

NOTA TÉCNICA N° IDB-TN-03056

# Escenarios energéticos de transición para Colombia

Ricardo Delgado

Tomás González

Banco Interamericano de Desarrollo  
Departamento de Países del Grupo Andino  
División de Energía



# Escenarios energéticos de transición para Colombia

Ricardo Delgado

Tomás González

Banco Interamericano de Desarrollo

Departamento de Países del Grupo Andino

División de Energía



Catalogación en la fuente proporcionada por la

Biblioteca Felipe Herrera del

Banco Interamericano de Desarrollo

Delgado, Ricardo.

Escenarios de transición energética para los carbones en Colombia / Ricardo Delgado, Tomás González.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 3056)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Carbon dioxide mitigation-Colombia. 2. Climate change mitigation-Colombia. 3. Greenhouse gas mitigation-Colombia. 4. Environmental policy-Colombia. 5. Urban transportation-Environmental aspects-Colombia. 6. Renewable energy sources-Colombia. I. González, Tomás. II. Banco Interamericano de Desarrollo. Departamento de Países del Grupo Andino. III. Banco Interamericano de Desarrollo. Sector de Energía. IV. Título. V. Serie.

IDB-TN-3056

**Palabras clave:** Descarbonización, transición energética, transporte, energías alternativas.

**Códigos JEL:** Q42, Q54, Q58, O13, R41

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2024 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI. 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 Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). 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 y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Rea\_can@iadb.org

**Nota técnica: Escenarios energéticos de transición para Colombia**

**Autores:**

Ricardo Delgado.

Tomás González.

**Centro Regional de Estudios de Energía**

**[creenergia.org](http://creenergia.org)**



**Autores:**

Ricardo Delgado. Centro Regional de Estudios de Energía.

Tomás González. Centro Regional de Estudios de Energía.

## 1 Resumen ejecutivo

Esta nota técnica analiza la situación energética de Colombia, destacando su dependencia de la hidroelectricidad y los combustibles fósiles, así como su potencial para desarrollar energías renovables como la solar y eólica. Utilizando el modelo TIMES-CO, se presentan cuatro escenarios futuros: continuidad de tendencias actuales (BAU), cumplimiento de compromisos climáticos anunciados (AP), neutralidad de carbono para 2050 (NZE-50) y desarrollo sostenible con emisiones netas cero para 2070 (SD-70). El estudio subraya la necesidad de inversiones significativas en infraestructura y tecnología, y la importancia de superar barreras económicas, sociales y regulatorias para lograr una transición energética exitosa y sostenible.

## 2 Contexto energético nacional

Colombia cuenta con una matriz energética diversificada, donde las fuentes renovables, en especial la hidroeléctrica, juegan un papel fundamental. Entre 65 y 70% de la energía eléctrica del país proviene de plantas hidroeléctricas, lo que posiciona a Colombia como un país con bajas emisiones de carbono en su generación de electricidad. Sin embargo, esta alta dependencia de la hidroelectricidad también representa un reto en términos de vulnerabilidad climática, ya que eventos como sequías prolongadas pueden afectar la oferta energética. Sin embargo, la demanda final de energía, sobre todo en el sector transporte, depende en su mayoría de combustibles fósiles como los derivados del petróleo, el gas natural y carbón en el segmento industrial.

Además de la hidroelectricidad, Colombia tiene importantes recursos en energías no renovables, como petróleo, carbón y gas natural, siendo un exportador neto de los dos primeros. El sector de hidrocarburos es un pilar fundamental de la economía colombiana, contribuyendo con un porcentaje importante de los ingresos fiscales y de las exportaciones. Las reservas de petróleo y gas natural no han aumentado significativamente en los últimos años. La relación reservas/producción del petróleo en Colombia ha oscilado recientemente entre 6 y 8 años mientras que esa relación para el gas natural ha mantenido una tendencia a la baja<sup>1</sup>. En ambos casos, la relación reserva producción está actualmente en 7.5 años como se puede observar en la Figura

---

<sup>1</sup> Sin embargo, Ecopetrol ha anunciado el hallazgo de gas natural en yacimientos offshore en el pozo Sirius (antes Uchuva 2) Bloque Tayrona, a 31 kilómetros de la costa del Caribe colombiano. A pesar de ello, estos hallazgos aún no han sido desarrollados.

1. Es importante destacar que en el caso del petróleo la producción actual permite la exportación mientras que en el caso del gas natural la producción es apenas suficiente para atender la demanda interna, con algunos episodios de importaciones puntuales en momentos de alta demanda

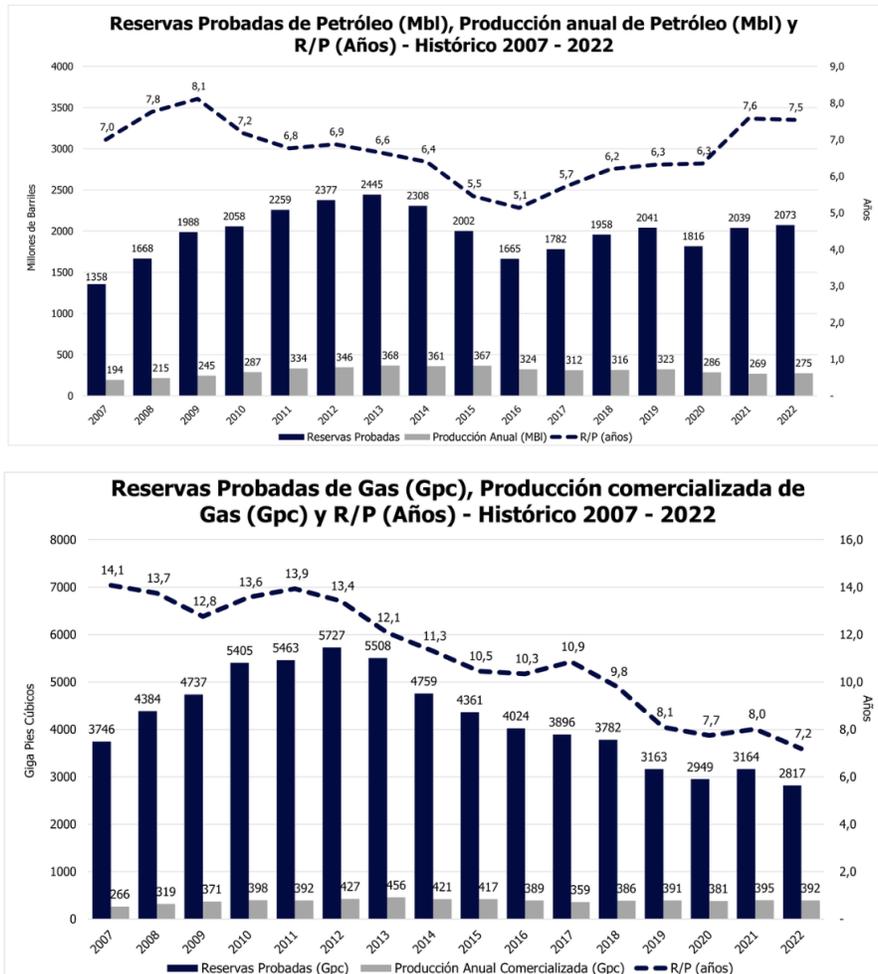


Figura 1. Reservas probadas, producción y factor reservas/producción (R/P) de petróleo (arriba) y de gas natural (abajo) en Colombia para el periodo 2007-2022. Tomado de: <https://www.anh.gov.co/es/operaciones-y-regal%C3%ADas/datos-y-estadisticas/>

Adicionalmente, es importante resaltar que Colombia dispone de potenciales altos para el aprovechamiento del recurso solar y el eólico, tanto *onshore* como *offshore*, con algunas regiones del país ofreciendo calidades de recurso muy superiores al promedio mundial. En los últimos años, Colombia ha avanzado hacia la diversificación de su matriz energética con el impulso de fuentes de energía renovable no convencionales, como la solar y eólica y se ha planteado la posibilidad de aprovechar esos potenciales para incursionar en la industria, con vocación de exportación, de hidrógeno verde que es aquel producido a partir de electricidad generada con fuentes renovables.

El gobierno colombiano ha establecido metas claras en su compromiso con la transición energética. Para 2030, el país se propone incrementar sustancialmente la capacidad instalada a partir de energías renovables no convencionales y ha dado señales de política en esa dirección, lo que ha impulsado nuevas inversiones en proyectos solares y eólicos. A pesar de lo anterior, los retos asociados con el licenciamiento ambiental, social ha retrasado el despliegue de la infraestructura no sólo de generación sino también la de transmisión y distribución eléctrica. También se han realizado esfuerzos sostenidos por promover y aumentar la eficiencia energética, la electrificación del transporte, la masificación del transporte público y la movilidad activa y por llevar fuentes energéticas limpias a las poblaciones que están en pobreza energética. Sin embargo, el gobierno colombiano ha dedicado la mayor parte de sus esfuerzos de transición con acciones dirigidas principalmente a la oferta, incluso a la oferta exportadora de energéticos, con un menor nivel de actividad en los incentivos para el desarrollo de las transiciones en la demanda de energía.

Pero el reto de la transición no está exclusivamente ligado al suministro y uso de la energía en el país, que sería casi suficiente para dar cumplimiento a los objetivos de acción climática nacional, sino que tiene que ver con la necesidad de aprovechar y sustituir la inversión extranjera directa, los ingresos fiscales y los empleos generados por la economía de los combustibles fósiles en previsión a un agotamiento de las reservas o a posibles condiciones desfavorables en el marco de una transición energética global.

El Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 destaca la importancia de una transición energética justa, que incluya la participación de las comunidades locales, especialmente en regiones productoras de energía fósil, como la Guajira, que es clave para los proyectos de energía eólica. Además, se busca un equilibrio entre la descarbonización de la economía y la sostenibilidad económica del sector de hidrocarburos, que sigue siendo una fuente significativa de ingresos.

En línea con los compromisos internacionales, Colombia ha ratificado su intención de ser carbono neutral para 2050 y ha implementado políticas para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. A continuación, se destacan algunas de las políticas más relevantes:

- Ley 2099 de 2021 (Ley de Transición Energética): Esta ley facilita la inversión en energías renovables y fomenta la generación distribuida. También busca incentivar la movilidad eléctrica, las tecnologías limpias y la eficiencia energética.
- Ley 2169 y NDC (Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional): En el marco del Acuerdo de París, Colombia ha aumentado su ambición climática, comprometiéndose a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 51% para 2030.
- Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC): Este plan aborda los riesgos climáticos que enfrenta el país y busca reducir la vulnerabilidad del

sector energético frente a fenómenos climáticos extremos, como el Niño y la sequía.

- E2050: La Estrategia de Largo Plazo para la Bajas Emisiones de Carbono en Colombia, conocida como E2050, es la hoja de ruta para alcanzar la carbono neutralidad. Incluye acciones para una transición energética sostenible, el uso eficiente de recursos y la electrificación de sectores como el transporte.

En general, el sector energético colombiano enfrenta varios desafíos, entre ellos:

- Dependencia de hidrocarburos: Aunque el país avanza en su transición energética, sigue siendo dependiente de los ingresos derivados del petróleo, el gas natural y el carbón. Las fluctuaciones en los precios internacionales afectan la estabilidad económica. Siendo el carbón y el petróleo dos de las principales exportaciones del país, existe una alta vulnerabilidad frente a la eventual caída en los precios internacionales y las demandas de estos energéticos como resultado de una acción climática global en procura de alcanzar los objetivos climáticos del planeta.
- Vulnerabilidad climática: La dependencia de la hidroelectricidad expone al país a riesgos derivados del cambio climático, lo que hace necesario seguir fortaleciendo la diversificación de fuentes energéticas.
- Conflictos sociales: La expansión de proyectos energéticos, especialmente en zonas rurales, ha generado tensiones con las comunidades locales, que exigen mayor participación en la toma de decisiones y en los beneficios de estos proyectos.

El sector energético es uno de los motores clave de la economía colombiana, con una influencia directa en el PIB y el empleo. El desarrollo de fuentes renovables y tecnologías limpias puede generar empleos de calidad y promover el crecimiento en regiones tradicionalmente marginadas. Sin embargo, la transición también conlleva retos sociales, ya que las comunidades que dependen de los hidrocarburos pueden verse afectadas por la reducción gradual de su relevancia económica.

### 3 Modelo, supuestos de modelaje y escenarios

En este trabajo se evaluó la composición de la canasta energética que permite, al mínimo costo, atender la demanda de energía y satisfacer las restricciones definidas según el escenario considerado (incluyendo restricciones de disponibilidad tecnológica, de emisiones de contaminantes, de reservas y disponibilidad de recursos, entre otros). Una vez identificados los requerimientos del sector energético compatibles con los diferentes escenarios de descarbonización, es posible identificar los grandes cambios que los hacen posibles. Para el análisis de los diferentes futuros posibles se construyeron cuatro escenarios, que se presentarán en detalle más adelante, y se modeló cada uno de ellos utilizando el modelo TIMES-CO.

### 3.1 El modelo TIMES-CO

El modelo TIMES-CO es un modelo de optimización lineal que representa la totalidad del sector energético colombiano. Este modelo tiene la ventaja de integrar en una plataforma única tanto la representación de la oferta como de la demanda de energía. Se tiene en cuenta la disponibilidad de recursos energéticos (reservas de fósiles y potenciales de energías renovables), los precios internacionales para la exportación e importación de energía, las características técnicas y económicas de todas las tecnologías utilizadas en el sistema energético, y las demandas de energía útil que debe ser satisfecha. En la Figura 2 se presenta el esquema general del sistema energético de referencia representado en el modelo TIMES-CO. Las entradas del modelo son las demandas útiles que deben ser satisfechas en todos los periodos del horizonte de modelamiento. Algunos ejemplos de demandas útiles son la cantidad de energía calórica utilizada por los hogares para la cocción, la cantidad de kilómetros recorridos por los pasajeros, la iluminación consumida por el sector comercial o el calor indirecto utilizado en las diferentes industrias. Así, la proyección de la demanda de energéticos se calcula endógenamente y tiene en cuenta las posibilidades de sustitución como resultado de la disponibilidad de recursos, de las eficiencias, los costos relativos y las demás restricciones consideradas.

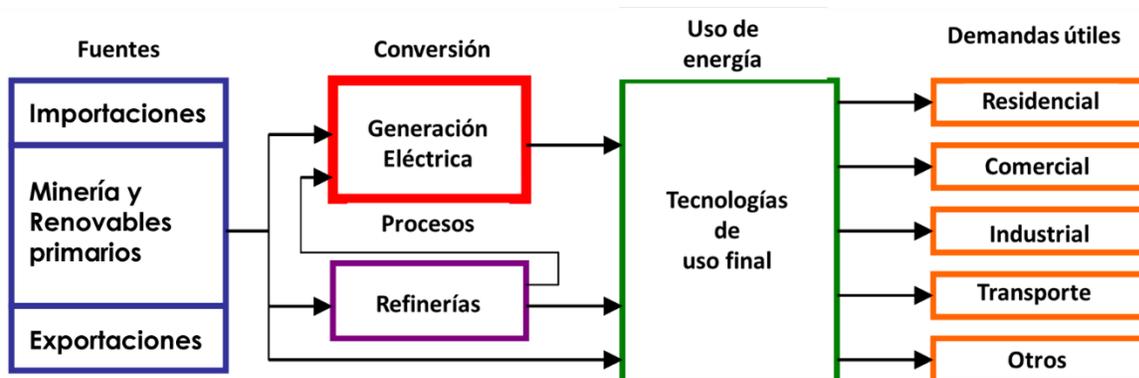


Figura 2. Diagrama de bloques de un sistema energético modelado en TIMES.  
Fuente: Elaboración propia CREE.

Las demandas útiles se proyectan utilizando factores de crecimiento propios de cada escenario modelado como el PIB potencial, el PIB sectorial, la población, las mejoras en la intensidad energética de los sistemas productivos como resultado de cambios en las actividades productivas, entre otros. El modelo selecciona las mejores tecnologías para atender esas demandas útiles (estufas, calderas, vehículos) y las correspondientes fuentes de energía: producción de fósiles, comercio exterior de energéticos, producción de electricidad y procesos de refinación y transformación de energía.

Las acciones de mitigación relacionadas con el uso de tecnologías más eficientes, combustibles con menor intensidad de carbono, producción de electricidad con energías renovables, uso de biomasa y tecnologías de captura y almacenamiento de

carbono pueden ser evaluadas utilizando este modelo. Al ser un modelo de optimización, las demandas siempre deben ser satisfechas aún en presencia de precios más altos para la energía, dependiendo de las condiciones de cada escenario.

En el modelo base, el periodo de análisis es 2015-2050, teniendo a los años 2015 y 2018 como años de calibración. Cada periodo de tiempo (año) está dividido en cuatro fracciones (denominadas estaciones) para poder capturar las variaciones típicas en la generación eléctrica con recurso hídrico a lo largo del año. A su vez, cada periodo estacional está dividido en perfiles semanales lo que permite modelar las diferencias en los consumos de electricidad entre los días laborales, sábados y domingos; y, finalmente, cada uno de esos perfiles semanales están divididos en cinco bloques horarios para tener un perfil linealizado de la curva diaria de demanda eléctrica típica y de las variaciones intradiarias en la oferta de electricidad a partir de energías renovables intermitentes. Del mismo modo, la generación eléctrica con recursos intermitentes tiene un factor de disponibilidad que varía con la estación del año y con la hora del día. Para los demás recursos energéticos, tanto la oferta como la demanda se modelan con una única partición anual.

En resumen, TIMES-CO modela el sistema energético colombiano en un horizonte que comprende varias décadas donde cada año modelado está dividido en 60 periodos de diferente duración. Esta subdivisión se hace primordialmente para representar de la mejor manera posible las interacciones en el sector eléctrico sin pretender convertir a TIMES-CO en un modelo de despacho eléctrico.

En la versión del modelo TIMES-CO utilizado para este estudio, el país es una región única y no se hacen distinciones del origen o destino de las exportaciones, siendo que todas corresponden a la región "Resto del Mundo".

Las tecnologías (también llamadas procesos) son representaciones de dispositivos físicos que transforman las energéticos en otros energéticos o energéticos en energía útil para atender las demandas. Los procesos pueden ser fuentes primarias de energía (por ejemplo, procesos de extracción, procesos de importación) o actividades de transformación (plantas de generación eléctrica, refinerías) o dispositivos de demanda de uso final como automóviles y sistemas de refrigeración, etc. Las curvas de evolución tecnológica de las diferentes tecnologías hacen parte de la definición de los escenarios de futuro evaluados. Lo anterior es de particular interés, sobre todo en el caso de las tecnologías que actualmente se encuentran en desarrollo, como la generación eléctrica solar y eólica, la captura y almacenamiento de carbono, los vehículos eléctricos, las tecnologías para producción y uso de hidrógeno, entre otros.

En el modelo se consideran dos tipos de energéticos primarios: fósiles y renovables. Los dos pueden ser producidos localmente, sujeto a las disponibilidades consideradas en cada a ser evaluado y a los costos de producción determinados por las tecnologías existentes o futuras para su disposición. Los energéticos primarios fósiles considerados en TIMES-CO son el carbón, gas natural y petróleo. Cada uno de estos energéticos están caracterizado por unas reservas actuales e incorporaciones futuras y los costos de producción asociados (siendo estos variables de escenario). También,

para el caso de los energéticos fósiles primarios se modela la tecnología de importación o exportación. Por el contrario, los energéticos renovables primarios no son objeto de comercio internacional. Entre los recursos renovables primarios considerados en el modelo se cuentan: el recurso hídrico, el viento, el sol y la biomasa. Estos recursos se caracterizan con una disponibilidad anual, estacional o intradiaria según corresponda.

Se han modelado las refinerías principales del país y estas se diferencian en las capacidades de procesamiento, las flexibilidades en sus dietas, en los niveles de producción y las eficiencias de transformación. Los energéticos derivados del petróleo pueden obtenerse, en el modelo, a través de los procesos de refinación y son objeto de comercio internacional.

En el modelo también se representan las tecnologías genéricas de producción eléctrica con recurso hídrico, viento, gas natural, carbón, combustibles líquidos y sistemas de cogeneración. Cada una de estas tecnologías está caracterizada por sus costos, capacidad instalada, eficiencias y disponibilidad anual, estacional, o intradiaria.

En TIMES-CO se representan los consumos finales de los sectores residencial, comercial, industrial, transporte y otros (extracción de minerales, agricultura, construcción). Cada uno de esos sectores está caracterizado por unos requerimientos de servicios energéticos que deben ser satisfechos. Cada uno de esos sectores está dividido en categorías y en sus demandas de energía típicas.

### 3.2 Descripción de los escenarios modelados

Uno de los objetivos del presente trabajo es la generación y análisis de información de lo que podría ser el futuro energético en Colombia bajo diferentes escenarios en los que se considere el efecto esperado en la economía nacional de la ocurrencia de algunos cambios y los niveles de estos. Con esto en mente se construyeron cuatro escenarios para explorar los impactos de la realización de varias variables clave.

#### 3.2.1 Escenarios modelados

Los cuatro escenarios modelados pueden definirse a partir de las tres sendas de emisión descritas anteriormente. A cada escenario (que corresponde a una senda de emisión) se le asoció una realización de evolución de los precios internacionales de la energía, de las tecnologías y un escenario base de crecimiento económico. De esta manera, se construyeron tres escenarios, que se describen a continuación, y que están inspirados en los escenarios formulados por la Agencia Internacional de Energía en su publicación *World Energy Outlook 2021*<sup>2</sup>.

- **Escenario “Business As Usual” (BAU).** En este escenario el comportamiento futuro de cada una de las variables, que se presentan más adelante, tiene un comportamiento que continúa la tendencia histórica y no se establece ningún tipo de restricciones a las emisiones de gases de efecto invernadero.
- **Escenario “Políticas Anuncias” (AP).** Está inspirado en el escenario de Compromisos Anunciados (**APS**, del inglés *Announced Pledges Scenario*) de

---

<sup>2</sup> IEA World Energy Outlook 2021; World Energy Outlook; IEA: Paris, 2021.

*World Energy Outlook 2021*<sup>3</sup>, que asume que todos los compromisos climáticos asumidos por los gobiernos de todo el mundo, incluidas las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) y los objetivos de emisiones netas cero a largo plazo, se cumplirán en su totalidad y a tiempo. El escenario explora un futuro en el que se cumple con un nivel de emisiones en el sector energético que sería compatible tanto con la meta NDC en 2030 como la meta de carbono neutralidad en 2050.

- **Energía para Neto Cero en 2050:** Está inspirado en el escenario de Emisiones Netas Cero para 2050 (**NZE**, del inglés *Net Zero Emissions by 2050*) de *World Energy Outlook 2021*<sup>4</sup>, que establece un camino estrecho pero alcanzable para que el sector energético mundial alcance los ODS relacionados a energía (antes mencionados), y alcance las emisiones globales de CO<sub>2</sub> netas cero máximo hasta 2050. En el caso de Colombia este escenario tiene el mismo nivel de ambición de reducción de emisiones que en el escenario **AP** pero difiere de ese en algunos supuestos clave de escenario, que no dependen exclusivamente de comportamiento internos del país, como la velocidad de la evolución de la tecnología, los precios internacionales de la energía y su impacto sobre los niveles de crecimiento económico.
- **Escenario “Desarrollo Sostenible 2070” (SD70).** Está inspirado en el escenario de Desarrollo Sostenible (**SDS**, del inglés *Sustainable Development Scenario*) de *World Energy Outlook 2021*<sup>5</sup>, que logra en el largo plazo los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODSs) de las Naciones Unidas relacionados con energía se cumplan, es decir, el acceso universal a la energía y las principales mejoras en la calidad del aire. En este escenario se alcanza las emisiones globales de CO<sub>2</sub> netas cero máximo en el 2070.

### 3.2.2 Supuestos de modelaje y variables de escenario

Para la modelación de los escenarios de futuro energético en Colombia se partió de la existencia de una base tecnológica, de la caracterización de las particularidades del sector en Colombia (como los niveles de reservas de fósiles y disponibilidad de recursos renovables) y de la realización de valores dependientes de cada escenario para los precios internacionales de la energía, la evolución de los costos de las tecnologías, los niveles de ambición climática locales y globales y la senda de crecimiento económico. A continuación, se presentan las principales variables que conforman los distintos escenarios.

- **Precios internacionales del petróleo, gas natural y carbón.** Se plantearon cuatro trayectorias, una por escenario, de evolución de precios internacionales para el comercio de hidrocarburos, usando como referencia las trayectorias calculadas en *World Energy Outlook 2021*<sup>6</sup>. La Figura 3 presenta, a modo de ejemplo, las trayectorias normalizadas con respecto al nivel de 2021 de los

---

<sup>3</sup> Idem.

<sup>4</sup> Idem.

<sup>5</sup> Idem.

<sup>6</sup> Idem.

precios internacionales de carbón y petróleo utilizadas en cada uno de los escenarios.

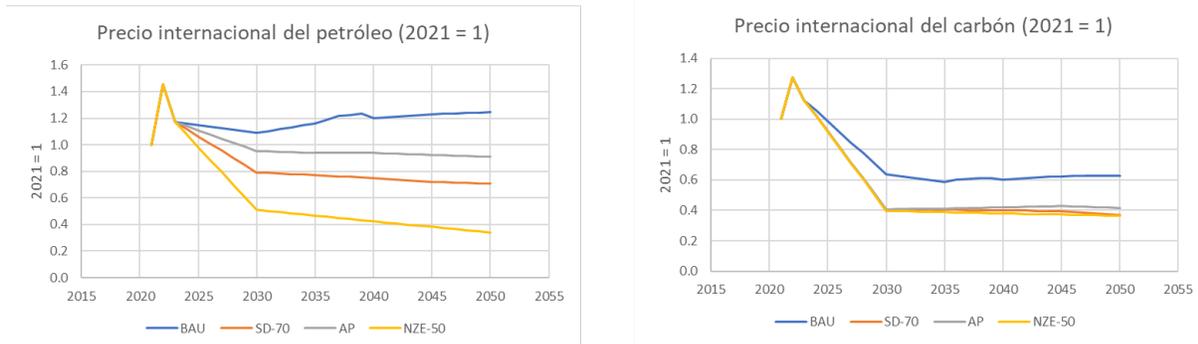


Figura 3. Evolución de los precios internacionales para el petróleo y el carbón con respecto al nivel de 2021 en los diferentes escenarios.

- Se realizaron supuestos sobre la razón de aprendizaje tecnológico y economías de escala que inciden en **la reducción del costo de capital de las tecnologías para la transición energética**: solar fotovoltaica, eólica *onshore* y *offshore*, baterías para aplicaciones estacionarias de generación eléctrica, vehículos híbridos, vehículos eléctricos con batería, células de combustible en vehículos de carga, y electrolizadores para producción de hidrógeno. Estas trayectorias fueron construidas a partir de datos de *World Energy Outlook 2021*<sup>7</sup> y se presentan, de manera ilustrativa en la Figura 4 y en la Figura 5. Se observa que, de manera consistente, los escenarios de mayor ambición climática y corresponden a los que consideran mayores reducciones en los costos de estas tecnologías, siendo que, en todos los casos, el escenario BAU es el que asume menores tasas de disminución de costos. Adicionalmente, los costos variables de operación y mantenimiento de las tecnologías (sin incluir combustibles) así como los costos fijos varían de manera consistente con el supuesto de evolución del capex en cada escenario.

<sup>7</sup> Idem.

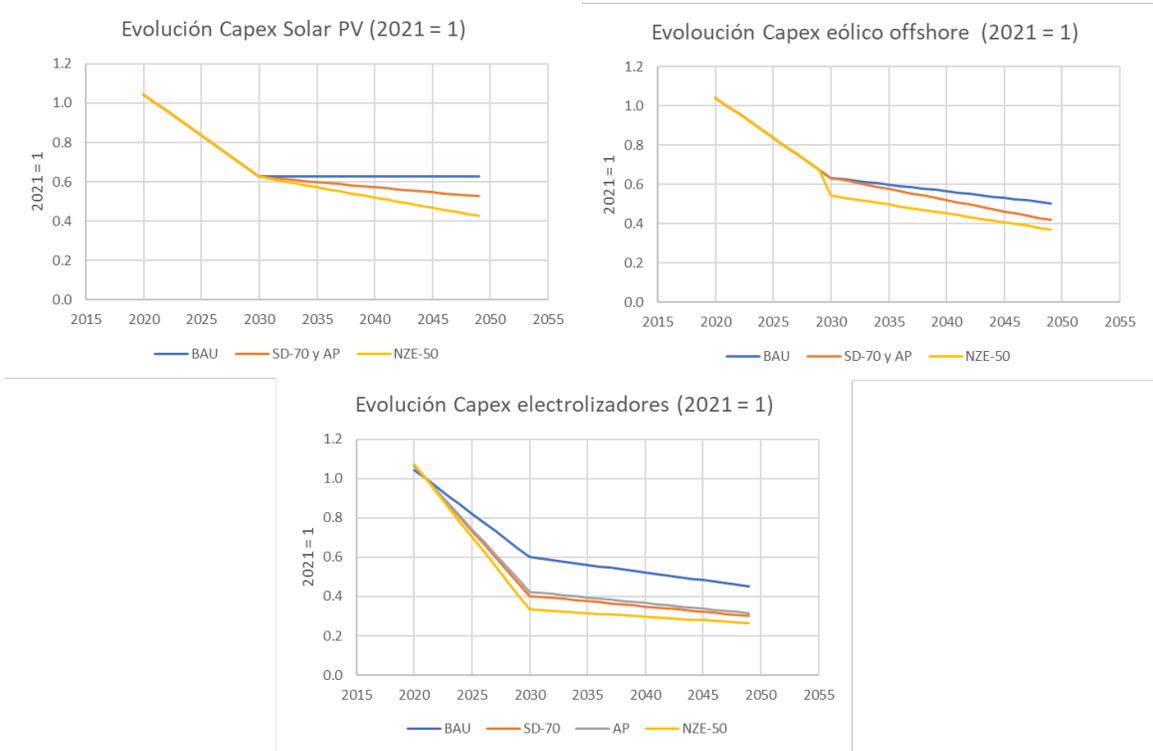


Figura 4. Evolución de los costos de inversión para las tecnologías de generación eléctrica solar, eólica offshore y para los electrolizadores con respecto al nivel de 2021 en los diferentes escenarios.

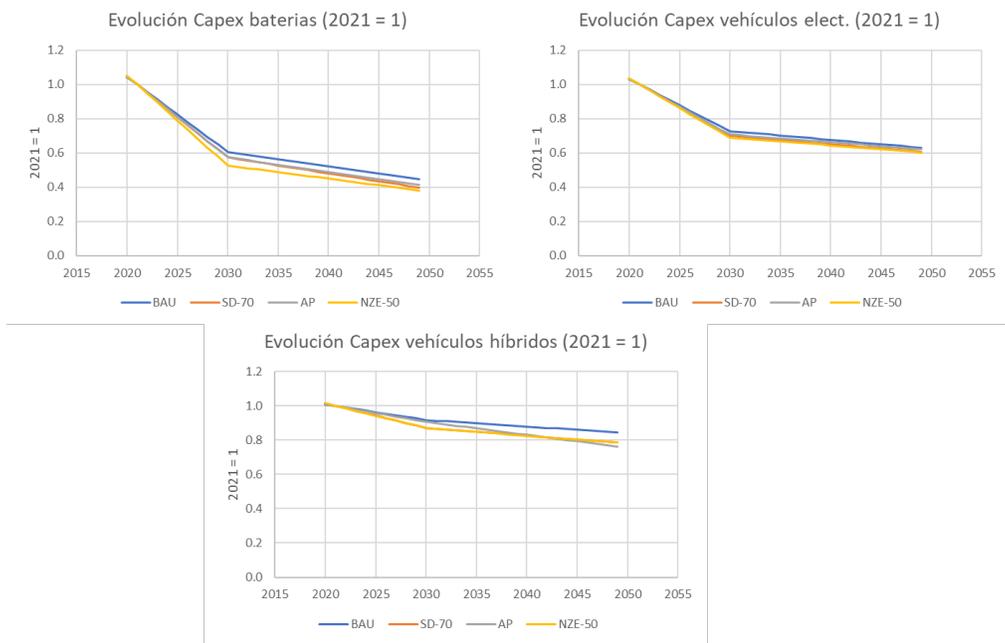


Figura 5. Evolución de los costos de inversión para las tecnologías de almacenamiento eléctrico, vehículos eléctricos de batería y vehículos híbridos con respecto al nivel de 2021 en los diferentes escenarios.

- Restricción a las emisiones de gases de efecto invernadero:** Se definieron tres escenarios de emisión de gases de efecto invernadero por quema de combustibles con fines energéticos. En el primer caso, se asume que no hay una restricción o límite a las emisiones. Este es el caso del escenario BAU. En segundo lugar, se definió una trayectoria que alcanza una disminución de las emisiones consideradas equivalente al 90% con respecto al nivel de 2015 en 2050. Este segundo caso es la restricción de emisiones aplicada a los escenarios AP y NZE-50, en el entendido que una descarbonización del 90% más compensaciones (forestales, mercado de carbono) permitiría lograr la carbono neutralidad. Finalmente, se consideró la posibilidad de alcanzar ese carbono neutralidad un par de décadas después (2070).
- Producto interno bruto (PIB):** El BID calculó, para cada escenario, trayectorias de PIB nacionales y sectoriales, usando un modelo de equilibrio general computable (CGE) que tuvo en cuenta la trayectoria del precio del petróleo en los tres escenarios descritos por el *World Energy Outlook 2021*. La Figura 6 presenta las sendas de crecimiento del PIB potencial, consistente con los crecimientos de PIB sectorial, utilizadas para proyectar la demanda de energía final en cada uno de los escenarios modelados. Se observa que los escenarios restringidos en emisiones presentan tasas de crecimiento de la actividad económica menores que el escenario BAU ya que los requerimientos de inversión y, en algunos casos, los mayores costos de la energía penalizan el crecimiento a pesar de las ganancias en eficiencia energética inducidas por las tecnologías de menor carbono intensidad.

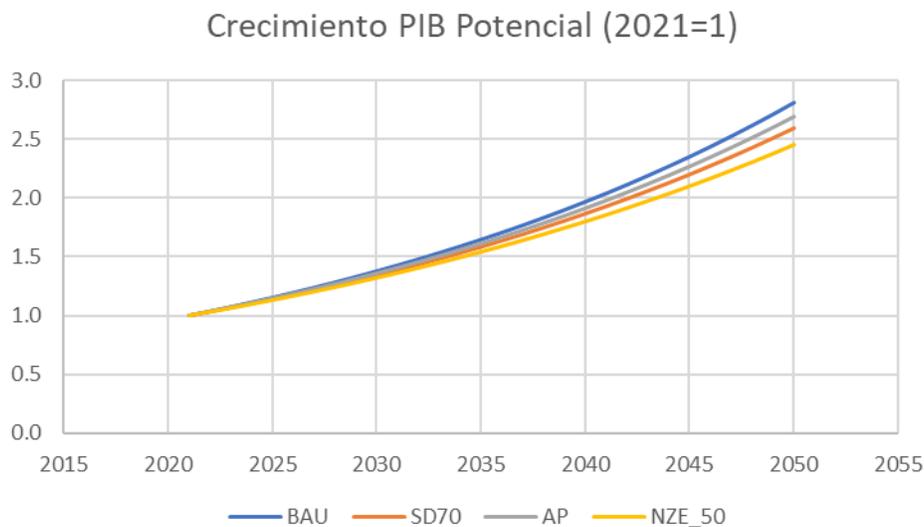


Figura 6. Supuestos de evolución del PIB potencial de Colombia con respecto al nivel de 2021 en los diferentes escenarios.

#### 4 Resultados

En esta sección se presentan los resultados de la modelación de los cuatro escenarios presentados. En primer lugar, se presentan los perfiles de balance entre producción, demanda y comercio internacional de carbón y petróleo en los cuatro escenarios considerados y el panorama para el sector eléctrico tanto en composición del parque de generación como en la producción eléctrica en los diferentes escenarios. En segundo lugar, se presenta la conformación del consumo de energía en los sectores finales de energía y se continúa con la presentación de los principales hallazgos en los costos asociados. Por último, se presentan los hallazgos en cuanto a los niveles de emisión de gases de efecto invernadero resultantes.

#### 4.1 Oferta de energía

Los diferentes escenarios modelados tienen en común el supuesto de disponibilidad de recursos de petróleo, gas natural y carbón. Estos recursos tienen asociados sus costos de producción (y que varían con el tipo de recurso y tecnología requerida para extraerlo) que, en condiciones favorables de precios internacionales, permitirían la adición de estos a las reservas y su posterior extracción. En otras palabras, los cuatro escenarios consideran que hay los mismos volúmenes de petróleo y gas disponibles en el subsuelo, pero su extracción depende de la competitividad de esos recursos en los mercados internacionales y la demanda para consumo interno.

La Figura 7 presenta el balance de petróleo para los cuatro escenarios modelados en los años 2021, 2030, 2040 y 2050. En primer lugar, vale la pena observar que las exportaciones de crudo (que se representan con valores negativos para reflejar la dirección del flujo energético hacia afuera del país) se hacen nulas en el escenario NZE-50 a partir de 2040. Este comportamiento responde al supuesto de precios internacionales de petróleo que, en ese escenario, es bajo (ver Figura 3). Con petróleo barato en los mercados internacionales, la producción nacional no sería competitiva por sus costos mayores que el precio de venta y, de igual manera, la importación (dejando de lado consideraciones tributarias, de balanza de pagos, de regalías, entre otros) sería el origen de mínimo costo para atender la demanda. A su vez, en ese escenario se observa que la demanda interna de petróleo no se extingue antes, si bien si disminuye de manera sostenida ya desde el 2021.

Los otros tres escenarios tienen comportamientos similares en los que los recursos de petróleo nacional son competitivos y las exportaciones se mantienen aún en el escenario AP que considera una alta ambición climática. Esta ambición, reflejada en una restricción a las emisiones más estricta, hace que el consumo interno de petróleo disminuya en el tiempo con lo que se podrían mantener mayores flujos de exportación. Así, este escenario AP es un escenario en el que manteniendo bajas las emisiones nacionales por uso de energía se tienen las mayores exportaciones del petróleo disponible.

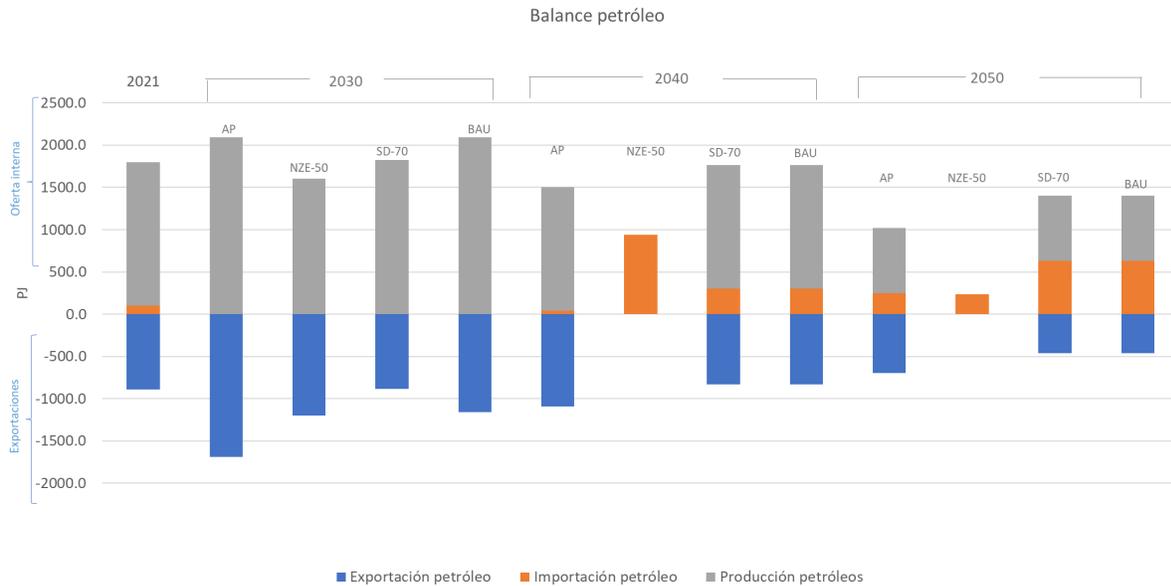


Figura 7. Oferta interna y exportaciones (valores negativos para las exportaciones indican la “salida” del energético del país) de petróleo en Colombia para los cuatro escenarios modelados.

Con respecto al gas natural, la Figura 8 presenta el balance de este energético en los años 2021, 2030, 2040 y 2050. La situación para este energético es más homogénea en los cuatro escenarios modelados. En todos, la demanda de gas natural es creciente hasta 2040, momento en el que las diferencias en los límites a las emisiones llevan a cambios en las tendencias de consumo. Por un lado, están los escenarios que buscan alcanzar la carbono neutralidad en 2050 (AP y NZE-50). En estos escenarios, la carbono neutralidad, que implica necesariamente un alejamiento de los combustibles fósiles, lleva a una disminución del uso de gas natural, claramente observable hacia mediados de siglo. Este comportamiento de aumento en el consumo en las próximas dos décadas y una disminución posterior sostenida implica que el pico en la demanda de gas natural en Colombia debería alcanzarse alrededor de 2040. Este comportamiento, diferente a los de los otros combustibles fósiles, en el que aún hay espacio para el crecimiento aún en los escenarios de mayor restricción de emisiones, refleja el hecho de que el gas natural juega un papel temporal de puente entre los fósiles más carbono intensivos y los nuevos energéticos y tecnologías de cero emisiones. Es importante resaltar tanto el potencial de crecimiento del gas natural como la necesidad de alcanzar un pico e iniciar la disminución de consumo para permanecer en escenarios que busquen alcanzar la carbono neutralidad hacia mediados de siglo.

Es de esperar que un comportamiento similar, de aumento de consumo y posterior reducción, se de en el escenario SD-70 después de 2050, mientras que en el escenario BAU el único limitante para el uso de gas natural es su disponibilidad y competitividad relativa frente a otros energéticos. Finalmente, vale la pena resaltar que, al igual que se observó en el caso del petróleo, los precios internacionales hacen que algunas

reservas de gas natural en el escenario SD-70 no se lleguen a extraer y se sustituyan por importaciones, como se observa al final del horizonte de estudio.

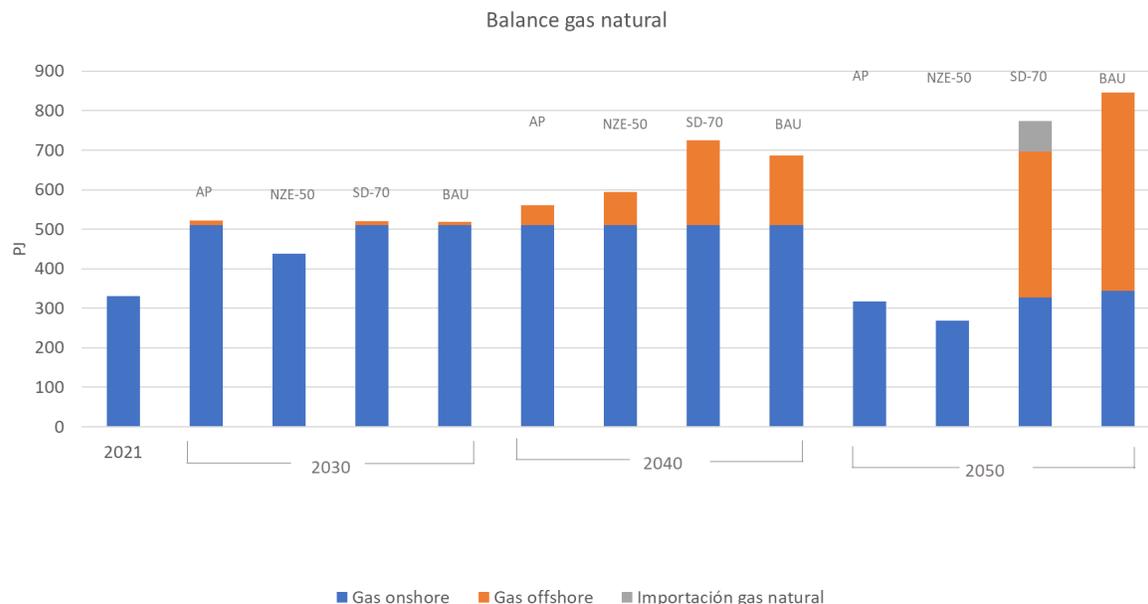


Figura 8. Oferta interna de gas natural en Colombia para los cuatro escenarios modelados.

#### 4.1.1 Generación eléctrica

En esta subsección se presentan los resultados que resumen la situación para el sector de generación eléctrica en los futuros explorados para Colombia. A diferencia de lo que ocurre con el petróleo, en donde el nivel de producción depende de los precios internacionales y los costos de producción, casi que independientemente de las restricciones de emisiones o los costos de las tecnologías (variando, eso sí, el destino final del crudo y sus derivados entre consumo interno o exportación), y de lo que sucede con el gas natural, en donde en algunos casos hay comportamientos siempre crecientes y en otros se alcanzan picos de demanda, el sector eléctrico siempre es creciente. Sin embargo, se puede observar que la restricción de emisiones de los escenarios considerados tiene un alto impacto en la velocidad y niveles de crecimiento del sector eléctrico.

Como se presentará más adelante, en la medida en que la ambición climática aumenta, la electrificación de la economía y el uso de fuentes de cero emisiones para la producción de esa electricidad crecen más rápidamente. Esto ocurre porque la electricidad limpia es el energético que, en la medida de la disponibilidad tecnológica y los costos lo permiten, termina por sustituir a la mayoría de los combustibles fósiles, particularmente en el transporte terrestre.

En la Figura 9 se presenta la composición de la capacidad instalada de generación en los cuatro escenarios modelados. Es importante aclarar que, como parte de los

supuestos de modelaje, ninguna de las plantas de generación existentes hoy en día se retira antes de 2030 y las nuevas plantas instaladas se modelan teniendo en consideración una vida útil que implica un límite temporal para el retiro y reemplazo de esos generadores. En primer lugar, se puede observar las grandes diferencias que hay en las capacidades instaladas de generación entre los diferentes escenarios. El escenario BAU es el que tiene el menor crecimiento en la capacidad instalada de generación a pesar de que en este escenario se asumieron mayores tasas de crecimiento de la economía y, por lo tanto, es el escenario que tiene el mayor crecimiento de las demandas a ser atendidas (como se presentó en la Figura 6, en los supuestos de crecimiento del PIB potencial). En ese escenario, la capacidad instalada de generación crece a una tasa anual promedio del 4.0% para llegar a triplicar el parque de generación en 2050 con respecto a 2021. En el otro extremo están los escenarios más restringidos en emisiones en los que la capacidad instalada total de generación llega a 116 y 139 GW con tasas anuales de crecimiento del 6.1% y 6.7%, respectivamente para AP y NZE-50 en 2050.

El escenario SD-70, tiene componentes que lo asemejan a los dos extremos de resultados de los escenarios. Por un lado, el crecimiento de la capacidad instalada es mayor que en el escenario BAU, pero mucho más modesta que en los otros dos escenarios. Por otro lado, en el tipo de recursos instalados, el escenario SD-70 se asemeja más a los dos escenarios ambiciosos de descarbonización que al BAU. Así, la fracción de la capacidad instalada de generación que opera con combustibles fósiles pasa de alrededor de un cuarto de la capacidad total nacional a menos de un 7% en los tres escenarios de mayor restricción de emisiones, mientras que en BAU ese componente crece hasta llegar a ser cerca de un tercio de la capacidad instalada total en 2050. El crecimiento en la capacidad instalada, junto con una disminución de la capacidad instalada que opera con combustibles fósiles en los tres escenarios (AP, NZE-50 y SD-70) implica, en primera medida, el aprovechamiento del potencial hídrico del país. Un aprovechamiento que enfrenta, actualmente, grandes oposiciones por restricciones ambientales y por consideraciones sociales, primordialmente las asociadas con los requerimientos y oposiciones de los habitantes de las zonas que se verían afectadas por el desarrollo de proyectos de generación hidroeléctrica.

También es importante señalar que, de acuerdo con los supuestos de modelaje presentados en la Figura 4, a pesar de que AP y NZE-50 tienen los mismos niveles máximos de emisión de gases de efecto invernadero, las diferencias en los costos de inversión de las tecnologías renovables llevan a que la generación solar tenga una participación dominante en la matriz del escenario NZE-50 y una participación más equilibrada entre solar y eólico en el escenario AP, siendo los niveles de requerimiento de Capex la principal explicación para esas diferencias.

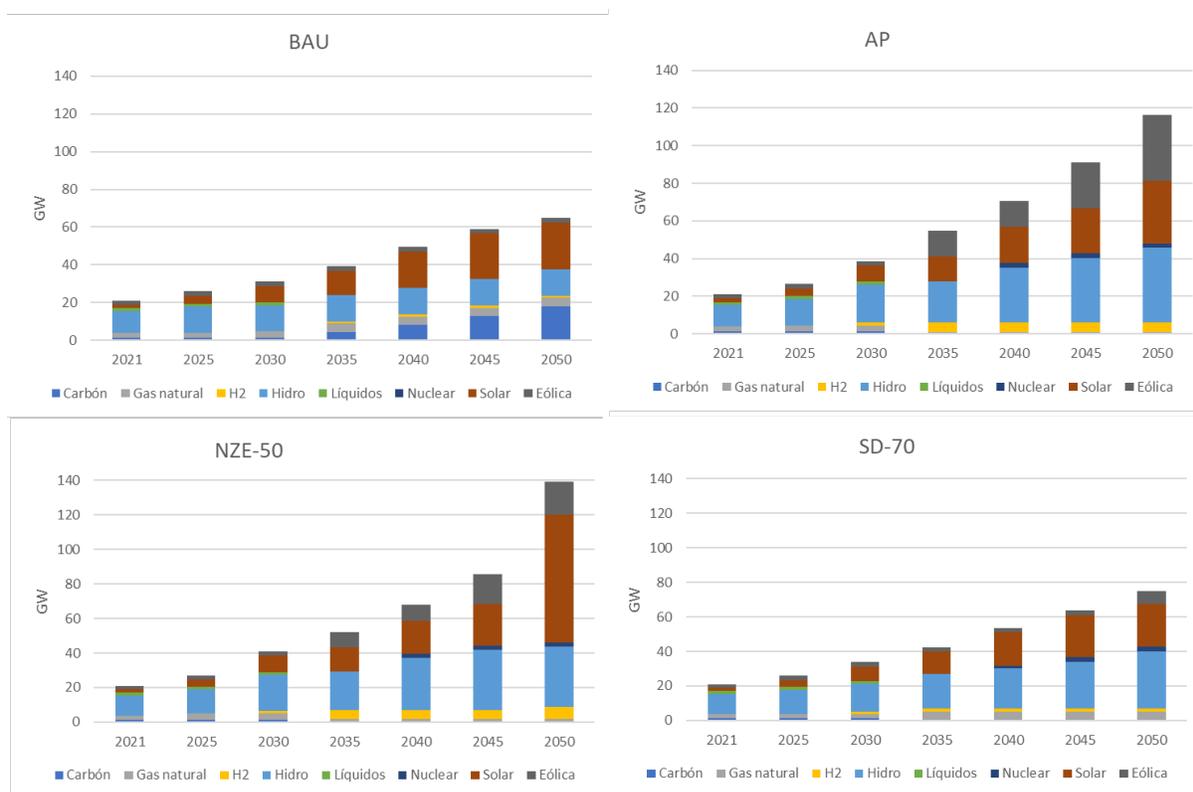


Figura 9. Capacidad instalada de generación eléctrica en Colombia para los cuatro escenarios modelados.

Revisando la generación total de electricidad, que se presenta en la Figura 10, al igual que ocurre con la capacidad instalada, el crecimiento está marcado, y diferenciado entre escenarios, por la restricción de emisiones. Hay tres aspectos que vale la pena comentar. En primer lugar, se observa que el escenario BAU, el que no tiene restricción a las emisiones, requiere más generación de electricidad en 2050 que el escenario SD-70 que tiene una restricción ambiental intermedia. El escenario SD-70 asume un crecimiento menor de las demandas de energía útil que el escenario BAU y así, la electrificación que requiere la reducción de emisiones se hace sobre unas demandas menores requiriendo así menos electricidad. En segundo lugar, se observa que, en los escenarios modelados, una alta capacidad instalada solar no implica que la generación eléctrica recaiga en ese recurso mayoritariamente. Por el contrario, las diferencias en los factores de planta y las disponibilidades de las tecnologías de generación llevan a que la generación con combustibles fósiles, hidroelectricidad y nuclear sean tengan participaciones mayores en la generación que las que tienen esos recursos en la matriz de capacidad instalada. Aun así, en los escenarios distintos a BAU, la generación eléctrica en 2050 se hace con prácticamente de cero emisiones de gases de efecto invernadero. Por último, la caracterización del escenario BAU, que incluye la ausencia total de una restricción a las emisiones y la disponibilidad y bajo costo del carbón nacional, junto con el alto factor de disponibilidad de las plantas que usan este combustible, llevan a que esta sea la tecnología que suministra la mayor parte de la generación eléctrica en 2050, con crecimiento muy marcado desde el 2035.

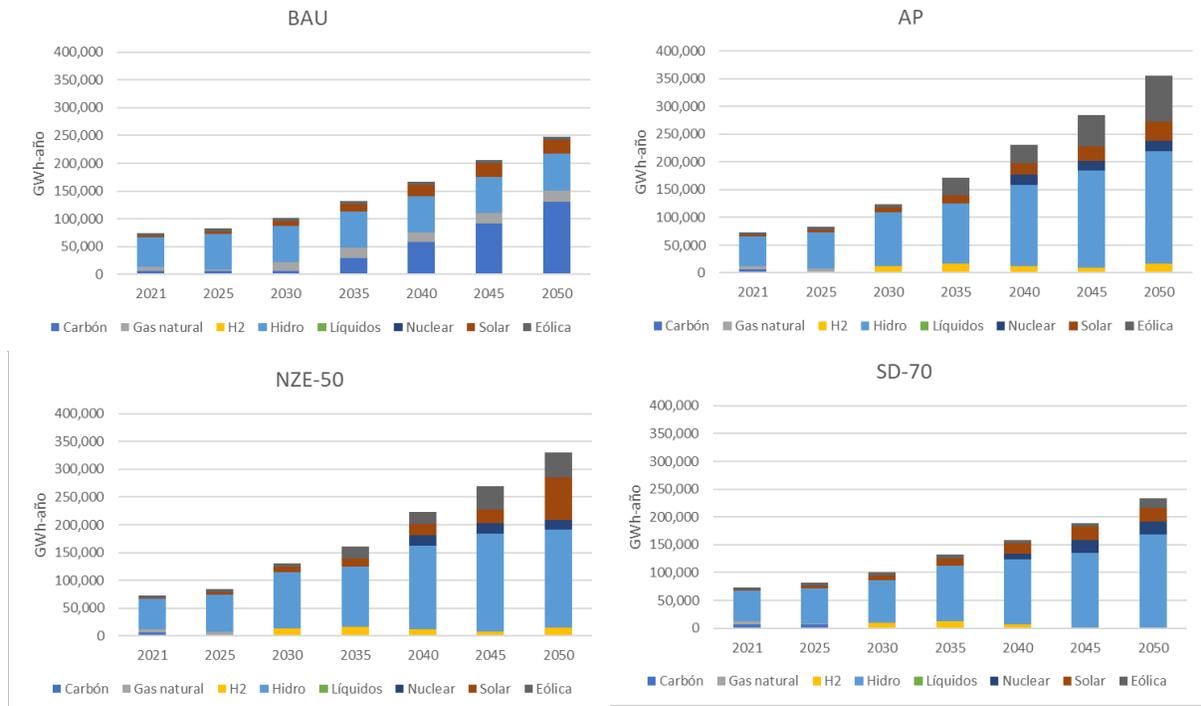
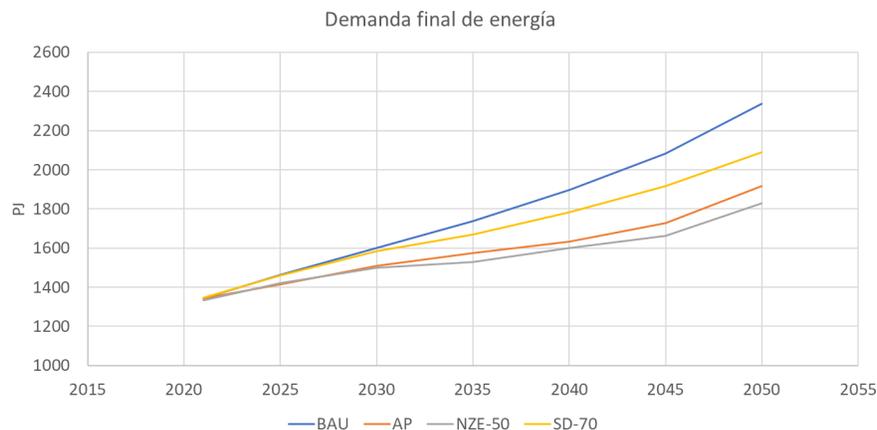


Figura 10. Generación eléctrica por recurso en Colombia para los cuatro escenarios modelados.

#### 4.2 Consumo final de energía

Como se ha mencionado anteriormente, el escenario BAU es el que asume un mayor crecimiento de la economía y de las demandas energéticas útiles a ser satisfechas. Esa diferencia es inferior al 14% en 2050 entre el escenario de mayor crecimiento (BAU) y los demás. En contraste, y como lo muestra la Figura 11, el escenario NZE-50 requiere 22% menos energía final que el escenario BAU y ese desacople inicia hacia 2030 para cuando no se consideraron diferencias significativas en el crecimiento económico. Además, a pesar de que el escenario AP es el segundo escenario de mayor crecimiento económico, muy cercano al del BAU, la diferencia en consumos de energía final entre ellos es del 18%. Estas diferencias en los consumos finales tienen un componente asociado a las diferencias en el crecimiento asumido en cada escenario y, sobre todo, a las ganancias en eficiencia energética asociadas, principalmente, a la electrificación de la economía.



*Figura 11. Consumo final nacional de energía (sumatoria de todos los energéticos en todos los sectores de consumo final) en los escenarios modelados.*

La Figura 12 presenta la composición de la matriz energética final en Colombia para los diferentes escenarios. Se observan diferencias en los niveles de energía demandados. Estas diferencias acaban de ser explicadas y se ilustran con la Figura 11. Como ya se indicó, los escenarios de menor demanda final de energía son aquellos de mayor ambición climática que requieren mayores niveles de electrificación, principalmente en el sector transporte, e inducen por esta vía grandes ganancias en eficiencia. Ese es el caso del escenario AP y el escenario NZE-50 en donde la electricidad en 2050 es más de la mitad del suministro final de energía creciendo desde la octava parte del total que representó en 2021.

La electrificación de la demanda final en los escenarios SD-70 y BAU llega a ser alrededor de un tercio en 2050, un crecimiento mucho menor que en los dos primeros escenarios mencionados. En estos últimos escenarios se observa un crecimiento sostenido del gas natural hasta 2050, siendo que parte de esa demanda de gas se sustituye por electricidad en los dos escenarios de menores emisiones de gases de efecto invernadero.

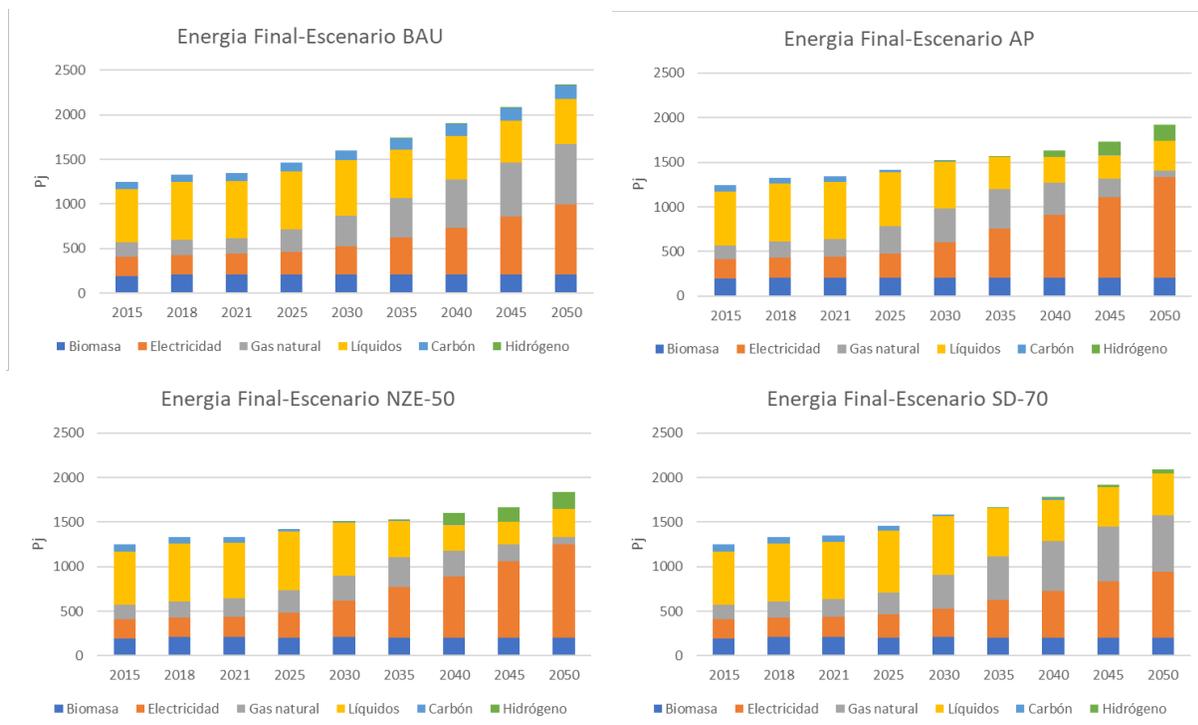


Figura 12. Consumo final de energía por energético para cada uno de los escenarios modelados.

### 4.3 Indicadores de costos asociados

En la Figura 13 se presentan los requerimientos de capex y de opex en los cuatro escenarios modelados, comparado con el tamaño de la economía en cada año. A pesar de las grandes diferencias en la conformación de las matrices de generación y de consumo final presentados a lo largo de este documento, las diferencias en costos no son tan pronunciadas, siendo que la diferencia en requerimientos de Opex entre los escenarios nunca supera el 1.1% del PIB. Esto es así porque en todos los escenarios, incluido BAU, se requieren inversiones para reemplazar los activos depreciados y para aumentar la capacidad instalada de tecnologías.

Lo anterior implica que algunas tecnologías, que no son compatibles con los escenarios de descarbonización, pero sí con el escenario BAU no tengan que ser reemplazadas, sino que simplemente no se adquieren y, en su lugar se instalan otras tecnologías de menores emisiones. Esta exploración y análisis de los futuros posibles minimiza los costos de realización de los escenarios de descarbonización al evitar la compra de activos incompatibles que pueden quedar varados o inutilizados con vida útil remanente. Adicionalmente, se observa que más del 80% de todas las inversiones requeridas en todos los escenarios corresponden a los sectores de movilidad, principalmente terrestre, y generación eléctrica. Sin embargo, en la práctica, además de los requerimientos de inversión es necesario considerar la granularidad de los agentes que realizan esas inversiones, lo que podría llevar a mayores dificultades para

la materialización de los escenarios que implican cambios tecnológicos más profundos.

Como resultado, la suma total de los costos anuales descontados que incluyen el opex, el capex y los beneficios y costos por exportación de energía es un 5.6% y 5.7% mayor en los escenarios NZE-50 y AP, respectivamente, con respecto al costo total del escenario BAU. Esta diferencia sería el costo adicional que el país debería pagar si se materializara uno de esos dos escenarios en lugar del escenario BAU.

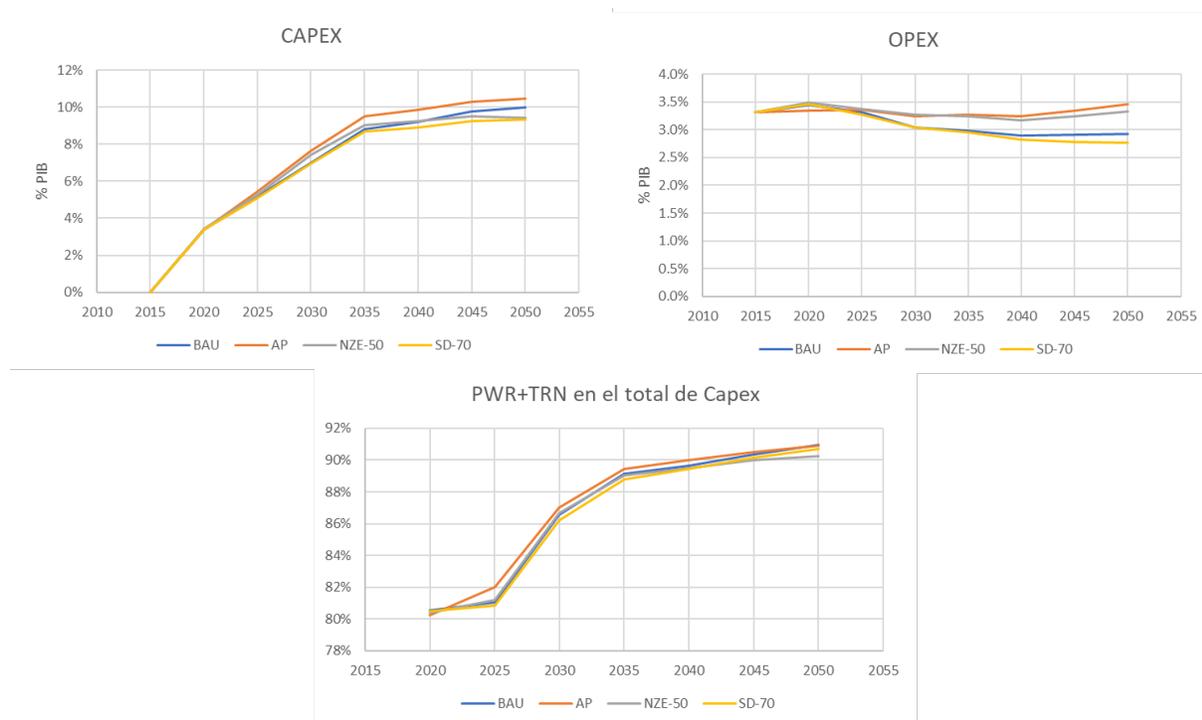


Figura 13. Requerimientos anuales de inversión (arriba izquierda), costos totales anuales de operación y mantenimiento (arriba derecha) y participación de los sectores transporte y generación eléctrica en los requerimientos de inversión (abajo) en los diferentes escenarios.

#### 4.4 Emisiones de gases de efecto invernadero

La Figura 14 presenta los perfiles de emisión de gases de efecto invernadero en los diferentes escenarios analizados. A pesar de que las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono fueron modeladas, los supuestos de costos y de evolución tecnología llevaron a que en ninguno de los escenarios esta tecnología fuera una opción dentro de la matriz energética resultante.

En el escenario BAU se observa un aumento de las emisiones de 2.5 veces entre 2021 y 2050, llegando en 2050 a niveles en el sector energético, por quema de combustibles, superiores a los de la meta NDC para 2030 para toda la economía colombiana. La mayor parte del crecimiento en ese escenario estaría asociado al uso

de carbón en la generación eléctrica con una pequeña disminución de las emisiones en el sector transporte como resultado de algunos niveles de electrificación que se haría por mayor competitividad económica de esos equipos.

En los demás escenarios, se observa una tendencia similar. En los primeros años, en presencia de una restricción de emisiones, el primer sector en reducir las suyas es la generación eléctrica. Esta rápida descarbonización del sector eléctrico viene acompañada de una electrificación de los sectores finales, principalmente del transporte. Este sector se electrifica tanto por la competitivas de los vehículos eléctricos, como se observó en alguna medida en el escenario BAU, como por la necesidad de disminuir las emisiones. Las fechas objetivo para alcanzar la descarbonización hacen que los mismos cambios ocurran con más o menos velocidad (el orden y los cambios son los mismos, pero ocurren más lentamente en SD-70 que en NZE-50 y AP). Los sectores de edificaciones e industria son los que se demoran más para reducir sus emisiones en los escenarios AP y NZE-50. En los primeros tiene que ver con los costos de sustituir estufas y equipos de calentamiento de agua por equipos eléctricos y en la industria con las dificultades técnicas y costos para sustituir al gas natural por hidrógeno o electricidad para llegar a las cero emisiones.

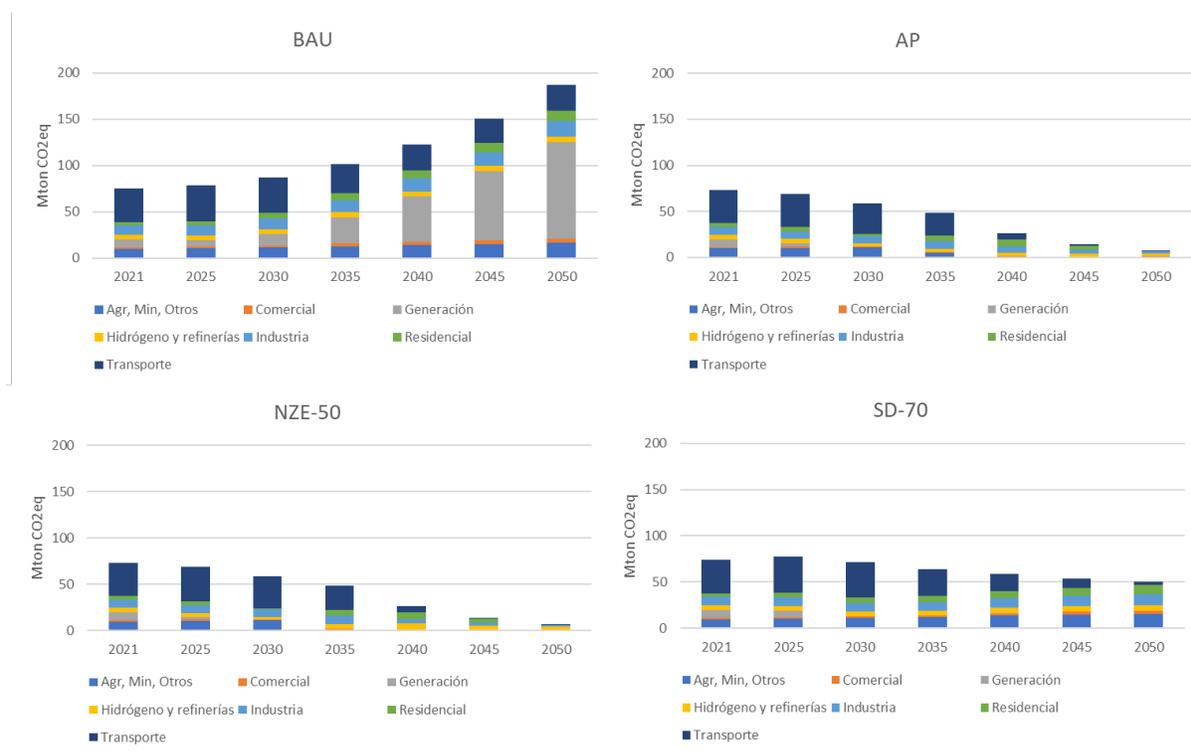


Figura 14. Emisiones sectoriales de gases de efecto invernadero en los diferentes escenarios.

Por último, la Figura 15 presenta el costo marginal del carbono en los escenarios que tienen una restricción de emisiones. Se puede observar que esta restricción se hace

activa (i.e., tiene un costo marginal diferente de cero) a partir de 2025 para AP y NZE-50 y a partir de 2030 para SD-50. El costo marginal representa el costo de mitigar la última tonelada en cada periodo de tiempo y sirve como un indicador del nivel al que debería tasarse el impuesto al carbono o la multa por exceder el límite de un hipotético presupuesto de carbono de manera que para el agente que realiza la emisión de la última unidad de gases de efecto invernadero le sea indiferente evitar la emisión o pagar el impuesto o la sanción, mientras que para todos los demás agentes les sea rentable realizar las inversiones requeridas para mitigar esas emisiones. Estos valores difieren grandemente de los niveles vigentes para impuesto al carbono que es inferior a los 10 dólares por tonelada de CO<sub>2eq</sub>.

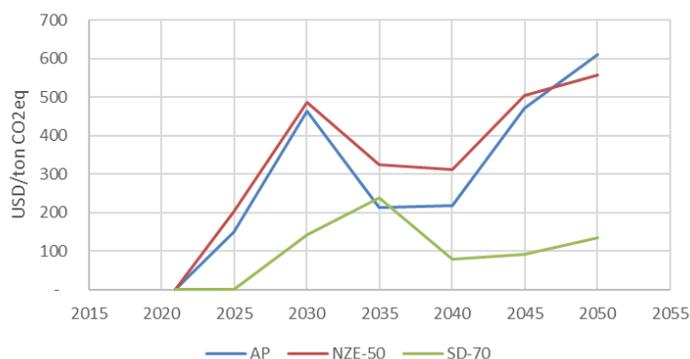


Figura 15. Costo marginal del carbono para el sector energético calculado para cada uno de los escenarios con restricciones de emisión.

## 5 Principales hallazgos y conclusiones.

El análisis de los diferentes escenarios posibles para el sistema energético de Colombia revela que el país enfrenta retos significativos en su sector energético, pero también identifica oportunidades para reducir su dependencia de los combustibles fósiles y aprovechar mejor sus recursos renovables. El modelo de optimización utilizado identifica las inversiones requeridas y las canastas de tecnologías, combustibles e inversiones que llevan a la satisfacción de las necesidades energéticas colombianas a mínimo costo y al cumplimiento simultáneo de las restricciones definidas para cada escenario. Sin embargo, es importante señalar que estos resultados requieren ajustes para reflejar de manera más realista las barreras tecnológicas, sociales y financieras que el país enfrenta, y que podrían impedir o dificultar la materialización de los futuros “óptimos” identificados.

A pesar de los avances en la diversificación de la matriz energética, la dependencia de Colombia en el petróleo y el gas sigue siendo significativa. Con una relación reservas/producción de aproximadamente siete años para ambos recursos, se hace evidente la urgencia de explorar alternativas para el suministro de energía y para la diversificación de las actividades productivas del país. En los escenarios explorados, la disponibilidad de petróleo permite, no sólo la atención de la demanda interna sino, en

ciertos casos, su exportación, siendo que la restricción de emisiones no es determinante en los niveles de producción de petróleo o carbón. La exportación de crudo, que ha sido un pilar económico, podría no ser competitiva en escenarios donde los precios internacionales de los hidrocarburos sean bajos, como en el caso del escenario NZE-50, donde se observa una caída en la producción nacional para satisfacer la demanda interna.

La expansión de la capacidad de generación eléctrica es otro punto crítico. En todos los escenarios evaluados, el crecimiento en la capacidad instalada es significativo, siendo mayor en los escenarios de mayor ambición climática, como el AP y NZE-50, donde la capacidad instalada crece a tasas anuales promedio del 6.1% y 6.7%, respectivamente. Sin embargo, los escenarios también destacan que los costos de inversión asociados con la descarbonización del sector eléctrico y el aumento de la electrificación de la economía implican una inversión sustancial en infraestructura. En particular, la generación eléctrica con fuentes renovables como la solar y la eólica crece más rápidamente en los escenarios más restrictivos en cuanto a emisiones. En los escenarios en los que se presenta una caída en la producción o exportación de hidrocarburos el crecimiento económico se resiente, aunque no se detiene. Sin embargo, es importante resaltar que para que el crecimiento sea sostenido, aún en escenarios de descarbonización acelerada o de contextos internacionales de demanda y precios de hidrocarburos desfavorables para la exportación colombiana, el país debe lograr la transición económica y fiscal que acompañe las transiciones energéticas analizadas en este estudio.

En términos de demanda, se observa una clara tendencia a la electrificación de sectores como el transporte, lo cual se alinea con la reducción de emisiones que los escenarios buscan alcanzar. Sin embargo, esta electrificación y el reemplazo de tecnologías de uso final no serán posibles sin un entorno adecuado que facilite tanto la oferta como la demanda de electricidad. La capacidad de Colombia para aumentar la producción de electricidad de bajas emisiones será un factor determinante, y el despliegue de proyectos de generación y su infraestructura de transmisión y distribución será clave para asegurar la viabilidad de estos escenarios.

Los costos de la transición hacia una economía de bajas emisiones varían entre los escenarios, pero todos los escenarios, incluido el BAU, implican inversiones considerables. Las diferencias en los requerimientos de capital (Capex) y los costos de operación y mantenimiento (Opex) no son tan significativas entre los escenarios, ya que en todos se requiere reemplazar o actualizar activos. Sin embargo, el análisis muestra que los escenarios de mayor ambición climática, como el AP y NZE-50, presentan un aumento del 5.7% en los costos totales respecto al escenario Business As Usual (BAU), reflejando la magnitud de la inversión requerida para reducir las emisiones y adaptar la infraestructura energética.

El sector transporte destaca como una de las áreas con mayores desafíos en términos de descarbonización, dado que es uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero y su electrificación será esencial para cumplir los objetivos de los

escenarios. No obstante, este proceso enfrenta barreras importantes, como la necesidad de renovar el parque vehicular y la limitada capacidad de inversión de los propietarios de vehículos, lo que podría ralentizar la adopción de tecnologías más limpias si no se implementan políticas e incentivos adecuados.

En cuanto a la capacidad de Colombia para implementar políticas regulatorias efectivas, si bien el país ha introducido instrumentos como los impuestos al carbono, estos no han alcanzado la escala necesaria para promover una sustitución significativa de los combustibles fósiles en la matriz energética. Los escenarios de mayor ambición climática requieren un fortalecimiento de los marcos regulatorios y la implementación de mecanismos financieros más robustos que incentiven las inversiones necesarias en energías renovables y tecnologías de bajas emisiones.

Finalmente, se evidencia que el cumplimiento de metas ambiciosas en materia de mitigación de gases de efecto invernadero no implica, aunque llevan a mayores costos, no necesariamente representan desviaciones de gran magnitud si se compara con las requeridas en un escenario BAU. Sin embargo, la apropiada planeación, la claridad en las señales que la permitan y la disponibilidad y alineación de un ambiente normativo claro y operativo son elementos indispensables para evitar el riesgo de ejecución de inversiones que puedan quedar varadas teniendo que ser reemplazadas antes del final de su vida útil o que hagan incompatible el cumplimiento de metas ambiciosas de emisión. Es muy importante resaltar que ninguno de los escenarios explorados implican una disminución de la actividad exportadora de petróleo y carbón, siendo que los cambios conducentes a la descarbonización de la matriz energética corresponden más a cambios en la demanda de energía y la generación eléctrica teniendo a las exportaciones, sujetas a la competitividad de la producción nacional, como un destino con capacidad para absorber los remanentes de los combustibles fósiles que, eventualmente, se dejen de consumir internamente.

En conclusión, los escenarios explorados sugieren que, si bien Colombia tiene el potencial para reducir significativamente sus emisiones y diversificar su matriz energética, la materialización de estos escenarios dependerá de su capacidad para superar barreras económicas, sociales y regulatorias. La velocidad a la que se implementen las tecnologías emergentes y se construyan las infraestructuras necesarias será clave para determinar el éxito del país en su adaptación a las nuevas demandas globales de energía limpia y sostenible.