millones de dólares, equivalente al 5% del PIB anual. Ahora, estos costos se reducen drásticamente para los escenarios de Reducciones de GEI con comercio y en el cual se incluye el sector AFOLU. A partir de los resultados es posible afirmar que proveer un mecanismo de flexibilidad de reducciones de emisiones entre categorías de emisiones reducirá los costos del cumplimiento del compromiso de mitigación.

Tabla 6 Costo de cumplimiento de la reducción de emisiones

	Reducciones de GEI sin comercio	Reducciones con comercio	Reducciones con comercio + AFOLU
Costo de cumplimiento (millones de dólares)	18.256	1.114	320
Participación porcentual en el PIB de Colombia	5%	0,3%	0,1%

Fuente: elaboración propia

5 Conclusiones

Se construyó un modelo de equilibrio parcial con potenciales aplicaciones para la fase de diseño final del PNCTE liderado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Los mecanismos de flexibilidad, como los ofrecidos por un Sistema de Comercio de Emisiones (SCE), son efectivos para reducir considerablemente los costos de cumplimiento de las medidas de mitigación. Por lo tanto, es fundamental promover estos mecanismos para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones de manera económica y eficiente.

En el escenario de Reducciones de GEI con comercio, el precio por tonelada reducida es de 37,70 USD/tCO₂eq lo cual refleja los beneficios económicos del comercio mediante una señal de precios uniforme que se aplica a todos los sectores. En el escenario con comercio e incluyendo al sector AFOLU, el precio por tonelada reducida disminuye a 0,20 USD/tCO₂eq. Esto sugiere que las actividades de mitigación en el sector AFOLU ofrecen opciones de reducción con costos relativamente bajos de acuerdo con la información disponible.

De acuerdo con los precios por tonelada reducida obtenidos en el escenario sin comercio, es necesario implementar un conjunto de estrategias o políticas complementarias en categorías de emisión como Procesos Industriales y Uso de Productos, Transporte y demanda de energía en la Industria manufactureras y construcción. Estas estrategias no solo deben enfocarse en un SCE, sino también en crear condiciones para aumentar la rentabilidad de las estrategias de descarbonización, acelerar el desarrollo, despliegue y adopción de nuevas tecnologías, modernizar infraestructuras y movilizar capital para una reindustrialización responsable.

Al analizar las reducciones del escenario con comercio (ver Gráfica 4) se observa que la categoría de Residuos se convierte en un sector clave para la reducción de emisiones bajo un esquema de comercio. Al igual que el papel que tienen las emisiones relacionadas con las industrias de la energía y su demanda por parte de sectores como Comercial, Institucional, Residencial y Agricultura. En contraste, las contribuciones del sector Transporte y Procesos Industriales y Uso de Productos reflejando una preferencia por reducir emisiones en sectores con costos de mitigación más bajos y señalando desafíos significativos para lograr reducir emisiones en el contexto colombiano.

Los costos totales de cumplimiento del escenario Reducciones de GEI sin comercio son de 18.256 millones de dólares, equivalente al 5% del PIB anual. Estos costos se reducen drásticamente para los escenarios de Reducciones de GEI con comercio y en el cual se incluye el sector AFOLU. Un mecanismo de flexibilidad, como el SCE, puede disminuir significativamente los costos de cumplimiento, permitiendo redirigir recursos hacia otros objetivos sociales y económicos del país como lo es la reducción de la pobreza e inequidad, el aumento del empleo, entre otros. Unos elementos adicionales por considerar son las implicaciones macroeconómicas de estas políticas, como su posible impacto inflacionario, especialmente en sectores expuestos al comercio internacional y el efecto sobre la competitividad internacional. También es necesario considerar el efecto entre las brechas de distintos niveles de ingreso y dichas brechas entre la población rural y urbana.

Los resultados del escenario con comercio incluyendo el potencial del sector AFOLU son un llamado para equilibrar su participación como mecanismo que permita reducciones a costos bajos, pero quizás no da señales contundentes para fomentar el desarrollo de la descarbonización de otras actividades económicas. Además, se deben considerar cuidadosamente los costos marginales de reducciones de medidas relacionadas con las emisiones y absorciones de tierras gestionadas y no gestionadas pues implementar y lograr

reducciones de emisiones debidas de la deforestación y la masificación de la restauración de los bosques son complejas, o al menos el costo económico no necesariamente refleja el esfuerzo y la capacidad técnica, jurídica, social y económica que se requiere para mitigar una unidad de GEI en dichas categorías.

A pesar de los posibles inconvenientes de centrarse en el sector AFOLU, como el riesgo de no promover adecuadamente la descarbonización de la economía, es necesario implementar medidas en este sector. Esto se debe a los impactos positivos que los cambios en el uso de la tierra y las prácticas agrícolas pueden tener como impulsores clave para mejoras a gran escala en otros beneficios ambientales.

6 Referencias

- Alexeeva, V., & Anger, N. (2016). The globalization of the carbon market: Welfare and competitiveness effects of linking emissions trading schemes. . *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 905-930.
- Anger, N., Asane-Otoo, E., Böhringer, C., & Oberndorfer, U. (2016). Public interest versus interest groups: a political economy analysis of allowance allocation under the EU emissions trading scheme. *Int Environ Agreements*, 621–638.
- Banco Mundial. (2022). *Hoja de ruta para lograr la meta de reducción de emisiones de GEI de Colombia bajo la NDC actualizada: Desarrollo de curvas de costo marginal de abatimiento*. Informe de consultoría: Flemish Institute for Technological Research – VITO & Universidad de los Andes, Bogotá.
- Banco Mundial; ICAP. (2016). *Comercio de emisiones en la práctica: Manual sobre el diseño y la implementación de sistema de comercio de emisiones*. Washington, D.C.
- Böhringer, C., Dijkstra, B., & Rosendahl, K. (2014). Sectoral and regional expansion of emissions trading. *Resource and Energy Economics*, 201-225.
- Bohringer, C., Hoffmann, T., Lange, A., Loschel, A., & Moslener, U. (2005). Assessing Emission Regulation in Europe: An Interactive Simulation Approach. *The Energy Journal*, 26(4), 1-21.
- Böhringer, C., Löschel, A., Moslener, U., & Rutherford, T. (2009). EU climate policy up to 2020: An economic impact assessment. EU. *Energy Economics*, S295-S305.
- Burfisher, M. (2011). *Introduction to Computable General Equilibrium Models*. Cambridge University Press.
- Chen, M., & Wang, K. (2023). The combining and cooperative effects of carbon price and technological innovation on carbon emission reduction: Evidence from China's industrial enterprises. *Journal of Environmental Management*, 343.
- Colmer, J., Martin, R., Muuls, M., & Wagner, U. (2024). Does Pricing Carbon Mitigate Climate Change? Firm-Level Evidence from the European Union Emissions Trading System. *Review of Economic Studies*, 1–36.
- D’Arcangelo, F., Levin, I., Pagani, A., Pisu, M., & Johansson, A. (2022). A Framework to decarbonization the Economy. *OECD Economic Policy Papers*(31).
- DIAN. (2024). *RESOLUCIÓN NÚMERO 000007 Por la cual se ajustan las tarifas del Impuesto Nacional a la gasolina y al ACPM, y del Impuesto Nacional al Carbono*.
- DNP. (8 de diciembre de 2023). *Sobre acción climática: instrumentos económicos para el cambio climático*. Obtenido de DNP: https://www.dnp.gov.co/LaEntidad_/subdireccion-general-prospectiva-desarrollo-

nacional/direccion-ambiente-desarrollo-sostenible/Paginas/sobre-accion-climatica.aspx

- Fay, M., Hallegatte, S., Vogt-Schilb, A., Rozenberg, J., Narloch, U., & Kerr, T. (2015). Acting Sooner Rather than Later. En M. Fay, S. Hallegatte, A. Vogt-Schilb, J. Rozenberg, U. Narloch, & T. Kerr, *Decarbonizing Development Three Steps to a Zero-Carbon Future* (págs. 39-54). Washington, DC. doi:10.1596/978-1-4648-0479-3.
- Gobierno de Colombia. (2020). *Actualización de la Contribución Determinada a nivel Nacional de Colombia (NDC)*. Obtenido de <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Colombia%20First/NDC%20actualizada%20de%20Colombia.pdf>
- Haites, E., Bertoldi, P., König, M., Bataille, C., Creutzig, F., Dasgupta, D., . . . Sari, A. (2023). Contribution of carbon pricing to meeting a mid century net zero target. *Climate Policy*, 24, 1-12.
- ICAP. (2024). *Emissions Trading Worldwide: Status Report 2024*. . Berlin.
- IDEAM, PNUD, DNP, Cancillería. (2016). Inventario Nacional y Departamental de Gases de Efecto Invernadero - Colombia. En P. D. IDEAM, *Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. Bogotá D.C.: Punto Aparte.
- Kesicki, F., & Ekins, P. (2011). Marginal abatement cost curves: a call for caution. *Climate Policy*.
- Kesicki, F., & Strachan, N. (2011). Marginal abatement cost curves: confronting theory and practice. *Environmental Science and Policy*, 1195-1204.
- Lilliestam, J., Patt, A., & Bersalli, G. (2020). The effect of carbon pricing on technological change for full energy decarbonization: A review of empirical ex-post evidence. *WIREs Climate Change*, 12(1), 1-21.
- Lim, S., & Prakash, A. (2023). Does carbon pricing spur climate innovation? A panel study, 1986–2019. *Journal of Cleaner Production*, 395, 1-8.
- Rodriguez, A. (2021). *Efectos de elementos de diseño del Programa Nacional de Cupos Transables de Emisión (PNCTE) sobre los precios de los cupos y las emisiones agregadas: Un enfoque experimental*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Geociencias, Medellín, Colombia.
- Sousa, R., Álvarez-Espinosa, A., Rojas, N., Melo, S., Calderon, S., Vazão, C., . . . Riveros, L. (2020). Emissions trading in the development model of Colombia. *Climate Policy*, 1161-1174. doi:10.1080/14693062.2020.1808436
- UNFCCC. (25 de abril de 2024). *Impact of implementation of response measures*. Obtenido de Convención Marco de las Naciones unidas para el Cambio Climático: <https://unfccc.int/topics/mitigation/workstreams/response-measures>
- Uniandes. (2016). *Fichas de las medidas: documento soporte para la iNDC colombiana*. Informe 5 – Informe Final presentado al MADS, Uniandes. Obtenido de

http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/colombia_hacia_la_COP21/Fichas_portafolio_medidas.pdf

van den Bergh, J., & Savin, I. (2021). Impact of Carbon Pricing on Low-Carbon Innovation and Deep Decarbonisation: Controversies and Path Forward. *Environmental and Resource Economics*, 80, 705-715.

Vogt-Schilb, A., & Hallegatte, S. (2014). Marginal abatement cost curves and the optimal timing of mitigation measures. *Energy Policy*, 645-653.