

# Fundamentos de carbono neutralidad del Sector Minero Energético

### **Diego Mesa Puyo**

Ministro de Minas y Energía

### **María Paula Moreno Torres**

Jefe de la Oficina de Asuntos  
Ambientales y Sociales (OAAS)

### **Diego A. Grajales Campos**

Coordinador Cambio Climático

### **Stepan Uncovsky**

Director residente GIZ Colombia

### **Sergio Antonio Ruiz Azurduy**

Coordinador proyecto MaPriC

### **Autores**

Eduardo José Sánchez Sierra

Patricia Dávila Pinzón

Luisa Fernanda Pérez López

Harold Maya Ojeda

### **Aportes técnicos**

Edison Yesid Ortiz Durán

Sergio Andrés Garces Jiménez

Johan Sebastián Vanegas Gracia

### **.Puntoaparte**

#### **Dirección editorial**

Juan Mikan

#### **Dirección de arte**

Diego Cobos

#### **Diseño y diagramación**

Inti Alonso

Andrea Ríos

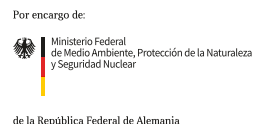
Bogotá, 2021

Este documento fue construido en el marco del Convenio de Cooperación Internacional GGC 451 de 2020 firmado entre el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y el Ministerio de Minas y Energía, y con el apoyo del Proyecto Materias Primas y Clima -MaPriC-, implementado por la Cooperación Alemana para el Desarrollo GIZ y financiado por el Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear (BMU) de la República Federal de Alemania.

Las opiniones expresadas en esta publicación son responsabilidad de sus autores y no representan las posiciones u opiniones del Ministerio de Minas y Energía, CIAT y la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Fundamentos de Carbono Neutralidad del

# Sector Minero Energético



de la República Federal de Alemania

# Índice

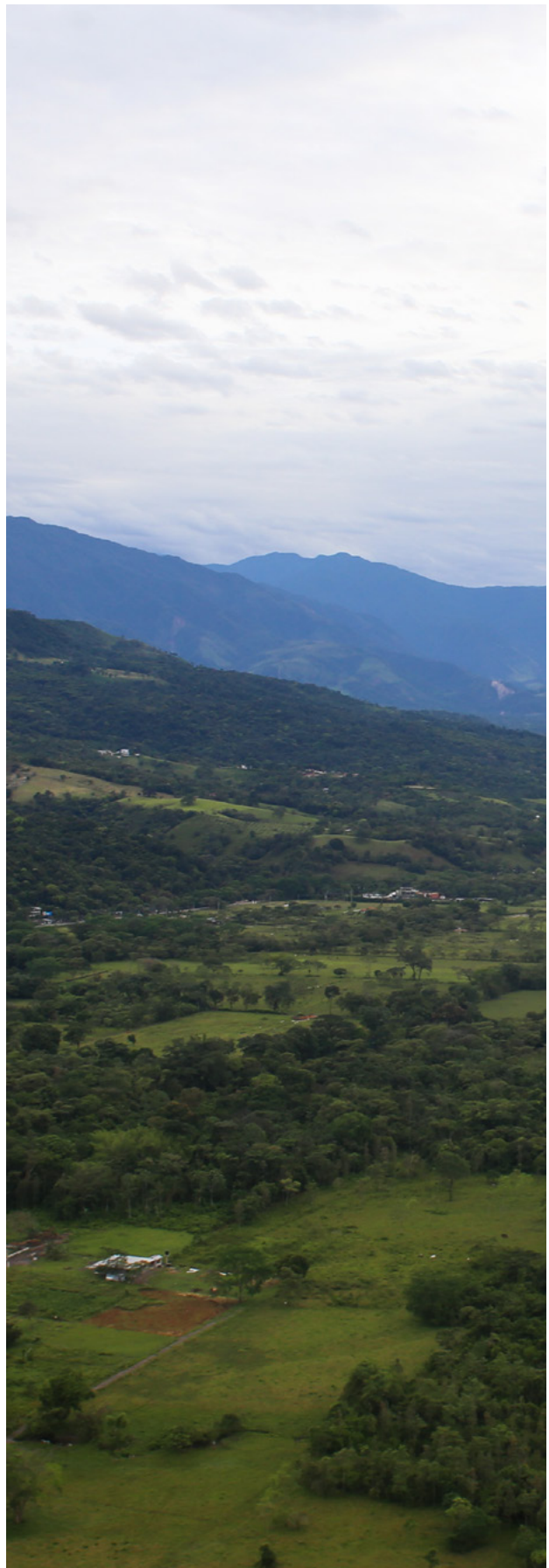
## Contenido

	Introducción.....	10
<b>1</b>	<b>Revisión de políticas y estrategias sectoriales nacionales.....</b>	<b>12</b>
	1.1 Contexto.....	13
	1.2 Políticas y estrategias nacionales.....	15
	1.3 Políticas y estrategias sectoriales.....	35
<b>2</b>	<b>Estado del arte en el mundo y en Colombia de las estrategias de largo plazo que impulsan la carbono neutralidad y la reactivación económica.....</b>	<b>49</b>
	2.1 Estrategia a largo plazo de la Unión Europea.....	53
	2.2 Estrategia a largo plazo bajo el Acuerdo de París de Japón.....	57
	2.3 Propuesta de descarbonización de los Estados Unidos.....	60
	2.4 Estrategia a largo plazo de Finlanda.....	65
	2.5 Estrategia de carbono neutralidad de Costa Rica.....	68
	2.6 Estrategia de carbono neutralidad de Canadá.....	72
	2.7 Transición energética.....	75
	2.8 Otros documentos.....	97
<b>3</b>	<b>Conclusiones y relación con el PIGCCme 2050.....</b>	<b>110</b>
<b>4</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>114</b>

# Tablas

- 16** **Tabla 1-1** Tablero de control de objetivos e indicadores PEN 2020-2050
- 18** **Tabla 1-2** Resultados del análisis de riesgos por escenario del PEN 2020-2050
- 24** **Tabla 1-3** Comparación de escenarios con objetivos del PEN 2020-2050
- 29** **Tabla 1-4** Emisiones por categoría IPCC (nivel 1) para los años 2015, 2020, 2025 y 2030 – actualización NDC
- 30** **Tabla 1-5** Líneas estratégicas de mitigación sector minero energético - actualización NDC Colombia
- 38** **Tabla 1-6** Propuestas y medidas para la transformación energética de Colombia por foco
- 45** **Tabla 1-7** Retos de la Política Minera
- 46** **Tabla 1-8** Lineamientos de la Política Minera
- 50** **Tabla 2-1** Comercialización de petróleo y gas, y carbono neutralidad
- 51** **Tabla 2-2** Comercialización de carbón y carbono neutralidad
- 53** **Tabla 2-3** Generalidades y contexto de la Unión Europea
- 54** **Tabla 2-4** Estrategia a largo plazo de la Unión Europea
- 57** **Tabla 2-5** Generalidades y contexto de Japón
- 58** **Tabla 2-6** Estrategia a largo plazo de Japón bajo el Acuerdo de París – sectores
- 58** **Tabla 2-7** Estrategia a largo plazo de Japón bajo el Acuerdo de París – intersectorial
- 60** **Tabla 2-8** Generalidades de Estados Unidos de América
- 61** **Tabla 2-9** Estrategia de descarbonización de Estados Unidos de América
- 63** **Tabla 2-10** Comparación de trayectorias del estudio para la neutralidad de carbono en EEUU
- 65** **Tabla 2-11** Generalidades y contexto de Finlandia
- 66** **Tabla 2-12** Estrategia a largo plazo de Finlandia
- 68** **Tabla 2-13** Generalidades y contexto de Costa Rica
- 69** **Tabla 2-14** Ejes de la descentralización – estrategia a largo plazo de Costa Rica
- 70** **Tabla 2-15** Estrategias transversales – estrategia a largo plazo de Costa Rica
- 72** **Tabla 2-16** Generalidades y contexto de Canadá
- 73** **Tabla 2-17** Estrategias de reducción de emisiones y carbono neutralidad de Canadá
- 76** **Tabla 2-18** Aspectos críticos y acciones prioritarias para la transición energética en Colombia según el WEC
- 79** **Tabla 2-19** Comparación de puntuación por dimensiones del Índice de Trilema Energético en el contexto global, Latinoamérica y el Caribe (LAC) y Colombia

- 80 **Tabla 2-20** Resultados por dimensiones del Índice de Trilema Energético para Colombia
- 81 **Tabla 2-21** Escenarios energéticos mundiales – WEC
- 83 **Tabla 2-22** Impactos y respuestas al FEN 2015–2016 en Colombia
- 87 **Tabla 2-23** Medidas y metas de transición energética – Comisión Europea (Clean Energy for all europeans)
- 89 **Tabla 2-24** Medidas consideradas para la estimación de indicadores de transición energética IEA
- 91 **Tabla 2-25** Indicadores del escenario PES a 2030 y 2050
- 92 **Tabla 2-26** Indicadores del escenario TES a 2030 y 2050
- 90 **Tabla 2-27** Indicadores línea base - IRENA
- 94 **Tabla 2-28** Costos por del escenario entre 2016 y 2050 - IRENA
- 95 **Tabla 2-29** Subíndices considerados en la estimación del ETI para la medición del desempeño del sistema energético
- 98 **Tabla 2-30** Tecnologías a lo largo de la cadena de valor de la electricidad baja en carbono que están en niveles de adopción temprana y prototipo
- 91 **Tabla 2-31** Tecnologías de la cadena de valor de captura de carbono que están en niveles de adopción temprana y prototipo
- 100 **Tabla 2-32** Tecnologías de la cadena de valor de hidrógeno que están en niveles de adopción temprana y prototipo
- 100 **Tabla 2-33** Datos de gasto público y privado en I+D del sector eléctrico entre 2010 y 2019



# Figuras

- |           |  |            |   |
|-----------|--|------------|---|
| <b>17</b> | <b>Figura 1-1</b> Características y supuestos de escenarios del PEN 2050   | <b>88</b>  | <b>Figura 2-9</b> Esquema de los indicadores de transición energética de IEA                                |
| <b>31</b> | <b>Figura 1-2</b> Esquema de medios de implementación de la NDC de Colombia  | <b>101</b> | <b>Figura 2-10.</b> Demanda total de minerales año 2020-2040  |
| <b>37</b> | <b>Figura 1-3</b> Esquema de frecuencia y relación entre los temas tratados por los diferentes focos de la Misión de Transformación Energética de Colombia | <b>102</b> | <b>Figura 2-11</b> Minerales empleados en tecnologías de energías limpias                                   |
| <b>49</b> | <b>Figura 1-4</b> Componentes y líneas estratégicas del PIGCCme  | <b>104</b> | <b>Figura 2-12</b> Participación de tecnologías limpias o bajas en carbono en la demanda total de minerales |
| <b>56</b> | <b>Figura 2-1</b> Análisis cualitativo de la estrategia de carbono neutralidad de la Unión Europea   | <b>106</b> | <b>Figura 2-13</b> Pilares de la iniciativa “Climate Smart Mining”  |
| <b>59</b> | <b>Figura 2-2</b> Análisis cualitativo de la estrategia de carbono neutralidad de Japón  | <b>112</b> | <b>Figura 3-1</b> Relación de acciones identificadas desde la oferta  |
| <b>64</b> | <b>Figura 2-3</b> Análisis cualitativo de la estrategia de carbono neutralidad de Estados Unidos   | <b>112</b> | <b>Figura 3-2</b> Relación de acciones identificadas desde la demanda                                       |
| <b>67</b> | <b>Figura 2-4</b> Análisis cualitativo de la estrategia de carbono neutralidad de Finlandia  |            |   |
| <b>71</b> | <b>Figura 2-5</b> Análisis cualitativo de la estrategia de carbono neutralidad de Costa Rica   |            |   |
| <b>74</b> | <b>Figura 2-6</b> Análisis cualitativo estrategia de carbono neutralidad de Canadá   |            |   |
| <b>77</b> | <b>Figura 2-7</b> Monitor mundial de aspectos energéticos 2020 – Colombia  |            |   |
| <b>79</b> | <b>Figura 2-8</b> Comparación en el índice de Trilema Energético entre la calificación mundial, región LAC y Colombia                                      |            |   |

# Gráficos

- |           |   |
|-----------|---|
| <b>22</b> | <b>Gráfico 1-1</b> Composición de la oferta por energético PEN 2020-2050                      |
| <b>23</b> | <b>Gráfico 1-2</b> Demanda de energía por escenario PEN 2020-2050                             |
| <b>23</b> | <b>Gráfico 1-3</b> Emisiones de demanda de energía  |
| <b>28</b> | <b>Gráfico 1-4</b> Desagregación de emisiones según su clasificación IPCC - actualización NDC |
| <b>52</b> | <b>Gráfico 2-1</b> Demanda histórica y proyección de demanda de carbón                        |





- MADS:** Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (también conocido como Minambiente)
- MRV:** Sistema de Reporte, Monitoreo y Verificación
- NDC:** Nationally Determined Contributions (contribuciones determinadas a nivel nacional)
- NGCC:** Carbon Capture from Natural Gas Combined Cycle (Captura de Carbono del Ciclo Combinado de Gas Natural)
- NO<sub>2</sub>:** Dióxido de nitrógeno
- ODS:** Objetivos de Desarrollo Sostenible
- PEN:** Plan Energético Nacional
- PIB:** Producto interno bruto
- PIGCC:** Plan Integral de Gestión de Cambio Climático
- PIGCCS:** Plan Integral de Gestión de Cambio Climático a nivel Sectorial
- PIGCCme:** Plan Integral de Gestión de Cambio Climático del Sector Minero-Energético
- PM2.5:** Material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrones
- PND:** Plan Nacional de Desarrollo
- PRI:** Principios de inversión responsable
- PROURE:** Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía
- RAEE:** Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos
- REDD+:** Reducción de las Emisiones debidas a la Deforestación y la Degradación de los bosques
- SbN:** Soluciones basadas en la Naturaleza
- SIMEC:** Sistema de Información Minero Energético Colombiano
- SIN:** Sistema Interconectado Nacional
- SISBEN:** Sistema de Identificación de Potenciales Beneficiarios de Programas Sociales
- SLCP:** Short-Lived Climate Pollutants (también conocidos como CCVC - Contaminantes Climáticos de Vida Corta)
- SO<sub>2</sub>:** Dióxido de azufre
- SSPD:** Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios
- TI:** Tecnología de la información
- UE:** Unión Europea
- UNFCCC:** United Nations Framework Convention on Climate Change (también conocida como CMNUCC - Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático)
- UNR:** Usuario no regulado
- UPME:** Unidad de Planeación Minero-Energética
- WBG:** World Bank Group (Banco Mundial)
- WEC:** World Energy Council (Consejo Mundial de Energía)
- WEF:** World Economic Forum (Foro Económico Mundial)
- YNC:** Yacimientos no convencionales
- ZNI:** Zonas No Interconectadas

# Introducción

En la medida en que las discusiones sobre cambio climático apuntan a reducciones significativas de emisiones, que eventualmente lleven a la carbono neutralidad y a lograr una transición energética antes de 2050, algunas preguntas se hacen relevantes: ¿qué es carbono neutralidad?, ¿qué implica para los países y qué están haciendo algunos de ellos para cumplir con esta visión compartida?

El presente documento busca responder a estos interrogantes brindando elementos de análisis, de modo que el lector pueda aproximarse de una manera más informada a los elementos críticos de la carbono neutralidad asociada al sector minero energético. Igualmente, que pueda comenzar a tomar decisiones que, cumpliendo con el objetivo de emisiones netas iguales a cero, contribuyan a imaginar un sector capaz de ofrecer energéticos de calidad, confiables, asequibles y capaces de contribuir con el desarrollo de la economía.

La estructura del texto está dividida en tres grandes grupos: primero, una aproximación teórica a la carbono neutralidad; segundo, una revisión de las diferentes estrategias de carbono neutralidad diseñadas por otros países, y cómo estos temas pueden ser semejantes o difieren con la planeación del sector minero energético colombiano; y tercero, la visión de las agencias internacionales frente a la carbono neutralidad.

En términos generales, la conclusión de este documento es que la carbono neutralidad guarda una relación directa con la electrificación de las economías, bajo los principios de soberanía y seguridad energética. En este sentido, el orden de prioridades está dado por el uso de tecnologías que garanticen la generación de electricidad confiable y limpia, entendiendo con pragmatismo que llegar a cero emisiones implica la implementación de tecnologías como CCUS y la gestión de entornos. Esto por medio de medidas de reforestación o conservación que permitan compensar las emisiones que, por la naturaleza del sector, no pueden ser reducidas sin poner en peligro la confiabilidad del sistema.

Por último, cabe señalar que el presente documento busca dar insumos de política que contribuyan a identificar las principales tendencias y acciones que lleven a evaluar las posibles estrategias de carbono neutralidad que el sector de minas y energía puede seguir.

## Objetivo general

Contribuir a identificar las tendencias y los principales temas de discusión sobre el cambio climático que deberían evaluarse en la estrategia de largo plazo para alcanzar la carbono neutralidad neta del sector de minas y energía en 2050.

## Objetivos específicos

1

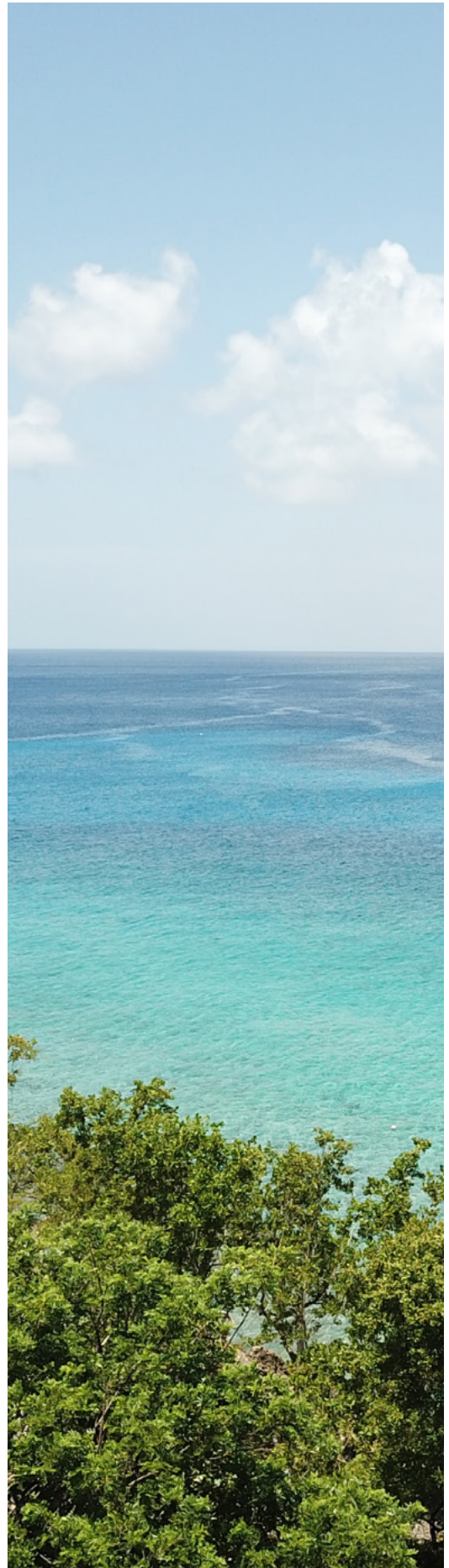
Analizar las políticas nacionales asociadas a la transición energética de Colombia, especialmente lo relacionado con el Plan Energético Nacional (PEN), la Misión de Transformación y la Política Minera.

2

Analizar los lineamientos de transición energética establecidos por la WEC, Comisión Europea, IEA, IRENA y WEF, entre otros.

3

Analizar las estrategias de carbono neutralidad de otros países, con énfasis en el sector de minas y energía.





1

REVISIÓN DE  
POLÍTICAS  
Y ESTRATEGIAS  
SECTORIALES  
NACIONALES

## 1.1 Contexto

La carbono neutralidad neta se consigue cuando las emisiones netas (emisiones menos absorciones) son iguales a cero (*net zero emissions*). Estas emisiones netas iguales a cero se consiguen cuando las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero que se liberan en la atmósfera se equilibran mediante las absorciones antropogénicas en un período específico. Cuando se miden varios gases de efecto invernadero, la cuantificación de las emisiones netas iguales a cero depende de los parámetros climáticos que se eligen para comparar las emisiones de diferentes gases (p. ej. el potencial de calentamiento global, el potencial de cambio en la temperatura global o el plazo elegido) (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (Matthews, J., 2018).

El término “carbono neutral” no es nuevo, de hecho, en 2006 fue nombrado como la “palabra del año” por el Diccionario de Oxford (Oxford University Press, 2006). Sin embargo, fue solo hasta 2016 —en la Vigésima Segunda Conferencia de las Partes (COP) en Marrakech— cuando los países parte se pusieron como objetivo alcanzar la carbono neutralidad para 2050. Tales países planean hacerlo por medio de una serie de lineamientos respecto a la descarbonización de las economías, en línea con el objetivo de incrementar la ambición en cuanto a reducción de emisiones fijada por el Acuerdo de París (Institute for Climate Economics, 2016).

La transición a economías carbono neutrales requiere de una planeación a largo plazo que permita tomar ventaja de las oportunidades asociadas a una inherente transformación de la economía, basada en el convencimiento de que el cambio no solo es posible, sino que es necesario y apropiado. La Alianza de Marrakech formada durante la COP 22 —cuyo rol es involucrar a las partes y a los actores no estatales, como el sector privado, para reforzar las acciones por el clima para el período previo al 2020— priorizó para 2020 los sectores de energía, industria, transporte, asentamientos humanos, zonas costeras y océanos, agua, soluciones basadas en la naturaleza y uso del suelo como áreas clave a ser analizados en la Cumbre de Glasgow en 2021, con el objetivo de limitar el aumento de la temperatura en 1,5° C y mejorar la resiliencia (United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 2020).

Los análisis de carbono neutralidad proveen recomendaciones sobre las tendencias futuras y la transformaciones sociales y económicas necesarias para alcanzar el objetivo de carbono neutralidad para 2050. Esto por medio de una transformación socialmente justa y eficiente en términos de costos, que contribuya a la competitividad, la creación de empleos y las mejoras en calidad del aire y salud. Esta transformación es también un factor de valorización de los países contribuyendo a la cohesión social (UNFCCC, 2020).



La carbono neutralidad debe partir de una visión estratégica que apunte a promover la descarbonización de la economía y la transición energética, al verlas como una oportunidad para los países de fortalecer la democracia y la cohesión social por medio de la creación de riqueza y el uso eficiente de los recursos (Ministerio de Ambiente y Transición Energética, 2019).

Materializar esta visión estratégica implica reconocer ocho premisas:

- 1** Promover una transición hacia una economía más competitiva, circular, resiliente y carbono neutral.
- 2** Identificar los vectores que llevan a la descarbonización.
- 3** Contribuir a la resiliencia y a la capacidad de adaptar a los países al cambio climático.

- 4** Estimular la investigación, innovación y producción de conocimiento en áreas clave para la carbono neutralidad.
- 5** Garantizar las condiciones financieras e incrementar el gasto en sectores clave.
- 6** Asegurar una transformación justa que contribuya a una mayor y mejor cohesión social.
- 7** Asegurar condiciones efectivas para el monitoreo del progreso de las políticas y acciones identificadas.
- 8** Involucrar a la sociedad en los cambios requeridos, con especial énfasis en la educación, información y concientización necesaria, de modo que se promueva la cohesión y la acción colectiva hacia la carbono neutralidad (Gil & Bernardo, 2020).

# 1.2 Políticas y estrategias nacionales

## 1.2.1 Plan Energético Nacional 2050

Este documento indicativo de planeación explora de forma prospectiva las posibles vías de desarrollo sostenible del país y su sector energético en el largo plazo, e identifica, sin que llegue a tornarse en un pronóstico futuro, diferentes cambios tecnológicos y sociales que permitirán lograr una transformación energética en 2050. Dicha transformación se entiende como un cambio estructural del sistema energético que va en pro del desarrollo sostenible del país a largo plazo, mediante la descarbonización, descentralización y digitalización de sus cadenas de valor del sector (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2021).

En este Plan se plantearon objetivos y sus respectivos indicadores para medir el avance en el cumplimiento de la meta, mediante acciones y la implementación de tecnologías en la cadena de valor del sector. Al agrupar medidas de acuerdo con su riesgo tecnológico, aporte a la mitigación del cambio climático y reto de transformación, se determinaron cuatro escenarios: Actualización<sup>1</sup>, Modernización<sup>1</sup>, Inflexión<sup>2</sup> y Disrupción<sup>4</sup> (UPME, 2021). A continuación se presenta un esquema de las acciones estratégicas (denominadas pilares) y los objetivos del plan:



1. Iniciativas con las que Colombia estaría en sintonía con las tendencias actuales.

2. Tecnologías que darían pie a la gasificación como un primer avance hacia la descarbonización.

3. Comienzo de la electrificación de la economía.

4. Iniciativas de menor grado de desarrollo tecnológico apuntando a que la innovación sea la clave para encaminarse hacia la carbono neutralidad.

📌 **Tabla 1-1.** Tablero de control de objetivos e indicadores PEN 2020-2050

Pilar	Objetivo	Indicador de seguimiento	Línea base	Visión 2050
<b>Pilar 1.</b> Seguridad y confiabilidad en el abastecimiento	Permitir el acceso a soluciones energéticas confiables, con estándares de calidad y asequibles.	Índice de Equidad Energética del World Energy Council	Calificación: C Ranking: 73	Calificación: A
	Diversificar la matriz energética.	Participación FNCER en la producción primaria de energía	3,1 %	12 % - 20 %
<b>Pilar 2.</b> Mitigación y adaptación al cambio climático	Contar con un sistema energético resiliente.	Índices de calidad de presentación del servicio de energía eléctrica	SAIDI: 37,7 h-año SAIFI: 48 al año	SAIDI: 3-5 horas-año SAIFI: 2-5 veces al año
	Propender por un sistema energético de bajas emisiones de GEI.	Emisiones de CO <sub>2</sub> asociadas a la producción de energía	35.047 GgCO <sub>2</sub> eq-año	
		Emisiones de CO <sub>2</sub> asociadas al consumo de energía	61.955 GgCO <sub>2</sub> eq-año	70.000 - 90.000 GgCO <sub>2</sub> eq-año
<b>Pilar 3.</b> Competitividad y desarrollo económico	Adoptar nuevas tecnologías para el uso eficiente de recursos energéticos.	Porcentaje de energía útil sobre el consumo total de energía final	31 %	50 % - 70 %
		Intensidad energética	2,29 kJ/COP	1,08 - 1,32 kJ/COP
	Promover un entorno de mercado competitivo y la transición hacia una economía circular.	Diferencial inflación precios energía vs. precios al consumidor	2,2 %	
		Consumo per-capita de leña	132 ton/mil habitantes	36-70 ton/mil habitantes
<b>Pilar 4.</b> Conocimiento e innovación	Avanzar en la digitalización y uso de datos en el sector energético.	Porcentaje de usuarios con medidor inteligente	1,2 % - 2-4 %	90 % - 100 % de los usuarios
	Estimular la investigación e innovación y fortalecer las capacidades de capital humano.	Número de grupos de investigación	210	
		Inversión en ACTI como porcentaje del PIB	0,74 %	1 %

Fuente: UPME, 2021

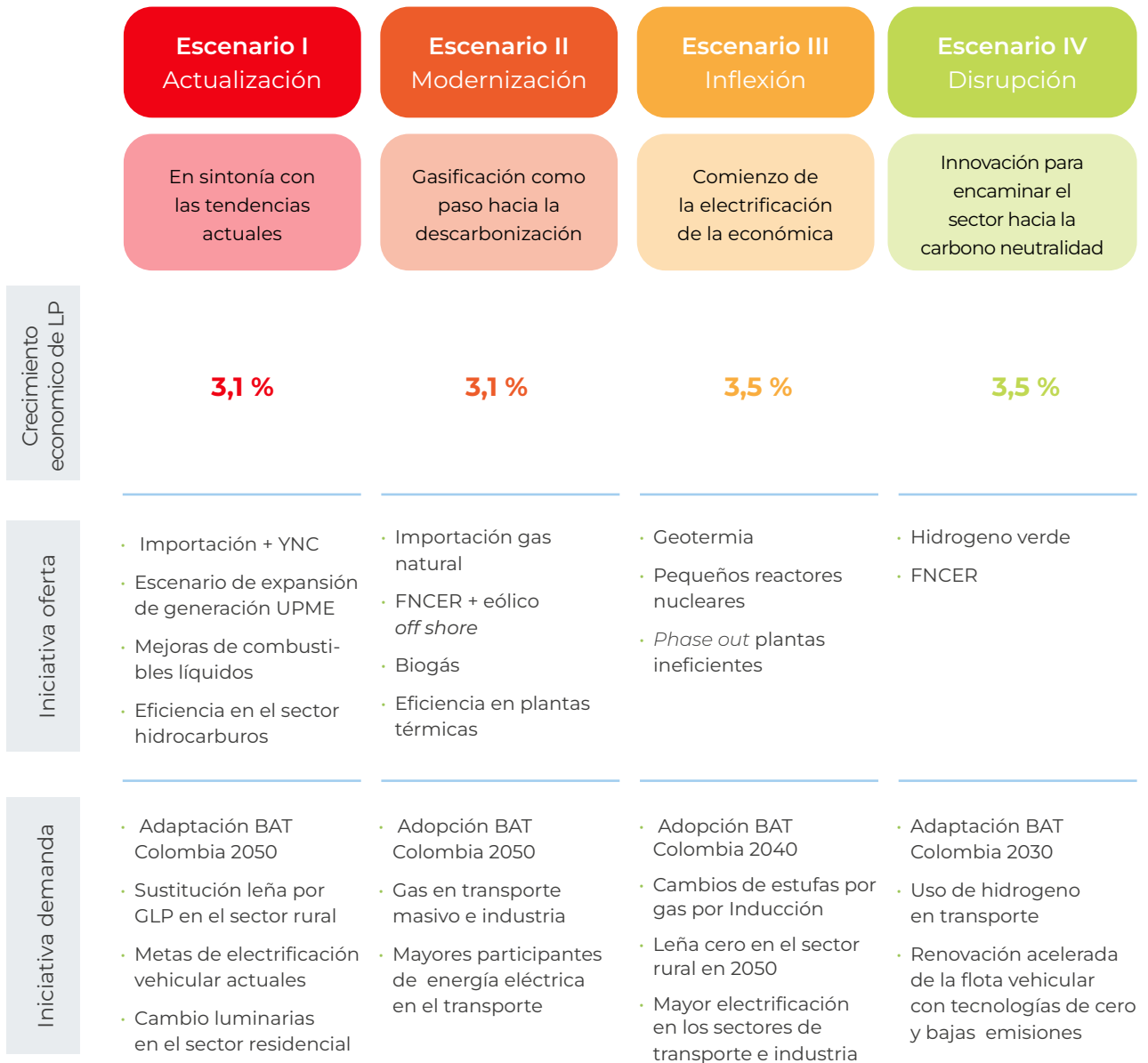


Existen varios desafíos considerados en el planteamiento del Plan, entre ellos, destaca que la autosuficiencia energética puede no ser suficiente, considerando las tendencias de demanda, el avance de la cobertura y el mejoramiento de la calidad del recurso en el país. Otro de los aspectos claves es la eficiencia tecnológica y el acceso a recursos de financiación para promover la competitividad en el sector productivo, la seguridad energética y el cumplimiento de metas ambientales y de gestión de cambio climático. En este sentido, la creciente demanda energética puede retrasar los procesos de des-

carbonización de la matriz energética y la implementación de nuevas tecnologías basadas en combustibles cero y bajos en emisiones. Igualmente, la digitalización y descentralización del sector requiere cambios estructurales que viabilicen su incorporación organizada para lograr los beneficios de interconectividad y de empoderamiento y participación de los consumidores finales (UPME, 2021).

Las características y supuestos de los escenarios considerados en el PEN se pueden ver en la siguiente figura:

 **Figura 1-1.** Características y supuestos de escenarios del PEN 2050



Fuente: UPME, 2021

En el estudio se realizó igualmente un análisis de riesgos, considerando los aspectos de *lock-in*<sup>5</sup>, impactos ambientales<sup>6</sup>, y capital humano<sup>7</sup>

(UPME, 2021). A continuación se presenta una tabla con el resultado general para cada uno de los diferentes escenarios planteados:

⬇ **Tabla 1-2.** Resultados del análisis de riesgos por escenario del PEN 2020-2050

Tipo de riesgo	Actualización	Modernización	Inflexión	Disrupción
<i>Lock-in</i>	Alto	Medio-alto	Medio-bajo	Bajo
Ambientales	Medio-alto	Medio	Medio-alto	Medio
Capital humano	Bajo	Medio	Medio-alto	Alto

Fuente: elaboración propia con base en UPME 2021



5. Dificultad para diversificar la matriz mediante nuevas fuentes de energía limpia, y para reducir la brecha tecnológica, con la adquisición de equipos de consumo más eficientes.

6. Potenciales daños a los ecosistemas y a la salud derivados de la configuración de la matriz energética de cada escenario.

7. Brecha en la oferta de programas educativos y de personal capacitado en temas relacionados con las iniciativas del escenario.

A manera de complemento de la información anterior, se presentan a continuación algunas medidas específicas y riesgos de cada uno de los escenarios relevantes (UPME, 2021):

## Escenario Actualización

- Iniciativas para que el sector energético colombiano se alinee con lo que hoy se observa en el resto del mundo.
- Mitigación de cambio climático: impacto positivo, pero no muy ambicioso.
- Digitalización y descentralización: adopción de tecnologías disponibles y requeridas como estándar mínimo en la actualidad.
- Iniciativas para el usuario: medición inteligente en una fracción importante de los usuarios e implementación de servicios digitales para atención a los clientes (*chatbots*).
- Fortalecimiento del Equipo de Respuesta ante Emergencias Informáticas (CSIRT), cuya función es dictaminar las buenas prácticas, políticas, reglamentos, protocolos y estándares de ciberseguridad que deberían aplicarse a todo nivel, incluyendo la infraestructura energética.
- Como riesgo *lock-in*, se identifican posibles retrasos en la diversificación de la matriz, por la consideración de los yacimientos no convencionales (YNC) y la predominancia de hidrocarburos en la oferta, que reduce la probabilidad de cambio tecnológico.
- Como riesgo *ambiental*, la combustión y el uso de recursos no renovables incrementaría las emisiones de GEI. En la cadena de valor de hidrocarburos, se generarían impactos sobre el suelo, aire, agua y los ecosistemas.
- El riesgo en *capital humano* es bajo, debido a que ya se cuenta con programas y personal capacitado para la operación de la infraestructura existente.

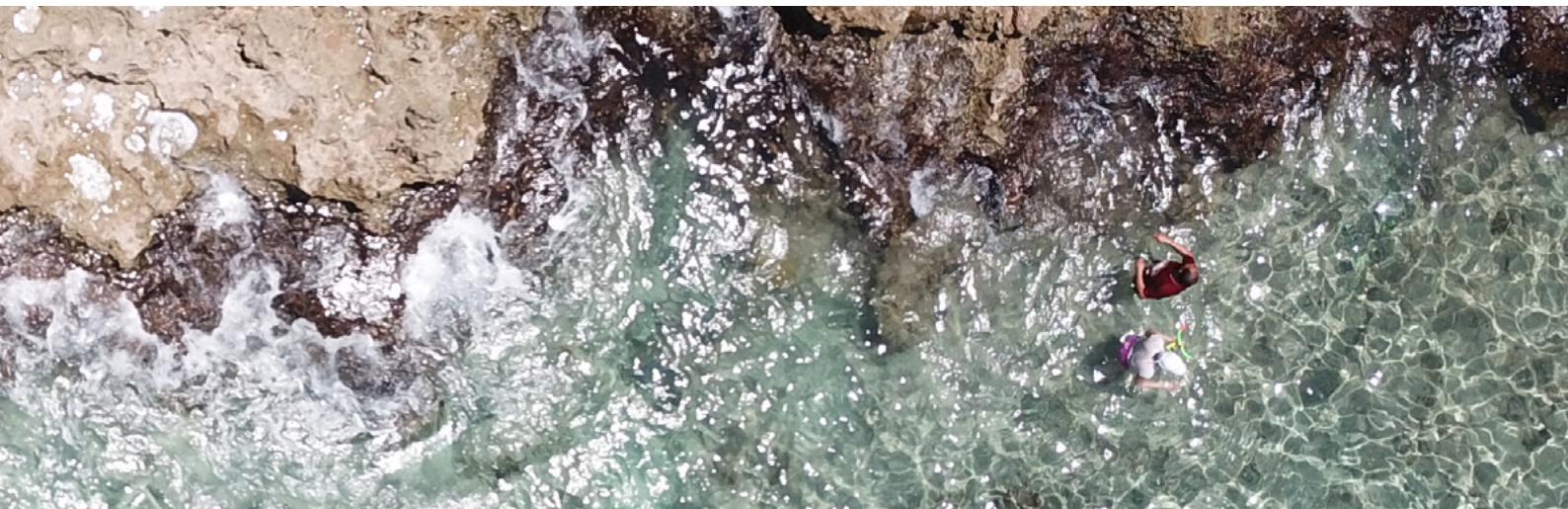
## Escenario Modernización:

- Salto tecnológico en la demanda y cambio energético con énfasis en gases combustibles como un camino transitorio hacia la descarbonización.
- Adopción de tecnologías con los mejores rendimientos energéticos en el mundo (2050).
- Mitigación de cambio climático: mayor grado de ambición, apalancada principalmente por el uso de combustibles gaseosos.
- Mayores penetraciones de generación distribuida.
- Reducción de consumo de leña más ambicioso que en el escenario de actualización para el sector residencial rural.
- Digitalización y descentralización: mayor penetración y utilización de equipos para la localización automática de fallas, medición inteligente e *Internet of Things* (IoT) para sensores y otros equipos. Asimismo, desarrollo de inversores inteligentes para las plantas de generación intermitente y el uso de drones para operar y mantener la infraestructura crítica de transporte de energéticos.
- Como riesgo *lock-in* se identifica que la participación de gases combustibles como energéticos requieren de altas inversiones, lo cual puede retardar la entrada de otras alternativas más eficientes y menos contaminantes.
- Como *riesgo ambiental* se identifica un incremento de GEI por la combustión de gases combustibles al igual que un aumento en la generación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) por la participación de la energía eólica y solar.
- El riesgo en *capital humano* de este escenario se debe a la necesidad de incluir programas y talento humano capacitado para la operación y mantenimiento de la nueva maquinaria.



## Escenario Inflexión:

- Nueva era energética: gran parte de la economía se electrifica.
- Mitigación de cambio climático: mayores ambiciones en términos de descarbonización, pero con mayores incertidumbres tecnológicas.
- Instalación de captura y secuestro de carbono en plantas térmicas.
- Sustitución del gas natural por energía eléctrica en el sector residencial (estufas).
- Electrificación de un porcentaje de procesos de calor directo en el sector industrial.
- Distritos térmicos, infraestructura para la prestación del servicio de energía térmica (calefacción-acondicionamiento) en entornos urbanos (13 ciudades) y con potencia de reducción de 138 Mt CO<sub>2</sub>eq/año.
- Digitalización y descentralización: al menos el 75% de los circuitos contará con localización automática de fallas, y se adoptarán Soluciones Avanzadas de Gestión de la Distribución (ADMS, por sus siglas en inglés) y Sistemas de Gestión de Recursos Energéticos Distribuidos (DERMS, por sus siglas en inglés) en todos los distribuidores para la comunicación, coordinación y gestión de recursos distribuidos.
- Implementación de sistemas de gestión de energía en edificaciones y hogares (BEMS/ HEMS).
- Generación distribuida con almacenamiento a pequeña escala.
- El riesgo *lock-in* surge por la generación de fuentes no convencionales de energía (FERNC), las cuales, al ser de menor escala e intensidad, presentan menos barreras de entrada para nuevas tecnologías. Por otro lado, la definición de estándares para la digitalización de medidas, la automatización de procesos y el uso extensivo de tecnologías de información puede implicar altos costos de cambio.
- Como *riesgo ambiental*, se identifica una mayor generación de RAEE, debido a una participación aun mayor de energía eólica y solar. La generación geotérmica implica la emisión de sustancias químicas a la atmósfera; igualmente, las pequeñas centrales nucleares implican retos en la gestión de residuos.
- El riesgo en *capital humano* está relacionado con la necesidad de formar capital humano capacitado para la operación de proyectos FERN, de energía nuclear y de tecnologías de punta.

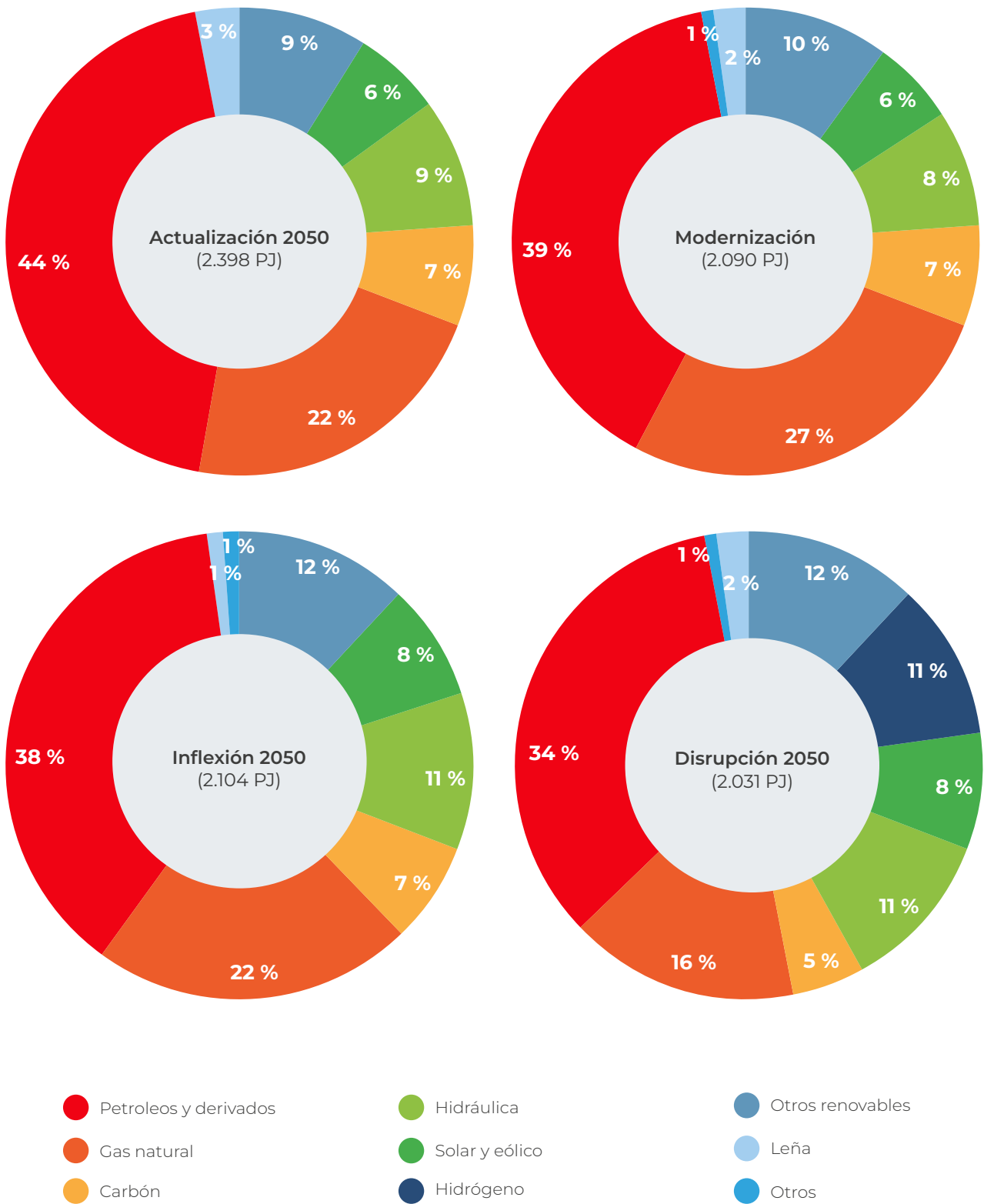


## Escenario Disrupción:

- Considera tecnologías que hoy se encuentran en etapas de desarrollo muy preliminares, con un alto potencial de aporte a la mitigación del cambio climático.
- Sustitución total de la leña en el sector residencial rural en 2050.
- Sustitución parcial por hidrógeno en el sector industrial y en algunos modos de transporte terrestre.
- Digitalización: mismas medidas del escenario anterior, además de la incorporación masiva de elementos de inteligencia artificial (IA) y robotización en la toma de decisiones, para operar equipos y predecir y minimizar el consumo de energía.
- Para el análisis del riesgo *lock-in*, respecto a la posibilidad de generación centralizada o descentralizada de hidrogeno, se considera que las inversiones se pueden enfocar en su producción y no en su distribución.
- En cuanto a *riesgos ambientales*, se cuenta con una alta generación de diferentes tipos de residuos; como las baterías, que en su proceso de fabricación generarán emisiones CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> y COV y en su disposición pueden generar afectaciones en agua, aire y suelo.
- En cuanto al riesgo en *capital humano*, se identifica la necesidad de formar talento humano altamente capacitado en temas relacionados no solo con las fuentes energéticas, sino también con temas como la inteligencia artificial y *Big Data*. Igualmente, se debe fomentar la investigación en nuevos materiales para la aplicación en energía solar, transmisión de energía y sistemas de almacenamiento.

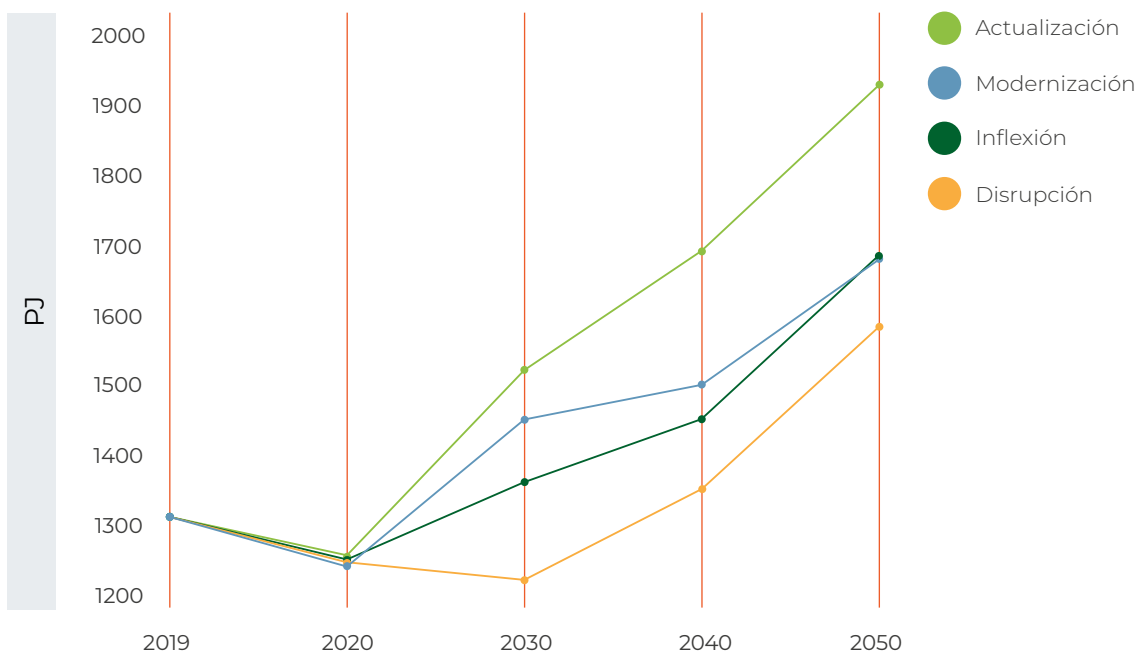
A partir de lo anterior, se obtuvieron los siguientes resultados de modelación sobre la composición de la oferta energética y la demanda de energía por escenario:

📉 **Gráfico 1-1.** Composición de la oferta por energético PEN 2020-2050



Fuente: UPME, 2021

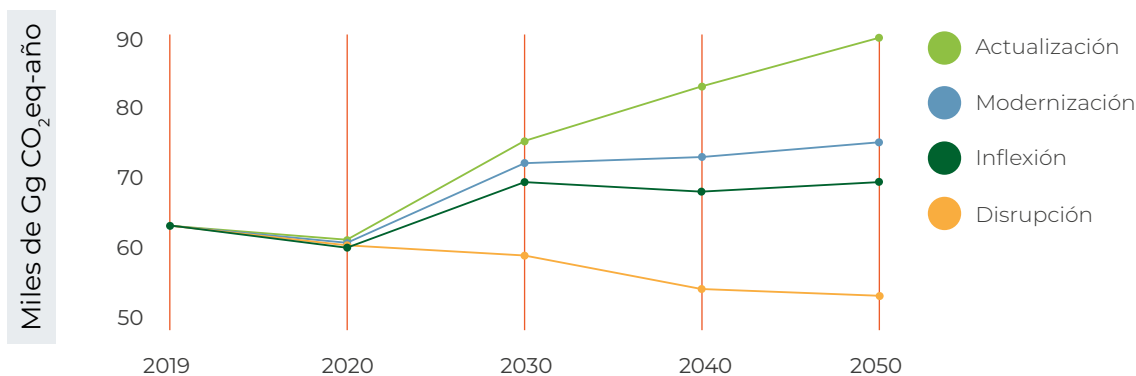
Gráfico 1-2. Demanda de energía por escenario PEN 2020-2050



Fuente: UPME, 2021

Las emisiones proyectadas a 2050 para cada uno de los escenarios se presentan a continuación:

Gráfico 1-3. Emisiones de demanda de energía



Fuente: UPME, 2021

La transformación energética es un proceso que toma tiempo. Además, requiere grandes inversiones y se habilita a través de políticas públicas, que actúan como catalizador en este proceso mediante señales de precios de los energéticos; estándares mínimos de desempeño; elimi-

nación de barreras de entrada; promoción a la participación, innovación y a nuevos negocios; y el establecimiento de un marco normativo y económico propicio para la inversión (UPME, 2021). A continuación se presenta un esquema comparativo de los escenarios para cada pilar del plan:

📌 **Tabla 1-3.** Comparación de escenarios con objetivos del PEN 2020-2050.

Pilar	Pilar 1. Seguridad y confiabilidad en el abastecimiento	Pilar 2. Mitigación y adaptación al cambio climático	Pilar 3. Competitividad y desarrollo económico		
Objetivo	Diversificar la matriz energética.	Propender por un sistema energético de bajas emisiones de GEI.	Adoptar nuevas tecnologías para el uso eficiente de recursos energéticos.	Promover un entorno de mercado competitivo y la transición hacia una economía circular.	
Indicador de seguimiento	Participación FNCER en la oferta primaria de energía	Índices de calidad de prestación. Emisiones de CO <sub>2</sub> asociadas al consumo de energía	Porcentaje de energía útil sobre el consumo total de energía final	Intensidad energética	Consumo per cápita de leña
Línea base	3,1 %	61.955 Gg CO <sub>2</sub> eq-año	31 %	2,29 kJ/COP	132 ton /mil habitantes
Actualización 2050	15 %	90.008 Gg CO <sub>2</sub> eq-año	49 %	1,3 kJ/COP	67,54 ton /mil habitantes
Modernización 2050	17 %	75.674 Gg CO <sub>2</sub> eq-año	55 %	1,2 kJ/COP	48,30 ton /mil habitantes
Inflexión 2050	19 %	69.458 Gg CO <sub>2</sub> eq-año	58 %	1,1 kJ/COP	35,77 ton /mil habitantes
Disrupción 2050	29 %	53.247 Gg CO <sub>2</sub> eq-año	63 %	1,1 kJ/COP	35,72 ton /mil habitantes

Nota: Incluye la participación de hidrógeno verde

Fuente: UPME, 2021



Finalmente, sobre cada uno de los pilares identificados en el plan, se hacen las siguientes precisiones:

### **Pilar 1. Seguridad y confiabilidad en el abastecimiento (UPME, 2021)**

- La demanda de energía aumentará a futuro debido al crecimiento económico y poblacional, por lo que el abastecimiento interno dependerá de la explotación de recursos locales, la diversificación de la matriz y el comercio internacional de energéticos.
- Los combustibles fósiles participan de forma importante en la oferta de energía primaria, por tanto, las decisiones nacionales de explotación de hidrocarburos influyen sobre el abastecimiento energético.
- La energía renovable se perfila como la fuente principal para la generación eléctrica, sin embargo, requiere de altas inversiones en infraestructura y de capital humano capacitado para la implementación, operación y mantenimiento de estas soluciones.

### **Pilar 2. Mitigación y adaptación al cambio climático (UPME, 2021)**

- Para cumplir las metas de reducción de emisiones de GEI, se requiere la adopción de nuevas tecnologías para la generación de energía y, especialmente, para la demanda. Esto incurre en altas inversiones y riesgos ambientales asociados a las iniciativas a desarrollar.
- Las señales de mercado y los mecanismos de financiación para el recambio tecnológico son fundamentales para la descarbonización.
- Avanzar hacia la carbono neutralidad requiere de la acción conjunta de todos los sectores de la economía del país. Además, se debe incentivar medidas ambiciosas de recambio tecnológico; sustitución de combustibles fósiles e implementación de tecnologías de uso; captura y almacenamiento de carbono; forestación y reforestación; restauración de tierras; y secuestro de carbono en el suelo, entre otras, mediante esquemas de financiación innovadores.



### Pilar 3. Competitividad y desarrollo económico (UPME, 2021)

- Alcanzar las metas de eficiencia energética dependerá de los mecanismos de financiación que estén disponibles para la modernización tecnológica.
- La estructuración financiera de estas iniciativas debe considerar nuevos esquemas que incorporen aspectos ambientales, sociales y de gobernanza, tales como los Principios de Inversión Responsable (PRI, por sus siglas en inglés).
- La evolución en precios de las tecnologías del sector transporte es clave para la diversificación de la matriz, la eficiencia energética y la descarbonización.
- La transformación energética brinda oportunidades para la creación de una nueva industria nacional y el empoderamiento local. Este es un proceso de tendencia mundial que requiere de la acción conjunta del sector público y privado para gestionar proactivamente los riesgos de mercado, al igual que otros emergentes que se deriven de los cambios en las tendencias de consumo de energéticos.



### Pilar 4. Conocimiento e innovación (UPME, 2021)

- La transformación energética es la oportunidad de desarrollo para nuevos e innovadores negocios, pues las nuevas soluciones que viabilizarán la descarbonización, descentralización y la digitalización del sector energético desplazarán las tecnologías actuales.
- La gestión del conocimiento es necesaria para habilitar la transformación energética y el desarrollo sostenible. Esto, si está basada en la consolidación de una economía circular, facilitada por la formación de capital humano y la investigación científica de alianzas entre la academia y el sector privado.
- La automatización, así como la creciente disponibilidad de datos, requiere de capital humano con formación y habilidades distintas a las que el sector ha demandado hasta el momento.

## 1.2.2 Actualización NDC

Este documento presenta la actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) de Colombia para el periodo 2020-2030. La NDC incorpora tres componentes:

- 1** Mitigación de gases de efecto invernadero (GEI);
- 2** adaptación al cambio climático; y
- 3** medios de implementación, como componente instrumental de las políticas y acciones para el desarrollo bajo en carbono, adaptado y resiliente al clima.

En esta sección se abordará los aspectos relativos al primer componente (Gobierno de Colombia, 2020).

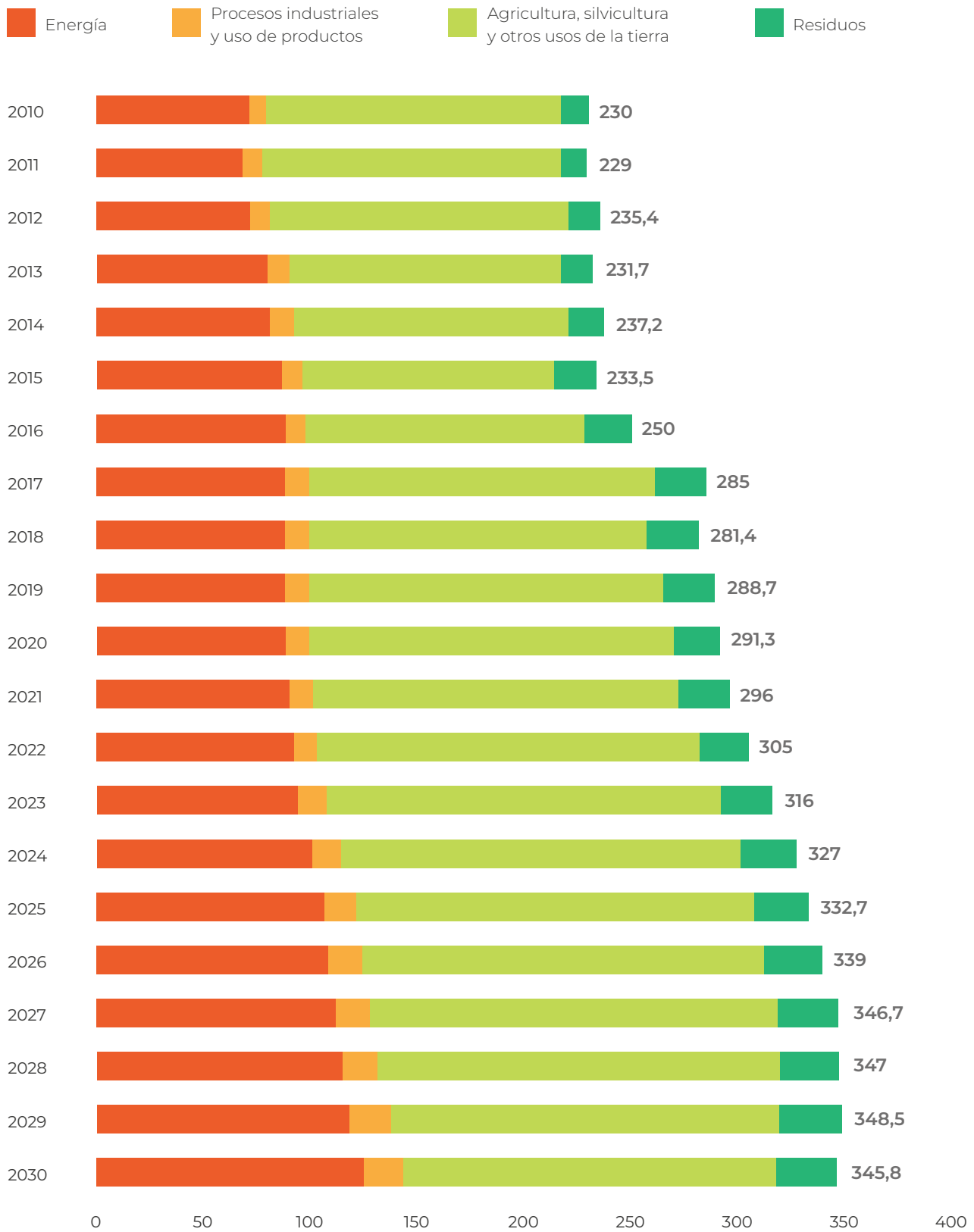
La NDC busca definir metas y medidas para la gestión del cambio climático —para el periodo 2020-2030— que, al mismo tiempo, permitan avanzar en el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030. Esta actualización se articula con la Estrategia de Largo Plazo E2050, que Colombia comunicará a la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC) en antelación a la COP26 (Gobierno de Colombia, 2020).

El proceso de actualización examinó los efectos de la materialización de las medidas de mitigación, adaptación y medios de implementación para considerar la perspectiva socioeconómica e incorporar información de mayor precisión,

para determinar los diferentes caminos que permitirán consolidar una descarbonización justa e inclusiva. En este sentido, esta versión de la NDC se desarrolló bajo los siguientes principios: i) seguridad alimentaria y erradicación de la pobreza; ii) transición justa de la fuerza laboral; iii) derechos humanos; iv) equidad intergeneracional e inclusión territorial; v) enfoque diferencial con comunidades étnicas y vulnerables; vi) igualdad de género y empoderamiento de la mujer; vii) protección del agua, ecosistemas y biodiversidad; viii) implementación en el contexto del COVID-19. Cabe señalar que la economía circular ha sido reconocida como una herramienta indispensable en la mitigación de emisiones de GEI en todos los sectores económicos, de forma que muchas de las medidas en este documento fueron planteadas con este enfoque (Gobierno de Colombia, 2020).

Las metas y medidas de reducción de emisiones de GEI incorporadas en este documento se derivan en gran parte de los Planes Integrales de Gestión de Cambio Climático Sectoriales (PI-GCCS), que son liderados por las diferentes carteras ministeriales. Ahora bien, en términos de mitigación de emisiones de GEI, la meta actualizada de Colombia representa una visión a largo plazo, con la aspiración de lograr la carbono neutralidad —tal como fue manifestado por el Gobierno nacional en la Cumbre de Acción Climática de las Naciones Unidas— en septiembre de 2019. Esta meta se verá reflejada en el corto plazo a través del Plan Nacional de Desarrollo y a mediano plazo, en una visión a 2030, que se establece a través de la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono y la Estrategia Integral de Control de la Deforestación y Gestión de los Bosques. Por último, a largo plazo, se verá reflejada en la Estrategia de Largo Plazo E2050 (Gobierno de Colombia, 2020).

📉 **Gráfico 1-4.** Desagregación de emisiones según su clasificación IPCC - actualización NDC



Nota: los valores mostrados corresponden al escenario Continuidad

Fuente: Gobierno de Colombia, 2020

 **Tabla 1-4.** Emisiones por categoría IPCC (nivel 1) para los años 2015, 2020, 2025 y 2030 – actualización NDC

IPCC nivel 1	2015	2020	2025	2030
Energía	86,67	88,60	106,47	124,80
Procesos industriales y uso de productos	9,42	10,66	14,54	18,41
AFOLU	117,94	170,44	186,45	174,50
Residuos	19,55	21,60	25,24	28,09
<b>Total (Mt CO<sub>2</sub>eq)</b>	<b>233,58</b>	<b>291,30</b>	<b>332,70</b>	<b>345,80</b>

Fuente: Gobierno de Colombia, 2020

La actualización del escenario de referencia incluyó siete (7) nuevas categorías de emisiones<sup>8</sup> respecto a la NDC anterior, debido a mejoras en la disponibilidad de la información. De estas, las categorías consideradas por el sector minero energético son: otras industrias de la energía (1Aci) y humedales —emisiones por difusión en embalses para generación de energía— (3B4) (Gobierno de Colombia, 2020).

Como parte de su meta de mitigación, Colombia se comprometió a emitir como máximo 169,44 Mt CO<sub>2</sub>eq en 2030, equivalente a una reducción del 51% de las emisiones de GEI respecto a la proyección en dicho año en el escenario de referencia. Del mismo modo, se espera que entre 2027 y 2030 se evidencie un decrecimiento en las emisiones que conduzca al país hacia la carbono neutralidad a mediados de siglo. Asimismo, dentro de los objetivos planteados se requiere establecer presupuestos de carbono para el periodo 2020-2030 a más tardar en 2023, y reducir las emisiones de carbono negro

en 40% respecto al nivel de 2014 (Gobierno de Colombia, 2020).

Colombia contempló en su NDC la adopción de medidas para reducir las emisiones de contaminantes climáticos de vida corta (SLCP, por sus siglas en inglés), dentro de los que se incluye el carbono negro, debido a su contribución en el detrimento de la calidad del aire y su potencial de riesgo ambiental para la salud. En relación con lo anterior, el país consolidó la Estrategia Nacional de Mitigación de Contaminantes Climáticos de Vida Corta, para optimizar la gestión de la información relacionada con este tipo de contaminantes climáticos. Así, el país busca adoptar y promover el uso de herramientas que sirvan para estimar los beneficios asociados a reducir su emisión, fortalecer la capacidad institucional, replicar casos de éxito de aplicación de las herramientas adoptadas y visibilizar la contribución de dichas herramientas al fortalecimiento institucional y al cumplimiento de metas (Gobierno de Colombia, 2020).

8. Otras industrias de la energía (1Aci), en lo referente a la quema de combustibles para producción de carbón; minería y cantería (1A2i); transporte por tuberías (1A3ei); tierras forestales que permanecen como tales (3B1ai), específicamente en el consumo de leña;

tierras convertidas en tierras forestales (3B1b); humedales (3B4), relacionada con las emisiones por difusión en embalses para generación de energía; y emisiones no CO<sub>2</sub> por quema de biomasa (3C1).

## Metas de reducción de emisiones de GEI en 2030 (MtCO<sub>2</sub>eq)

El potencial modelado del aporte a la meta del sector minero energético es de 11,2 Mt CO<sub>2</sub>eq.

⬇ **Tabla 1-5.** Líneas estratégicas de mitigación sector minero energético - actualización NDC Colombia

Línea estratégica: eficiencia energética	
<p>Busca identificar lineamientos para optimizar el despacho de energía eléctrica, con el fin de promover el aumento de eficiencia en las centrales. Se busca que para que esto permita reducir emisiones de GEI de forma costo-efectiva, sin afectar las condiciones del mercado eléctrico ni la confiabilidad de la prestación del servicio. La eficiencia energética se ha planteado como una opción transversal a los tres subsectores (energía eléctrica, hidrocarburos y minería).</p>	
Actividades	Potencial [Mt CO <sub>2</sub> eq]
<ul style="list-style-type: none"> <li>Fortalecimiento del Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PROURE)</li> <li>Gestión de la oferta</li> </ul>	0,956-1,21 (PIGCCme)
Línea estratégica: emisiones fugitivas	
<p>Esta línea estratégica busca promover la adecuada gestión de las emisiones fugitivas asociadas a la cadena productiva de los hidrocarburos, y aprovechar el gas natural capturado para otros fines. Asimismo, fomenta el aprovechamiento de estas emisiones para que las actividades de estos sectores sean sostenibles, lo cual puede representar un beneficio económico para las empresas.</p>	
Actividades	Potencial [Mt CO <sub>2</sub> eq]
<ul style="list-style-type: none"> <li>Generación de información</li> <li>Regulación de las emisiones fugitivas</li> </ul>	0,39-3,24 (PIGCCme)
Línea estratégica: gestión de la demanda	
<p>Esta línea estratégica busca reducir la diferencia de consumo de energía eléctrica entre horas pico y valle, gestionar la generación de energía eléctrica en horas valle a partir de fuentes no contaminantes y promover la futura implementación de tecnologías, como las redes inteligentes y las tarifas dinámicas.</p>	
Actividades	Potencial [Mt CO <sub>2</sub> eq]
<ul style="list-style-type: none"> <li>Tarifa horaria (tarifa diferenciada)</li> <li>Agregador de la demanda</li> </ul>	0,22-2,01 (PIGCCme)
Línea estratégica: generación de electricidad	
<p>Esta línea estratégica tiene como objetivo la diversificación de la matriz energética colombiana, la promoción de la autogeneración de energía mediante fuentes alternativas y la transformación de la generación energética en las Zonas no Interconectadas. Además, busca la armonización de los requisitos ambientales para el desarrollo de las FERNC (fuentes de energía renovable no convencionales), en concordancia con los objetivos referentes a este tema planteados en el Conpes de crecimiento verde 3934.</p>	
Actividades	Potencial [Mt CO <sub>2</sub> eq]
<ul style="list-style-type: none"> <li>Diversificación de la matriz energética</li> <li>Transformación de las Zonas No Interconectadas – (ZNI)</li> </ul>	4,74-7,98 (PIGCCme)

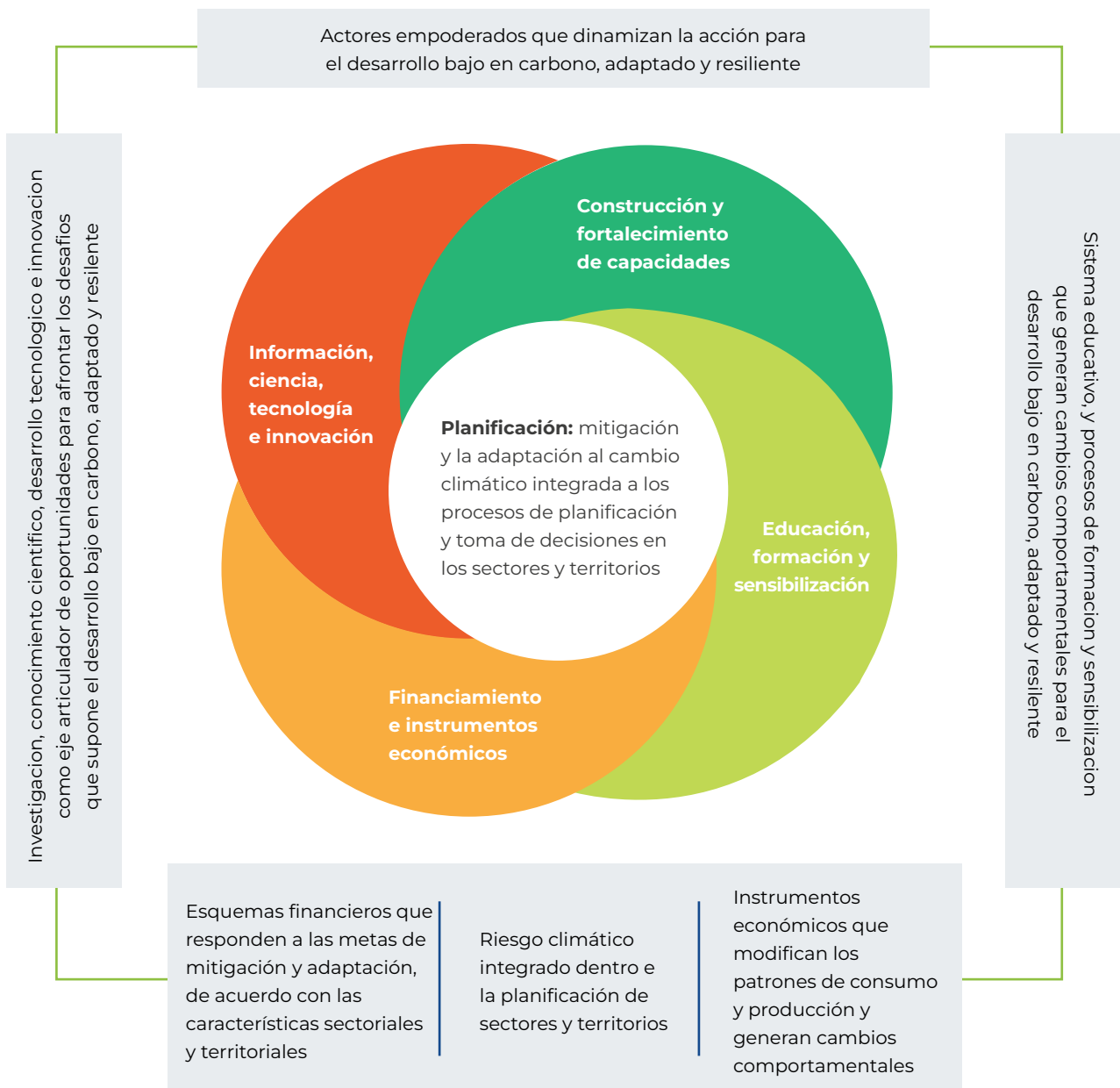
Fuente: elaboración propia con base en Gobierno de Colombia, 2020.

## Medios de implementación

Estos medios buscan establecer las condiciones que permitan crear un entorno favorable para llevar a cabo las acciones requeridas para cumplir las metas establecidas en la NDC, al igual que el aumento progresivo de la ambición. Dichas condiciones buscan consolidar las bases para una aproximación pragmática a las acciones de mitigación y adaptación al cambio climá-

tico, apoyan el proceso de toma de decisiones y promueven la participación de diferentes actores. En este sentido, estos medios abarcan 5 ámbitos complementarios entre sí, que permiten identificar las necesidades de las metas y medidas propuestas en mitigación y adaptación (Gobierno de Colombia, 2020). A continuación, un esquema de este planteamiento:

 **Figura 1-2.** Esquema de medios de implementación de la NDC de Colombia



Fuente: Gobierno de Colombia, 2020

## 1.2.3 Estrategia Climática de Largo

### Plazo de Colombia E2050

Bajo el liderazgo del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), el Gobierno Nacional de Colombia, en su objetivo de alcanzar la resiliencia climática al año 2050 (es decir, carbono neutralidad y capacidad adaptativa de los diferentes territorios y sectores económicos), ha formulado la Estrategia Climática de Largo Plazo para cumplir con el Acuerdo de París (E2050). En este sentido, si bien la E2050 no es un documento normativo, sí es un documento que permite orientar e impulsar acciones y compromisos en todo el territorio nacional en materia de cambio climático.

Para la E2050, el sector minero energético se configura como un actor fundamental en el planteamiento de diferentes alternativas para alcanzar la carbono neutralidad del país al año 2050, haciendo énfasis en la necesidad de acción temprana para consolidar procesos de transformación e inversión eficientes, en los que la electricidad es clave para lograr un futuro carbono neutral (a partir de cambios profundos en la matriz energética). Asimismo, la Estrategia resalta la contribución del sector minero al proceso de transición energética, transformación que requerirá del suministro de metales y minerales para el desarrollo de infraestructura y tecnologías limpias/bajas en carbono.

Es importante considerar que Colombia cuenta con una condición asimétrica fundamental<sup>9</sup> que la hace tener perspectivas y responsabilidades particulares ante los compromisos de cambio climático; condición que igualmente está reflejada en el sector minero energético<sup>10</sup>. En este sentido, para alcanzar la carbono neutralidad del país y del sector, es necesario abordar caminos armó-

nicos que reflejen las condiciones particulares del país y que permitan emplear el potencial minero energético de manera cada vez más eficiente y limpia, sin estigmatizar tecnologías y/o procesos que hoy soportan gran parte de la economía.

Cabe señalar que los planteamientos de la Estrategia Climática de Largo Plazo de Colombia para cumplir con el Acuerdo de París (E2050), además de estar articulados con instrumentos de planeación sectorial tales como el Plan Energético Nacional 2020 (PEN2020) y el Plan Integral de Gestión de Cambio Climático (PIGCCme), también se encuentran alineados con las políticas del sector definidas en los actos legislativos: Ley 143 de 1994, Ley 1715 de 2014, Ley 1931 de 2018, y la más reciente Ley 2099 de 2021.

Durante los últimos años, las políticas energéticas del país si bien han impulsado la integración de las energías renovables, como la energía solar y la energía eólica, también han incentivado el aprovechamiento y uso de fuentes fósiles, con un impulso cada vez mayor a la eficiencia energética en sus procesos y la habilitación de mecanismos que permitan alcanzar la carbono neutralidad operativa. Esto no solo le apunta a las metas de cambio climático, sino que también permite garantizar los objetivos de prestación del servicio público de electricidad de una manera eficiente, confiable y segura.

Los subsectores de energía eléctrica, hidrocarburos y minería son fuentes dinamizadores de la economía colombiana, que no solo garantizan la seguridad y autonomía energética del país, sino que también representan la principal fuente de ingreso económico para algunos terri-

9. Si bien las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) representan solo el 0,6 % del total a nivel mundial, Colombia es uno de los países que tiene mayor condición de vulnerabilidad al cambio climático.

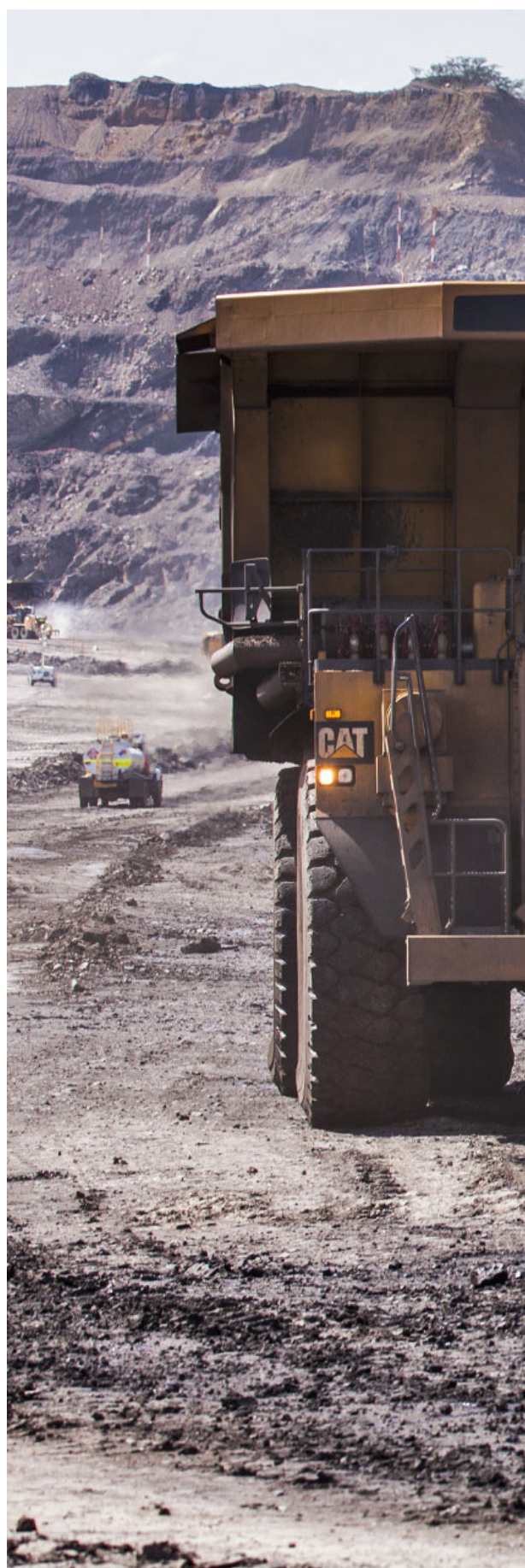
La producción de minería y de energía (electricidad e hidrocarburos) del país representa entre el 11 y el 15 % de las emisiones de GEI nacionales.



torios en Colombia. De esta forma, se debe considerar que las centrales térmicas en Colombia representan alrededor del 5% de las emisiones nacionales y son la principal fuente de respaldo en la confiabilidad del sector eléctrico, por lo que aún son consideradas primordiales en el funcionamiento a largo plazo. Sin embargo, es importante mencionar que las plantas termoeléctricas a carbón y gas deberán incrementar sus esfuerzos para aumentar sus niveles de eficiencia, además de adoptar tecnologías de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) y/o estrategias de compensación para ser competitivas al año 2050, evitando su eventual cierre o desmantelamiento.

Para tal fin, la E2050 plantea la necesidad de acelerar la innovación y los marcos políticos habilitantes (regulatorios y financieros) que permitan impulsar el desarrollo de estas y otras nuevas tecnologías, no solamente aquellas que apuntan a la diversificación de la matriz energética, sino también las que aportarían en el objetivo de la carbono neutralidad y la transformación de los sectores donde las emisiones son difíciles de abatir. Este es el caso de las tecnologías CCUS, consideradas de vital importancia en la transición energética colombiana debido a que: i) no generan competencia por terreno u otros desafíos secundarios, y ii) son el único grupo de tecnologías que contribuyen de manera dual a la carbono neutralidad; es decir, reducen emisiones en los principales sectores de la economía de manera directa y remueven CO<sub>2</sub> al balance de emisiones que no se pueden evitar, lo que es un parámetro crítico para alcanzar el “cero neto” al 2050.

El sector minero es un actor de relevancia para la transición energética y es un aliado estratégico para impulsar la electrificación de la canasta energética; que es una acción indispensable para alcanzar la carbono neutralidad al año 2050, y que requerirá del suministro sostenible y el aprovechamiento de minerales (como cobre y ferroníquel, entre otros metales propios del proceso de diversificación de la canasta minera) y de agregados pétreos. Por otra parte, si bien en el mundo se prevé una reducción en la demanda para



el año 2050, el carbón seguirá siendo un mineral de relevancia para la economía colombiana, por lo que el impulso a la producción de un carbón más eficiente y carbono neutral garantizará la competitividad de la industria colombiana en un mercado cada vez más exigente. Ante esto, cabe resaltar que la política del Ministerio de Minas y Energía está enfocada en identificar nuevas oportunidades que le permitan al sector adaptarse a las nuevas condiciones políticas y de mercado del orden internacional. Entre las acciones asociadas a este objetivo se encuentran: i) aumento de eficiencia energética, ii) uso de tecnologías de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS), iii) compensaciones ambientales y procesos de remoción natural, y iv) uso de hidrogeno azul, entre otras.

Otras opciones de transformación planteadas por la E2050 contemplan ambiciones y oportunidades relacionadas con la economía circular, el desarrollo de edificaciones altamente eficientes y la electrificación de la economía como iniciativas importantes para lograr la carbono neutralidad. Para alcanzar estos objetivos se destaca la inclusión del reciclaje y el aprovechamiento de minerales estratégicos en los procesos de transición energética, y de materiales pétreos propios de la construcción de edificaciones neutras en carbono. Este concepto de economía circular en el sector minero está vinculado al esquema de minería climáticamente inteligente, cuyo objetivo es integrar medidas de mitigación de GEI (inclusión de energías renovables en el sector, nuevas formas de extracción basada en innovación y sostenibilidad, y eficiencia energética en toda la cadena de valor) y la adaptación al cambio climático (empleando soluciones basadas en la naturaleza y «*Forest Smart Mining*») con el fin de reducir los impactos de la actividad. Asimismo, se promoverá la explotación de estos recursos bajo nuevas formas de extracción basadas en innovación, sostenibilidad, y eficiencia energética.

Cabe señalar que estos recursos serán importantes en el objetivo de alcanzar las metas establecida por Colombia a través del programa Neto Cero Carbono (NCC) (programa que es liderado por el Consejo Mundial de Construcción

Sostenible - WorldGBC) y relacionadas con: i) todas las edificaciones nuevas serán *net zero* a partir del 2030, y ii) todas las edificaciones existentes serán *net zero* a partir de 2050; esto a través de cadenas de suministro bajas en carbono y/o compensaciones.

Finalmente, se debe considerar que para alcanzar la carbono neutralidad del sector minero energético será necesario instaurar escenarios habilitantes para diversas tecnologías y estrategias que, además de facilitar la transición energética del país, permitan la reducción, captura y secuestro permanente de CO<sub>2</sub>. Las tecnologías clave que el sector minero energético necesita para alcanzar emisiones netas cero se conocen hoy en día, pero no todas están listas. En este sentido, es recomendable que en las Estrategia de Largo Plazo se impulsen iniciativas de política pública que incentiven tanto procesos de inversión I+D (innovación y desarrollo) como procesos de despliegue y masificación. Conscientes de esta necesidad, se han definido acciones concretas en esta materia a través de la ley de transición energética recientemente adoptada (Ley 2099 de 2021).

**Es recomendable que en las Estrategia de Largo Plazo se impulsen iniciativas de política pública que incentiven tanto procesos de inversión I+D (innovación y desarrollo) como procesos de despliegue y masificación.**

## 1.3 Políticas y estrategias sectoriales

### 1.3.1 Misión de Transformación Energética

El sector eléctrico colombiano ha logrado posicionarse como referente en la región debido a la implementación de diferentes cambios regulatorios e institucionales a lo largo de los últimos 25 años (Ministerio de Minas y Energía, 2020a). En 2019 se elaboraron las bases que permitieron el desarrollo de las subastas de contratación de largo plazo (resoluciones 40590 y 40725 de 2019), que impulsaron la integración futura de más de 2800 MW de FNCER, instalados o en construcción. Estos tienen más de 50 proyectos de iniciativa privada, con lo que se espera alcanzar un 13% de la generación de energía nacional a partir de FNCER, superando la meta de 1500 MW estipulada en el Plan Nacional de Desarrollo (Ministerio de Minas y Energía, 2020b).

El Ministerio de Minas y Energía —asesorado por un conjunto de expertos— adelantó la Misión de Transformación para explorar temas relevantes para las ambiciones, además de plantear alternativas para anticiparse a los nuevos desafíos para el sector energético nacional, garantizar el suministro de energía a precios eficientes en todo momento, lograr una mayor calidad y cobertura del servicio, y aumentar la resiliencia ante fenómenos climáticos (Ministerio de Minas y Energía, 2020a). El proceso de transformación energética en Colombia debe atender aspectos prioritarios en el funcionamiento del sector minero energético, especialmente en lo relacionado a la dinámica del mercado eléctrico con principios de transparencia y eficiencia, y a la participación de los actores ya existentes y aquellos que surgirán a medida avance la transformación, como *prosumers* y agrupadores, entre otros. Una de las metas del país es lograr la expansión del sistema eléctrico nacional basada en un mercado robusto y la consolidación de una matriz energética diversa que incorpore fuentes de energía renovables,

lo que requiere de la implementación de infraestructura que promueva su participación equitativa y competitiva en el mercado de largo plazo (Corredor et al., 2020).

Un criterio transversal en el documento es la sostenibilidad a largo plazo del sector eléctrico, considerando la suficiencia de recursos, los mecanismos de subsidios eficientes y el acceso al recurso energético en zonas alejadas (Ortiz et al., 2020). Por esto, se presentan retos operacionales, financieros y administrativos que requerirán el desarrollo de nuevos esquemas contractuales que permitan dinamizar la oferta y la demanda —por ejemplo, del gas natural— y que viabilicen el desarrollo de proyectos estratégicos sectoriales (Chahín, et al., 2020).

Ahora bien, la transformación energética en sí misma se configura como un cambio de paradigma a un desarrollo sectorial más responsable en términos ambientales y sociales, que supla la demanda energética nacional y proyecte su óptimo desempeño en el largo plazo. En este sentido, se debe robustecer aspectos de la contratación, acceso al recurso y calidad de este, con el objetivo de lograr un triple impacto positivo. Además, hay que incorporar la variable de sostenibilidad y, en la medida de lo posible, contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de la población. De esta forma se podrá avanzar en la apropiación de combustibles más limpios (electricidad y gas) en aquellos hogares que utilizan leña, mediante la oferta de estos energéticos a precios asequibles (Ortiz et al., 2020).

El logro de una transformación energética en Colombia requiere de un proceso de análisis y reconstrucción de los marcos normativos y regulatorios, y de los arreglos institucionales que orientan el funcionamiento del sector minero energético en Colombia. Por tanto, es

necesario identificar las barreras de entrada en el mercado para lograr la diversificación de la matriz, la creación de oportunidades de simplificación de regulación y la incorporación de nuevas actividades mediante procesos de innovación. Además, es importante considerar mejorar la coordinación interinstitucional del sector y la asignación adecuada de funciones a las diferentes instituciones adscritas al sector minero energético, considerando su experiencia y capacidades técnicas (Barrera et al., 2020).

Lo anterior evidencia la necesidad de modernizar el marco institucional y regulatorio del sector eléctrico para facilitar la incorporación de nuevos agentes, tecnologías y esquemas transaccionales en el mercado de energía. Para esto, la Misión desarrolló insumos que aportarán a la construcción de la hoja de ruta para la energía del futuro — eficiente, confiable y sostenible al servicio de todos los colombianos—, que se articula en cinco focos:

- 1 Competencia, participación y estructura del mercado eléctrico
- 2 El gas natural en la transformación energética: abastecimiento, suministro y demanda
- 3 Descentralización y digitalización de la industria, y gestión eficiente de la demanda
- 4 Cierre de brechas, mejora de la calidad y diseño, y formulación eficiente de subsidios
- 5 Institucional y regulatorio

Se realizó un análisis para identificar los temas más relevantes para la transformación energética del país. Para esto se validó la *frecuencia* de las propuestas (definida como su recurrencia en los diferentes focos) y la *relación*<sup>11</sup> entre estas. Como resultado, se observó que los temas más destacados son: empoderamiento del usuario (2); descentralización (4); digitalización (5); redes de transporte<sup>12</sup> (7); redes de distribución (8); infraestructura, recursos energéticos distribuidos (DER<sup>13</sup>, por sus siglas en inglés), almacenamiento e infraestructura de medición avanzada (AMI<sup>14</sup>, por sus siglas en inglés) (9); y esquemas tarifarios dinámicos y nodales (12) (ver Figura 13).



11. Es un indicador de complementariedad entre los temas tratados, así como del potencial de implementación en conjunto. Es un indicador proxy de las sinergias entre ellas.

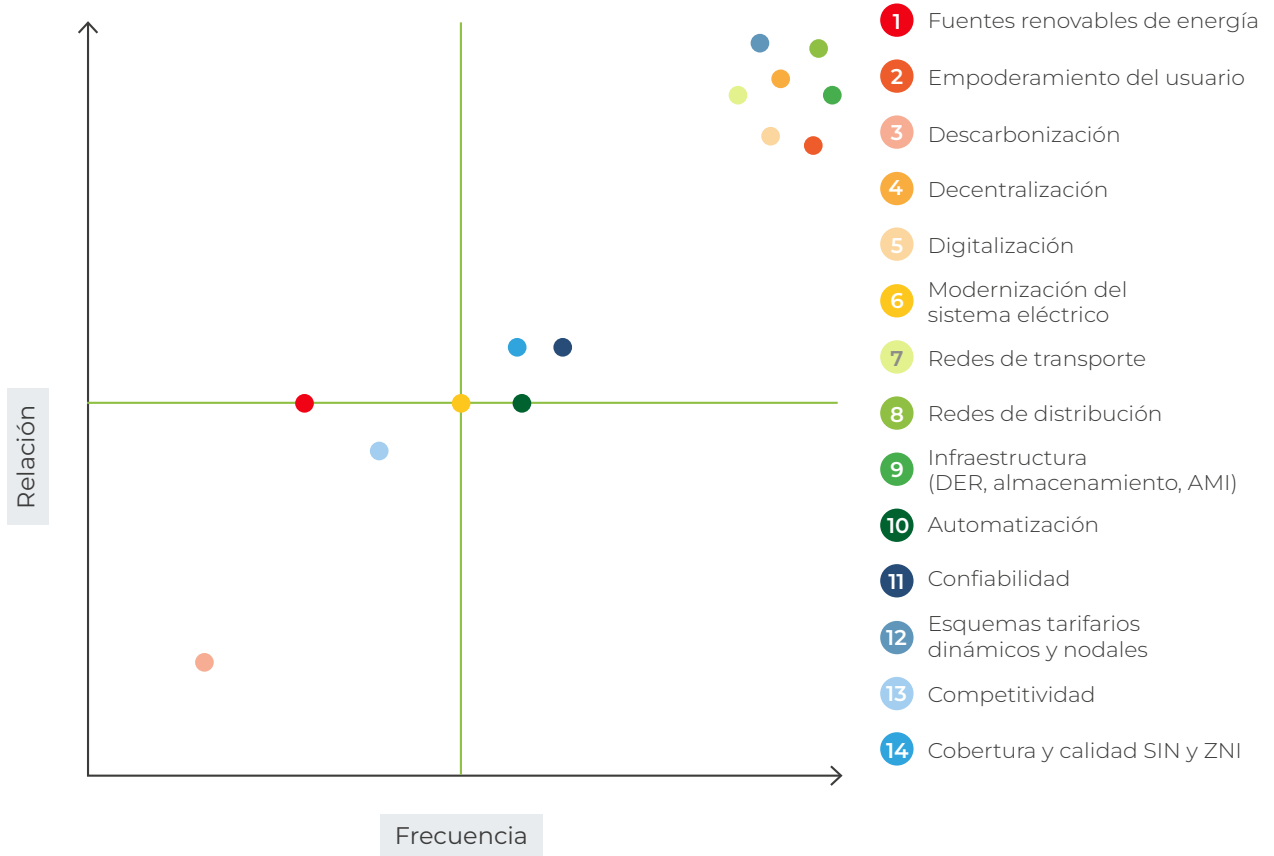
12. En los documentos de la Misión de Transformación Energética se emplea este término para referirse tanto a la infraestructura de

energía eléctrica (Focos 1, 3 y 5) como a la de gas (Foco 2, 4 y 5), sin embargo, el resultado presentado en la figura hace referencia a la primera, que también se conoce como redes de transmisión.

13. Distributed Energy Resource

14. Advanced Metering Infrastructure

**Figura 1-3.** Esquema de frecuencia y relación entre los temas tratados por los diferentes focos de la Misión de Transformación Energética de Colombia



Fuente: elaboración propia con base en Corredor et al., 2020; Chahín et al., 2020; Romero-Grass et al., 2020; Batle et al., 2020; Ortiz et al., 2020; y Barrera et al., 2020.



⬇ **Tabla 1-6.** Propuestas y medidas para la transformación energética de Colombia por foco

Propuestas				
Foco 1. Competencia, participación y estructura del mercado eléctrico				
<ul style="list-style-type: none"> <li>Modernizar el mercado eléctrico a corto plazo.</li> <li>Crear subastas de energía para eventos de fenómeno de El Niño y La Niña.</li> <li>Modificar el mecanismo de confiabilidad en el largo plazo.</li> <li>Crear precios multinodales (2022) y promover la formación eficiente de estos.</li> <li>Desarrollar un mecanismo de suficiencia para suplir la demanda de energía en cualquier condición.</li> <li>Evaluar las conexiones de los nuevos proyectos de FERNC y los refuerzos a la red, en cumplimiento a lo establecido en el código de planeamiento y la Resolución CREG 44 de 2013.</li> <li>Promover reglas de mercado con principios de transparencia, para generar liquidez mediante contratos de suficiencia de largo plazo.</li> <li>Participación de la demanda: medidores inteligentes y precios dinámicos en tiempo real.</li> <li>Pronóstico del crecimiento potencial de DER en los circuitos de distribución individuales (es decir, análisis de capacidad de almacenamiento) y su impacto en los mercados mayoristas, la confiabilidad y la planificación de la transmisión de alto voltaje.</li> <li>Inversiones en almacenamiento a gran y pequeña escala.</li> <li>Expansión ágil y dinámica de las redes de transporte de electricidad.</li> <li>Monitoreo automatizado de la red de distribución.</li> <li>Las obligaciones energéticas firmes existentes deben respetarse.</li> <li>Esquemas de armonización regulatoria para conexiones internacionales.</li> <li>Crear la figura de agente internacional para negociar en mercados extranjeros con energía producida en Colombia y en países donde exista integración.</li> </ul>	Disminución del umbral para Usuarios No Regulados (UNR, en adelante)	100 kW a 50 kW	2021–2022	
			50 kW a 0 kW	2026–2030
		Mercado de energía de corto plazo basado en precios nodales		2022
		Agregación por parte de comercializadores de usuarios regulados		2021–2022
		UNR pueden tener más de un proveedor para cada frontera comercial		
		Esquema binomial de tarifas de capacidad y energía a nivel de horas		
		Regular las plataformas comerciales entre los consumidores		

Propuestas			
Foco 2. El gas natural en la transformación energética. Abastecimiento, suministro y demanda			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incluir en la oferta de gas la demanda energética para la generación energía eléctrica.</li> <li>• Ejecución de proyectos estratégicos de regasificación.</li> <li>• Esquema contractual con horizonte de 10 años, considerando la oferta disponible en términos de suministro o capacidad de regasificación.</li> <li>• Viabilizar la puesta en el mercado de gas contingente.</li> <li>• Racionalización de los procesos asociados con el licenciamiento ambiental y consultas previas con comunidades.</li> <li>• Distinguir entre yacimientos de roca naturalmente fracturada y la tecnología de <i>fracking</i>.</li> <li>• Desarrollar proyectos prioritarios de expansión de red: Gasoducto Costa Pacífica (SNT) y Gasoducto Jobo–Medellín.</li> <li>• Viabilizar donde sea factible proyectos de <i>fracking</i>.</li> <li>• Crear un gestor técnico del Sistema de Transporte y Almacenamiento.<sup>15</sup></li> <li>• Evitar regular el GNL para movilidad.</li> <li>• Permitir la entrada libre de vehículos limpios (GNV, GNL y Eléctricos cuando los haya)</li> </ul>	Demanda de combustible de centrales térmicas duales a gas natural	100 %	2024
	Planta de regasificación en la Costa Pacífica	400 GBTUD	dic-22
	Planta de regasificación en la Costa Caribe (La Guajira)	300 GBTUD	jun-23
		200 GBTUD	oct-24
	Convocatoria pública para la contratación del desarrollo del proyecto de la planta de regasificación de La Guajira		may-21
	Prórroga o sustitución de la planta de regasificación de El Cayao (400 GBTUD) al vencimiento del contrato	400 GBTUD	nov-26
	Entra en operación el gestor técnico del Sistema de Transporte y Almacenamiento		dic-22
	Concentración de PM <sub>10</sub>	30 ug/m <sup>3</sup>	2030

15. El gestor técnico del Sistema de Transporte y Almacenamiento genera equilibrio en el sistema de la siguiente manera: (1) el transportador le informa al gestor sobre cualquier desequilibrio o necesidad de realizar cualquier operación de equilibrio; (2) el gestor

actúa en el centro virtual buscando reflejar los flujos reales del sistema; (3) al final del día de balance, el gestor cobra (o paga) los cargos de balance a los agentes que causan el desequilibrio (costo compartido entre agentes) (Chahín, et al., 2020).

Propuestas			
Foco 3. Descentralización y digitalización de la industria y la gestión eficiente de la demanda			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño de tarifas reguladas para usuarios finales.</li> <li>• Despliegue de infraestructura AMI: contadores que permitan realizar una medida como mínimo horaria.</li> <li>• El regulador debe realizar estudios para determinar los posibles impactos tarifarios y costos adicionales que puedan ser gestionados oportunamente ante la implementación de infraestructura AMI.</li> <li>• Solicitar a los distribuidores que hagan modelaciones y simulaciones del impacto de la infraestructura AMI, con el objetivo de determinar ahorros y beneficios de la inversión.</li> <li>• Planificación y monitoreo de los sistemas de distribución.</li> <li>• Promover la generación distribuida mediante adecuación del marco regulatorio para pequeños generadores y autogeneradores.</li> <li>• Creación de plataformas distribuidas para compra de servicios de red.</li> <li>• Debe permitirse la participación explícita de la demanda en la bolsa de energía y en el cargo por confiabilidad.</li> <li>• Considerar en el desarrollo de estas alternativas los retos y metas futuros que puedan presentarse como parte del análisis, tales como carbono neutralidad y descarbonización.</li> <li>• Desarrollar un esquema de métricas del sistema que permita optimizar el seguimiento a la operación y el proceso de remuneración a distribuidores, considerando el cumplimiento de la política energética y orientado a acciones específicas y análisis costo-beneficio.</li> </ul>	Usuarios con AMI <sup>16</sup>	75%	2030
	Cuota anual de adquisición de vehículos eléctricos en Gobierno Nacional y prestadores de servicio público	30%/año	2025
	Vehículos eléctricos (total)	900.000	2020
	Demanda energía EV (total)	4580 GWh/año	2020
	Vehículos eléctricos (carga)	21.000	2020
	Vehículos eléctricos (transporte público urbano)	25.000	2020
	Vehículos eléctricos (particular)	670.000	2020
	Vehículos eléctricos (taxis)	86.000	2020
	Vehículos eléctricos (oficial)	98.000	2020
	Vehículos eléctricos (transporte masivo)	10%	2025
		20%	2027
		40%	2029
60%		2031	
80%		2033	
	100%	2035	

16. Resoluciones 40072 del 29 de enero de 2018 y 40483 del 30 de mayo de 2019.



## Propuestas

### Foco 4. Cierre de brechas, mejora de la calidad y diseño y formulación eficiente de subsidios

- Adelantar una planificación integrada en SIN y ZNI mediante microredes y sistemas solares individuales, u otros sistemas aislados de más potencia.
- Cerrar brechas de cobertura de acceso a energía eléctrica (3%) con recursos de alta calidad y considerando energéticos como el gas natural, teniendo en cuenta la Resolución CREG 015.
- Generar un marco regulatorio para mitigar el riesgo del proceso de electrificación y extender el servicio en particular en zonas remotas y aisladas, eliminando la diferenciación de términos SIN y ZNI.
- Crear un marco institucional y de gobernanza eléctrica que articule y promueva actores que, a partir de los marcos políticos y regulatorios, busquen la expansión de la cobertura para el logro del acceso total en Colombia.
- Los planes de electrificación deben incluir un componente de beneficio social, como la valoración de las ofertas para ganar una concesión, el costo social de no disponer de un mínimo suministro básico de electricidad y el de la falta de fiabilidad en el suministro.
- Exigir la inclusión de sistemas de telemetría en los proyectos aislados para que el regulador y el supervisor puedan ejercer sus funciones con información oportuna.
- Exigir en el pliego de condiciones de las subastas que los potenciales operadores ofrezcan, adicionalmente al suministro estrictamente eléctrico, un plan de interacción con el consumidor: trabajo social con las comunidades y el beneficio social de disponer de la electricidad.
- Para mejorar la calidad, se proponen incentivos y penalizaciones por alcanzar o incumplir las metas asignadas a cada operador de red, y se compensa a los usuarios individuales que sufren una peor calidad de suministro.
- Definir estándares para que los consumidores que instalen sistemas de generación distribuida hagan un esfuerzo extra en asegurar que la calidad de la onda que se inyecta en la red no va a causar perturbaciones en el sistema.
- Reforzar los modelos de estructuración basados en las particularidades climáticas (zonas y pisos térmicos), culturales y productivas de cada localidad, generando diseños con mejor vocación de sostenibilidad que las soluciones estandarizadas.
- Revisión y optimización de las funciones asignadas a las instituciones adscritas al sector, tales como planeación (UPME e IPSE), estructuración de proyectos (IPSE), seguimiento a la implementación de proyectos de desarrollo (UPME), entre otras.
- Reforma de los fondos sectoriales para optimizar la recepción de proyectos (ventanilla), la evaluación de viabilidad, la asignación de funciones y responsabilidades de entidades adscritas, y la gestión de información en plataforma SIMEC.
- Propender por la unificación de criterios y de información disponible para la estructuración técnica y financiera de proyectos, y optimizar los procesos de aprobación.
- Para dinamizar el aumento de cobertura de gas combustible, la UPME debe plantear un programa de sustitución de leña e incorporar los lineamientos de expansión de gas. Además, debe determinar las zonas donde el GLP puede ser el combustible más eficiente en combinación con fuentes renovables.
- Generar subsidios para la sustitución de leña y evaluar otras alternativas como biogás.
- Actualizar la reglamentación del Fondo Especial Cuota De Fomento De Gas Natural (FECFGN) para fomentar la sustitución de leña por gas como energético y consolidar una mayor cantidad de usuarios conectados.
- Para los subsidios, se propone un esquema de focalización por SISBEN considerando el estrato (PND 2018–2022); posteriormente, se propone entregar los subsidios a hogares con un consumo inferior a un cierto nivel.
- Evaluar la viabilidad de implementar soluciones que utilicen biogás, producido por la degradación de materia orgánica vegetal y animal, para familias campesinas cuyos hogares estén aislados y ubicados en sitios lejanos.

## Propuestas

### Foco 5. Institucional y regulatorio

- Es necesario plantear en el escenario de largo plazo procesos de innovación, cambio tecnológico, descarbonización y empoderamiento del consumidor.
- Reducir las barreras a la entrada en el mercado al reducir los incentivos a cerrar el acceso a infraestructuras esenciales, como consecuencia de la separación de actividades.
- Implementación de *blockchain* para transparencia (y/o MRV, emisiones, bonos).
- Simplificar la regulación por medio de un esquema de regulación que esté basado más en los resultados que en el proceso productivo.
- Garantizar la transferencia de beneficios asociados a la mejora de eficiencia alcanzada por empresas reguladas por revisiones periódica o de parámetros de retribución de las empresas.
- Medición inteligente y descentralizada mediante *blockchain* (contratos inteligentes).
- Gestión de demanda con más información para la toma de decisión.
- Promover la generación descentralizada.
- Desarrollo de mercados locales reactivos y/o mercado de renovables.
- Fomentar la complementariedad del sector de gas y el eléctrico por medio de la creación de un gestor de gas único.
- Debe haber competencia minorista y mayorista, separada de los segmentos regulados en el sector gas natural.
- Estas metas de largo plazo deben hacerse explícitas a través de documentos CONPES que sean consecuentes con el PEN, elaborados en coordinación con el DNP (Departamento Nacional de Planeación) y revisables por lo menos cada 10 años.
- Creación de un panel de expertos en resolución de disputas entre agentes.
- Adopción de esquemas de evaluación de riesgo sistémico en la gestión de la SSPD.
- Crear e implementar un mecanismo de apelaciones a las decisiones de la CREG.
- Mejorar el acceso a la red de transporte y la transparencia de las decisiones tomadas por XM para la operación del sistema, por medio de la instauración de un operador independiente del sistema, con las mejores calidades y remuneración acorde para sus empleados.

Fuente: elaboración propia con base en Corredor et al., 2020; Chahín et al., 2020; Romero-Grass et al., 2020; Batle et al., 2020; Ortiz et al., 2020; y Barrera et al., 2020.



## 1.3.2 Política minera

En 2016, el Ministerio de Minas y Energía presentó la “Política Minera de Colombia: Bases para la minería del Futuro”. Dicho documento reconoció la necesidad de repensar el sector frente a retos como: altos niveles de ilegalidad y/o informalidad, inseguridad jurídica, falta de coordinación institucional, ordenamiento territorial limitado con respecto al uso del suelo, demoras en trámites mineros y ambientales, deficiencia en los sistemas de información, pobre infraestructura, carencia de encadenamientos productivos, conflictividad social, baja inversión extranjera, poca competitividad y caída internacional de precios. Igualmente, buscó plantear que en 2025 el país cuente con un sector minero organizado, legítimo, incluyente y competitivo.

Para ello, se diseñaron estrategias que buscan contribuir a extraer los minerales bajo parámetros técnicos, ambientales, económicos, laborales y sociales adecuados, por medio de una fuerte articulación institucional y el compromiso de las empresas y trabajadores. Dichas estrategias se agruparon bajo los siguientes pilares:



**Seguridad jurídica**



**Condiciones competitivas**



**Confianza legítima**



**Infraestructura**



**Información**



**Fortalecimiento y eficiencia de la Autoridad Minera**

En cuanto a seguridad jurídica, se propuso promover la capacitación y el diálogo sobre minería con autoridades locales y otras ramas del poder, y aplicar debidamente —como acciones más relevantes— los principios de coordinación, subsidiaridad y concurrencia. En términos de competitividad, se buscó generar mayores capacidades para el desarrollo del capital humano, tecnología y financiamientos; flexibilizar las fórmulas para los pagos de regalías; crear programas de encadenamiento productivo; y diseñar planes de adaptación y mitigación al cambio climático.

En temas de confianza legítima, se consideraron acciones como: afianzar canales de comunicación entre entes nacionales y locales, incentivar mecanismos de participación y generar una política de empresa y derechos humanos. La rehabilitación de ferrocarriles, pavimentación de vías en zonas mineras y el desarrollo de puertos fluviales fueron las acciones propuestas en términos de infraestructura.

En cuanto a información, se consideró: avanzar en el conocimiento geológico, actualizar el catastro minero, incorporar nueva información proveniente de empresas para la planeación y diseño de políticas, y, por último, producir información para mejorar el conocimiento de los distintos interesados del sector minero. Para avanzar en el fortalecimiento institucional, se propuso: mejorar la eficiencia en los tiempos de respuesta de las autoridades, mejorar la respuesta a las solicitudes de titulación, mejorar el servicio al cliente y aplicar al 100% el esquema de fiscalización minera.

Para la implementación de los pilares y acciones subsiguientes, la Política Minera, aparte de mencionar la responsabilidad de otros ministerios en el combate de la ilegalidad y en mejorar la agilidad en procesos de consulta previa y licenciamiento ambiental, recalcó la necesidad de que la UPME en el 2016 comenzara el diseño del “Plan Nacional de Desarrollo Minero”, con el objetivo de constituirse como el mecanismo de

seguimiento a la implementación de la Política y ser la base de un documento CONPES desarrollado por la misma UPME y el Departamento Nacional de Planeación.

De igual forma, dicho Plan elaboraría planes sectoriales por tipo de mineral, de acuerdo con sus características y requerimientos. Frente a las esmeraldas, se solicitó revisar temas de encadenamiento productivo; en cuanto al oro, se refirió a la necesidad de controlar la cadena de producción y comercialización; y se solicitó, también, analizar la producción de fosfatos para aumentar la producción en la industria de fertilizantes. Asimismo, se consideró importante solicitar acciones para garantizar el abastecimiento de materiales de construcción para las obras de infraestructura, así como evaluar las tendencias internacionales, con el fin de definir estímulos para continuar con la producción de níquel. Frente a la producción de carbón, se le pidió a la UPME evaluar el impacto que las decisiones mundiales frente a cambio climático, la generación interna de energía y las necesidades de infraestructura sobre la producción de carbón.

Hasta el momento, de lo solicitado en la Política Minera solo se cuenta con un documento sobre “Lineamientos de Política para la Minería de Carbón en Colombia”. Dicho documento, entendiendo la importancia del carbón tanto en la generación de recursos para el Estado (dos billones de pesos) como en la de empleos en las regiones (120.000 empleos), analiza las tendencias internacionales de precios y producción, a la luz de requerimientos en límites de emisiones cada vez más estrictos, y sus consecuentes implicaciones para el país.

Históricamente, el Estado se ha respaldado en la producción de carbón para apalancar sus objetivos de desarrollo y, de acuerdo con el documento de Política, si se espera que esto continúe, se requiere que el sector de extracción de carbón en Colombia se adapte al cambiante entorno internacional. De acuerdo con lo anterior —y basado en un análisis de contexto en el que se analizan tanto las tendencias internacionales como la demanda energética esperada a largo plazo en el país—, la Política del Carbón define preliminarmente los siguientes retos a ser considerados:



 **Tabla 1-7.** Retos de la Política Minera

Reto	Descripción
Competitividad	Se destaca la necesidad de mejorar la competitividad avanzando en temas como conocimiento geológico, sistema tributario y estabilidad política.
Percepción pública	<p>De acuerdo con el análisis de percepción del Informe de la Brújula Minera 2020, en el que se consulta la percepción de los municipios mineros (MM) y no mineros (MNM), se obtuvieron los siguientes resultados:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La mayoría de la minería en Colombia es ilegal: 61% (MNM) y 58% (MM)</li> <li>• Empresas que no cumplen con los requisitos de la ley: 31% (MNM) y 36% (MM)</li> <li>• Empresas mineras consideradas como deshonestas: 60% de los encuestados</li> <li>• Empresas mineras consideradas como descuidadas y no responsables: 67% de los encuestados</li> </ul> <p>De igual forma, la accidentalidad afecta también dicha percepción.</p>
Acceso a nuevos mercados	En la medida que los países europeos han acelerado su transición energética en favor del uso de energías renovables, las importaciones de carbón pasaron del 30% al 20% en los últimos 10 años. Esto indudablemente ha afectado también al país, en la medida que Europa es uno de sus principales destinos (40% del total de las exportaciones). Esto obliga a buscar nuevos destinos en Asia, donde en 2020 se localizaron el 50% de las exportaciones del país, y en América, donde se exportó el 40%.
Transición de la minería de carbón en las regiones	La implementación de nuevas tecnologías y el nuevo panorama internacional están llevando al cierre de algunas minas, y a la consecuente pérdida de trabajo. De acuerdo con el documento, dos de las principales empresas de carbón, Cerrejón y Drummond, han iniciado procesos de cierre que deberían ser estudiados para contar con un programa de transición a largo plazo.
Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero	De acuerdo con el PIGCCme (Plan Integral de Gestión del Cambio Climático), la meta de reducción por minería es de 3,2 millones de toneladas de CO <sub>2</sub> para 2030. Esto implica pensar en acciones de eficiencia y control de emisiones que, sin afectar necesariamente la producción, lleven a cumplir con la meta.

Fuente: elaboración propia con base en Ministerio de Minas y Energía, 2020c

Frente a estos desafíos, el documento presenta los siguientes lineamientos y acciones:

 **Tabla 1-8.** Lineamientos de la Política Minera

Pilar	Descripción
<p>Promover la competitividad del sector</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cambios normativos orientados a dar mayor liquidez al sector, mejoramiento de la infraestructura y definición de un horizonte temporal, en el cual se deben explotar los recursos de carbón disponibles. Para lo último, se le solicita a la UPME realizar una evaluación de costo/beneficio, con el fin de obtener recomendaciones respecto al lapso en el que se deben extraer las reservas de carbón y estimar en qué momento se debe reemplazar con programas de abandono y sustitución de la actividad.</li> <li>• Dar mayor liquidez financiera al sector, como mecanismo para atraer inversión extranjera.</li> <li>• Mejoramiento de la infraestructura, específicamente la de puertos en el pacífico, para atender la demanda del continente asiático y de Oceanía.</li> <li>• Definición del horizonte temporal para la explotación de los recursos de carbón disponibles en el país.</li> <li>• Se prevé la generación de energía eléctrica con base en carbón del 3% de la demanda nacional hasta 2050 (PEN 2050).</li> <li>• Se prevé una demanda anual proyectada de carbón en la matriz energética mundial en 2040 por escenario, así:             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Políticas actuales: 23%</li> <li>• Políticas anunciadas: 21%</li> <li>• Escenario de Desarrollo Sostenible: 11%</li> </ul> </li> </ul>
<p>Avanzar en la consolidación de la legalización de actividad ilegal, la seguridad y las mejores prácticas en el sector</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apoyar programas de reactivación y crecimiento sectorial, buscando reducir la informalidad, fortalecer el seguimiento y control a las operaciones de carbón, generar programas de capacitación en seguridad minera y fortalecer la cooperación internacional para mejores prácticas, entre otros.</li> </ul>
<p>Promover iniciativas de adaptación y transición justa a escenarios con exigencias de gestión de cambio climático</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El cambio en los mercados internacionales está desplazando el uso del carbón como un energético primario en varias geografías.</li> <li>• Actividad comercial más agresiva por parte de las compañías mineras radicadas en el país, para participar de nuevas oportunidades e incrementar la participación en los mercados del Pacífico.</li> <li>• Nuevas tecnologías y metodologías para el desarrollo de un producto comercial más limpio, haciendo que este sea más competitivo en el mercado mundial.</li> <li>• Transición justa y con garantías para la fuerza laboral desplazada por la implementación de nuevas tecnologías.</li> <li>• De igual manera, se debe avanzar en la iniciativa de carbono neutro y buscar incluir que fondos como FONCLIMA o el CONPES de Transición Energética apoyen con recursos iniciativas de reconversión y sustitución laboral, la cual debe ser coordinada con la sociedad civil, academia y empresas.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia con base en Ministerio de Minas y Energía, 2020c

### 1.3.3 Plan Integral de Gestión del Cambio Climático del sector minero energético

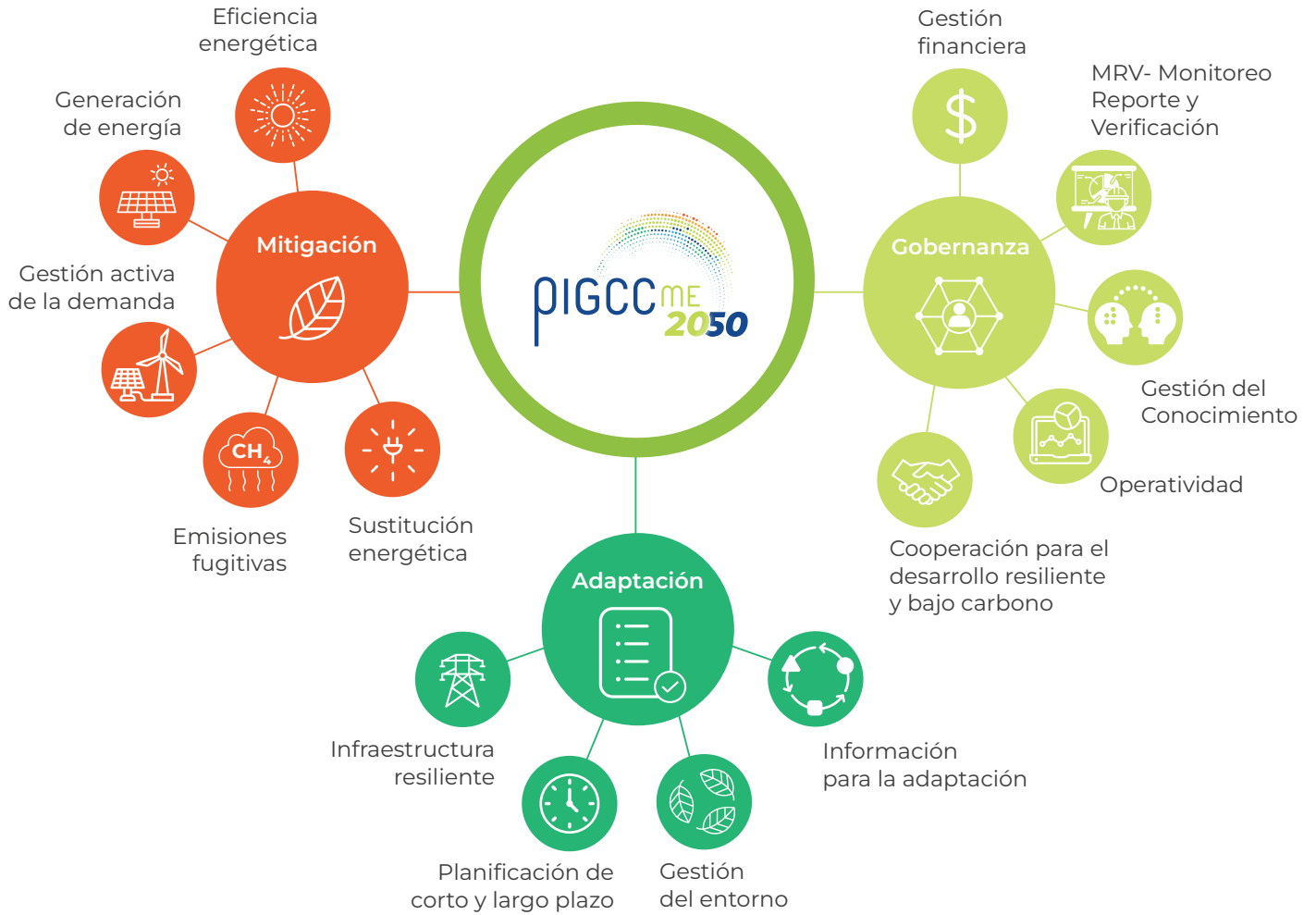
Mediante la Resolución 40807 de 2018, el Ministerio de Minas y Energía adoptó el Plan Integral de Gestión de Cambio Climático del sector minero energético del país (PIGCCme). El PIGCCme es un instrumento que tiene como objetivo reducir la vulnerabilidad ante el cambio climático y promover un desarrollo bajo en carbono a nivel sectorial, fortaleciendo y protegiendo la sostenibilidad y competitividad de la industria minero energética. Mediante este Plan, el Ministerio identifica, evalúa y orienta la incorporación de estrategias de mitigación

de GEI y de adaptación al cambio climático en la planeación sectorial (Ministerio de Minas y Energía, 2019).

El PIGCCme se encuentra planteado en un horizonte de 12 años (2018-2030) y se estructura en tres componentes: mitigación, adaptación y gobernanza. Cada componente a su vez se encuentra subdividido en líneas estratégicas y tiene asociadas metas a ser evaluadas en el año 2030. La estructura general del PIGCCme se presenta en la Figura 14.



Figura 1-4. Componentes y líneas estratégicas del PIGCCme



**Mitigación**  
Meta 2030: reducir 11,2MtCo<sub>2</sub>e

- Eficiencia energética
- Generación de energía
- Gestión de la demanda
- Emisiones fugitivas

**Adaptación**  
Meta 2030: reducir riesgos del sector asociados a cambio climático y variabilidad climática

- Infraestructura resiliente
- Planificación de corto y largo plazo
- Gestión del entorno
- Información para la adaptación

**Gobernanza (líneas transversales)**  
Meta 2030: incrementar 100 % de las actividades del Plan

- Gestión financiera
- Monitoreo, reporte y verificación
- Gestión de conocimiento
- Operatividad
- Cooperación para el desarrollo resiliente y bajo en carbono

Fuente: elaboración propia con base en Ministerio de Minas y Energía, 2019



# 2

ESTADO DEL ARTE EN EL MUNDO Y EN COLOMBIA DE LAS ESTRATEGIAS DE LARGO PLAZO QUE IMPULSAN LA CARBONO NEUTRALIDAD Y LA REACTIVACIÓN ECONÓMICA



Las exportaciones colombianas se han basado en productos primarios y/o tradicionales como café, petróleo, carbón y ferróníquel, entre otros productos, los cuales históricamente han tenido mucho peso en la balanza comercial.

La cadena de petróleo indica que los países de destino de exportación de crudo se encuentran

en Estados Unidos, principal socio comercial de Colombia, seguido de China, España, Países Bajos, Chile, India y algunos países de Centro América, diversificando de forma importante las zonas geográficas y de comercio. En cuanto al origen de las importaciones de refinados de petróleo, se encuentra que los principales países son Estados Unidos, México, Caribe y Venezuela.

⬇ **Tabla 2-1.** Comercialización de petróleo y gas y la carbono neutralidad

Exportaciones 2020p	Participación (%) 2020p	Carbono neutralidad
Estados Unidos	28,7 %	Sí
China	8,9 %	Sí
Panamá	4,6 %	Sí
Países Bajos	2,4 %	Sí
Ecuador	4,6 %	Sí
Santa Lucía	0,9 %	No
India	2,2 %	No
Demás países	47,8 %	En discusión

Importaciones 2020p	Participación (%) 2020p	Carbono neutralidad
Estados Unidos	24,2 %	Sí
México	6,8 %	Sí
Argentina	1,7 %	Sí
Brasil	6 %	No
Irlanda	0,8 %	Sí
Demás países	60,5 %	En discusión

\*p: cifra preliminar - Fuente: (DANE, 2020)

De acuerdo con la caracterización y el análisis de mercado internacional de minerales en el corto, mediano y largo plazo con vigencia al año 2035, realizado por CRU International Limited y la UPME en el año 2018<sup>17</sup>, el carbón

enfrenta el mayor riesgo estructural a su proyección de demanda futura, ya que está amenazado por sustitutos como el gas natural y la generación eléctrica con base en fuentes renovables.

 **Tabla 2-2.** Comercialización de carbón y carbono neutralidad

Exportaciones 2017	Cantidad (Mt)	Carbono neutralidad
Indonesia	377,6	No
Australia	200,3	En discusión
Rusia	140,2	Sí
Colombia	86,0	Sí
Sudáfrica	80,5	Sí
Estados Unidos	45,5	Sí
Kazajstán	6,2	No
Polonia	4,0	No
Resto del mundo	28,8	En discusión

Importaciones 2017	Cantidad (Mt)	Carbono neutralidad
China	191,1	Sí
Japón	144,3	Sí
India	151,1	No
Corea del Sur	109,5	Sí
Taiwán	59,1	No
Resto del mundo	283,7	En discusión

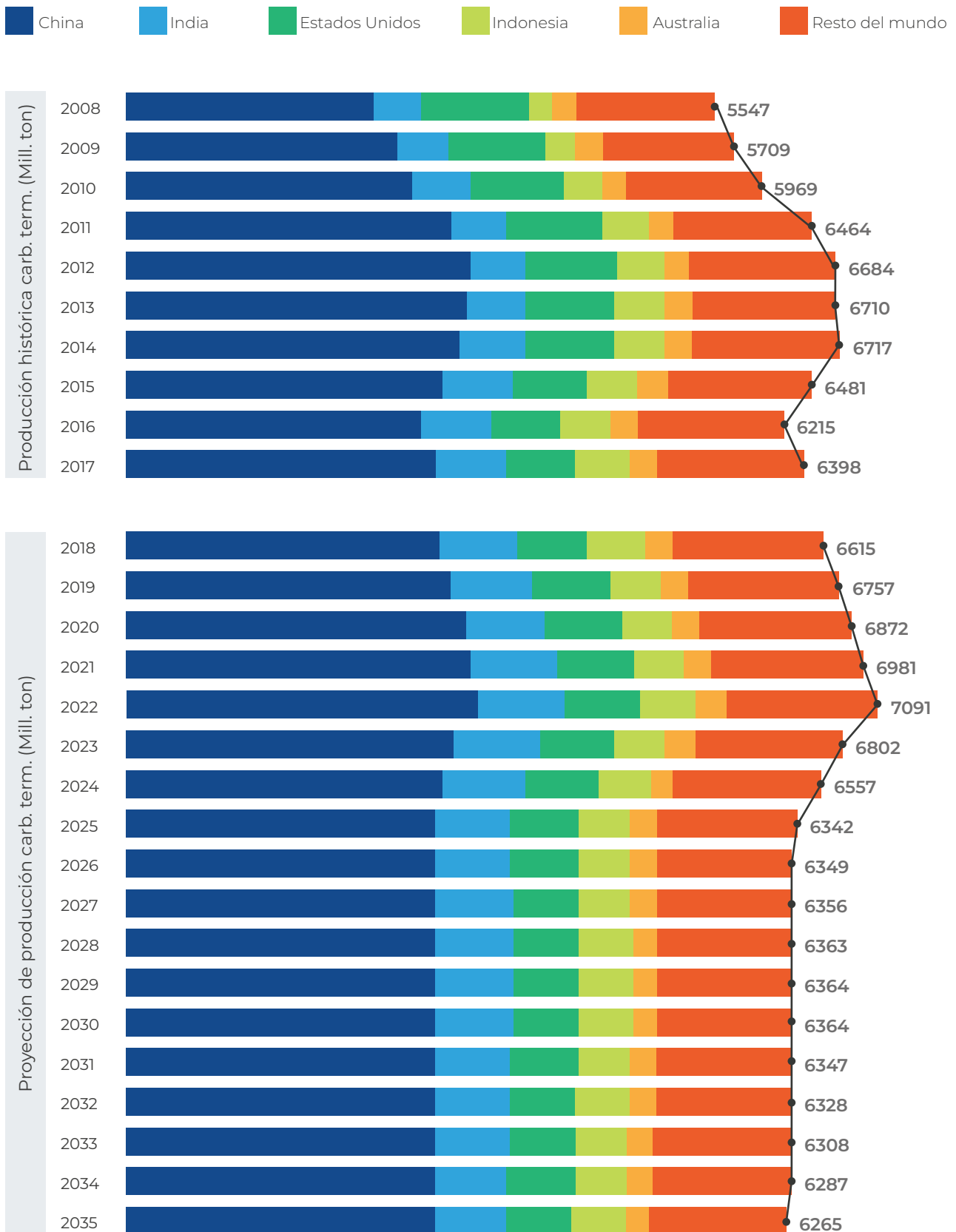
Fuente: UPME, 2018

Estos cambios en las políticas ambientales podrían afectar la demanda proyectada de carbón, la cual se muestra a continuación:

17. Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2018). Carbón térmico: caracterización y análisis de mercado internacional de minerales en el corto, mediano, y largo plazo con vigencia

al año 2035. [http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Datos/mercado-inter/Producto2\\_Carbon\\_Termico\\_FINAL\\_12Dic2018.pdf](http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Datos/mercado-inter/Producto2_Carbon_Termico_FINAL_12Dic2018.pdf)

Gráfico 2-1. Demanda histórica y proyección demanda de carbón



Nota: los valores mostrados corresponden al escenario Continuidad

Fuente: UPME, 2018


A continuación se detallan las estrategias de largo plazo que impulsan la carbono neutralidad de algunos países que han confirmado su compromiso oficialmente, a través de una comunicación de conformidad con el párrafo 19 del artículo 4 del Acuerdo de París (en el que indica que todas las Partes deben esforzarse por

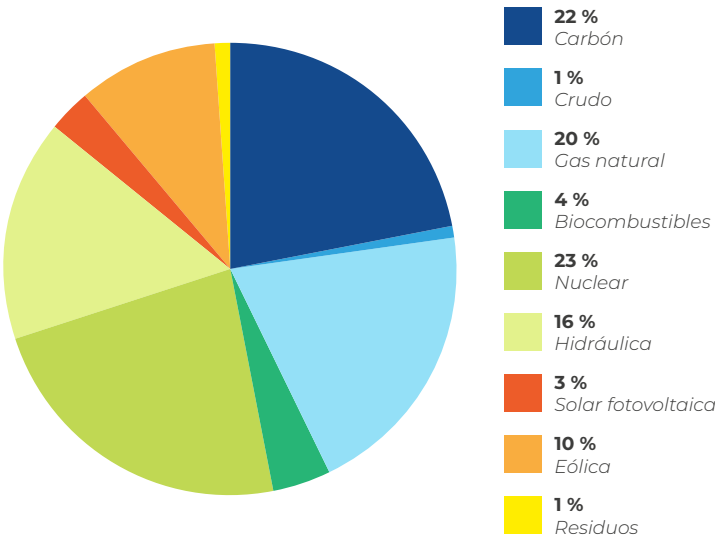
formular y comunicar estrategias de desarrollo a largo plazo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero) y teniendo en cuenta el artículo 2, el cual resalta el principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas y sus respectivas capacidades, a la luz de las diferentes circunstancias nacionales.

## 2.1 Estrategia de largo plazo de la Unión Europea

En la siguiente tabla se presentan las generalidades de la Unión Europea, características que

permitirán entender las decisiones políticas relacionadas con la carbono neutralidad.

 **Tabla 2-3.** Generalidades y contexto de la Unión Europea

<b>Población (2019)</b>	447.512.041
<b>Inflación - % anual (2019)</b>	2,32%
<b>Sistema político - administrativo</b>	Democracia representativa parlamentaria
<b>Matriz energética (2018)</b>	 <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: darkblue;">■</span> <b>22 %</b> Carbón</li> <li><span style="color: blue;">■</span> <b>1 %</b> Crudo</li> <li><span style="color: lightblue;">■</span> <b>20 %</b> Gas natural</li> <li><span style="color: green;">■</span> <b>4 %</b> Biocombustibles</li> <li><span style="color: olive;">■</span> <b>23 %</b> Nuclear</li> <li><span style="color: lightgreen;">■</span> <b>16 %</b> Hidráulica</li> <li><span style="color: orange;">■</span> <b>3 %</b> Solar fotovoltaica</li> <li><span style="color: yellow;">■</span> <b>10 %</b> Eólica</li> <li><span style="color: yellow;">■</span> <b>1 %</b> Residuos</li> </ul>
<b>Emisiones GEI (2016)</b>	2.881.620 kt

Fuente: Banco Mundial, 2019 y IEA, 2018

La estrategia muestra cómo Europa puede liderar el camino hacia la neutralidad de emisiones mediante la inversión en soluciones tecnológicas realistas, la capacitación de los ciudadanos y la armonización de la acción en ámbitos clave como la política industrial, la

financiación o la investigación; garantizando al mismo tiempo la justicia social para una transición justa. A continuación se resumen las vías para la transición a una economía de cero emisiones netas de gases de efecto invernadero y las prioridades estratégicas de la Unión Europea:

↓ **Tabla 2-4.** Estrategia de Largo Plazo de la Unión Europea

Estrategia	Descripción
<p><b>Maximizar los beneficios de la eficiencia energética, en particular con edificios de cero emisiones</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La digitalización de la eficiencia energética y la domótica</li> <li>• El etiquetado y el establecimiento de normas tienen efectos que van mucho más allá de las fronteras de la UE.</li> <li>• Para incentivar la reducción de la demanda, harán falta tasas de renovación más elevadas, también se espera un cambio de combustible, la difusión de los productos y los aparatos más eficientes, entre otros.</li> <li>• La calefacción sostenible con energía renovable seguirá desempeñando un papel importante, y el gas, incluido el gas natural licuado, mezclado con hidrógeno, o el electrometano producido a partir de mezclas renovables de electricidad y biogás, podrían desempeñar un papel clave en los edificios existentes y en muchas aplicaciones industriales.</li> <li>• La participación de los consumidores</li> </ul>
<p><b>Maximizar el despliegue de las energías renovables y el uso de la electricidad para descarbonizar completamente el suministro energético de Europa</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La transición a la energía limpia. La dependencia de las importaciones de energía, en particular por lo que respecta a las importaciones de petróleo y gas, que en la actualidad son de aproximadamente un 55 %, descenderían en 2050 al 20 %.</li> <li>• Para 2050, más del 80 % de la electricidad provendrá de fuentes de energía renovable (localizadas cada vez más en el mar). Junto con una proporción del 15 % de energía nuclear, esto será la piedra angular de un sistema energético europeo sin carbono.</li> </ul>
<p><b>Adoptar una movilidad limpia, segura y conectada</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Una combinación de energía descarbonizada, descentralizada y digitalizada, baterías más eficientes y sostenibles, trenes de potencia eléctricos de alta eficiencia, conectividad y conducción autónoma brinda posibilidades para descarbonizar el transporte por carretera.</li> <li>• Las tecnologías basadas en el hidrógeno (como los vehículos eléctricos y las embarcaciones con pilas de combustible) pueden hacerse competitivas a medio y largo plazo.</li> <li>• El gas natural licuado con proporciones elevadas de biometano podría ser también una alternativa a corto plazo para el transporte de largo recorrido</li> <li>• En la aviación debe haber un cambio a biocombustibles avanzados y electrocombustibles sin carbono, recurriendo a la hibridación y a otras mejoras en la tecnología aeronáutica para mejorar la eficiencia.</li> </ul>
<p><b>Desarrollar una infraestructura adecuada de redes inteligentes e interconexiones</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Como mínimo, debería existir una infraestructura suficiente para sostener las principales evoluciones que enmarcan el paisaje de transmisión y distribución de energía del mañana: redes inteligentes de electricidad y datos/información y, si es necesario, hidrogenoductos.</li> </ul>

Estrategia	Descripción
<b>Aprovechar todas las ventajas de la bioeconomía y crear sumideros esenciales de carbono</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La biomasa puede proporcionar calor de forma directa. Puede transformarse en bio-combustibles y biogás, y, una vez limpiada, puede transportarse a través de la red de gas, sustituyendo al gas natural.</li> <li>• Los sumideros de carbono son tan importantes como la reducción de las emisiones. Mantener y aumentar los sumideros naturales de los bosques, los suelos, las tierras agrícolas y los humedales costeros es crucial para el éxito de la estrategia, ya que de ese modo pueden compensarse las emisiones residuales procedentes de los sectores en los que es más difícil la descarbonización, incluida la propia agricultura. En este contexto, las soluciones basadas en la naturaleza y los enfoques basados en los ecosistemas suelen ofrecer múltiples beneficios en cuanto a gestión del agua, biodiversidad y aumento de la resiliencia climática.</li> </ul>
<b>Combatir el resto de las emisiones de CO<sub>2</sub> con captura y almacenamiento de carbono</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El despliegue de la captura y el almacenamiento de carbono sigue siendo necesario, especialmente en industrias que consumen mucha energía y en la fase de transición para la producción de hidrógeno sin carbono.</li> <li>• También será necesario capturar y almacenar las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la energía basada en biomasa y de las instalaciones industriales, con el fin de generar emisiones negativas. Junto con el sumidero del uso de la tierra, esto podría compensar el resto de las emisiones de gases de efecto invernadero de nuestra economía.</li> </ul>

Fuente: European Commission, 2019

Con la intención de presentar una representación visual que permita comparar variables cualitativas y priorizar los temas relevantes entre los instrumentos de política que establecen los lineamientos de la transición energética (lineamientos desarrollados en el capítulo 1 de este documento, “Revisión de políticas y estrategias sectoriales nacionales”) y la estrategia de carbono neutralidad de la Unión Europea, se propone la siguiente metodología:

- Seleccionar las variables más relevantes de la estrategia del país en estudio.
- Dibujar una matriz de 2x2.
- En el eje vertical de la matriz se califica el nivel de desarrollo de la variable (por ejemplo, eficiencia energética) en Colombia, en términos de políticas, regulaciones y estudios, entre otros. Si se califica con 1, se entiende que en este momento la variable no se ha desarrollado en Colombia. Si se califica con 10, se entiende que la variable se ha desarrollado ampliamente en Colombia, por lo que se cuenta con investigaciones, políticas y regulaciones que facilitarán la implementación de la medida en el corto o mediano plazo.

- En el eje horizontal de la matriz se califica el nivel de desarrollo de la variable (por ejemplo, eficiencia energética) en el país de estudio, de acuerdo con el documento de estrategia de largo plazo analizado. Si se califica con 1, se entiende que la variable está en desarrollo en una fase muy preliminar. Si se califica con 10, se entiende que la variable se ha desarrollado ampliamente en el país de estudio, por lo que se cuenta con investigaciones, políticas y regulaciones que facilitarán la implementación de la medida en el corto o mediano plazo.
- En el eje superior derecho se presentan las variables en las que las dos estrategias convergen.
- En el eje inferior izquierdo se presentan las variables en las que las dos estrategias divergen.
- En el eje superior izquierdo se presentan las variables que Colombia considera y que no son tenidas en cuenta por las estrategias de largo plazo del país en estudio.
- En el eje inferior derecho se presentan las variables que la estrategia de largo plazo del país en estudio considera y que no son tenidas en cuenta por Colombia.

Figura 2-1. Análisis cualitativo de la estrategia de carbono neutralidad de la Unión Europea



Fuente: elaboración propia

En conclusión, la estrategia de carbono neutralidad de Colombia se relaciona con la estrategia de carbono neutralidad de la Unión Europea en los siguientes aspectos: eficiencia energética, habilitadores de gestión activa de la demanda, generación de energías renova-

bles y modernización del sistema eléctrico. Por el contrario, la estrategia de carbono neutralidad de Colombia *no* se relaciona con la estrategia de la Unión Europea en los siguientes aspectos: soberanía energética, CCUS y sumideros de carbono.





## 2.2 Estrategia de Largo Plazo bajo el Acuerdo de París de Japón

A continuación, se presentan las generalidades de Japón. Estas características permitirán entender las decisiones políticas relacionadas con la carbono neutralidad.

↓ **Tabla 2-5.** Generalidades y contexto de Japón

<b>Población (2019)</b>	126.264.931																				
<b>PIB per cápita - US\$ a precios constantes de 2010 (2019)</b>	49.187,83																				
<b>% PIB (2018)</b>	Industria: 27,81% Agricultura: 1,2% Importaciones: 18,29% Exportaciones: 18,52% Gasto: 16,34%																				
<b>Inflación, precios al consumidor, % anual (2019)</b>	0,47 %																				
<b>Sistema político - administrativo</b>	Monarquía constitucional - parlamento																				
<b>Matriz energética</b>	<table border="1"> <caption>Matriz energética de Japón</caption> <thead> <tr> <th>Fuente de energía</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Carbón</td> <td>34 %</td> </tr> <tr> <td>Crudo</td> <td>5 %</td> </tr> <tr> <td>Gas natural</td> <td>37 %</td> </tr> <tr> <td>Biocombustibles</td> <td>2 %</td> </tr> <tr> <td>Nuclear</td> <td>7 %</td> </tr> <tr> <td>Hidráulica</td> <td>10 %</td> </tr> <tr> <td>Otras</td> <td>2 %</td> </tr> <tr> <td>Eólica</td> <td>1 %</td> </tr> <tr> <td>Residuos</td> <td>3 %</td> </tr> </tbody> </table>	Fuente de energía	Porcentaje	Carbón	34 %	Crudo	5 %	Gas natural	37 %	Biocombustibles	2 %	Nuclear	7 %	Hidráulica	10 %	Otras	2 %	Eólica	1 %	Residuos	3 %
Fuente de energía	Porcentaje																				
Carbón	34 %																				
Crudo	5 %																				
Gas natural	37 %																				
Biocombustibles	2 %																				
Nuclear	7 %																				
Hidráulica	10 %																				
Otras	2 %																				
Eólica	1 %																				
Residuos	3 %																				
<b>Emisiones GEI (2016)</b>	1.135.886,25 kt																				

Fuente: Banco Mundial, 2019 y IEA, 2018

Japón se ha fijado la meta de reducir las emisiones de GEI en un 80% para 2050, y proclama una “sociedad descarbonizada” como su objetivo final. El país promete un crecimiento económico inno-

vador que permita reducir las emisiones como se tiene esperado. A continuación se menciona la visión de largo plazo de cada sector económico en Japón, así como las políticas asociadas:

↓ **Tabla 2-6.** Estrategia a largo plazo de Japón bajo el Acuerdo de París – sectores

Sector	Descripción
<b>Energía</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Para la transición/descarbonización energética, se requiere explorar todas las opciones, incluidas la eficiencia energética, la energía renovable, las baterías de almacenamiento, el hidrógeno, la energía nuclear y CCS y CCU.</li> <li>Se busca: vencer todos los obstáculos para que la principal fuente de energía sea la renovable (por ejemplo, reducción drástica de costos, superación de las limitaciones de la red eléctrica); reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> eq de la generación de energía térmica, promoviendo CCS y CCU; promover una “sociedad del hidrógeno”; e impulsar la eficiencia energética y el sistema de energía distribuida.</li> </ul>
<b>Industria</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Establecer nuevos procesos de producción para lograr una fabricación descarbonizada con innovación disruptiva: utilizar hidrógeno libre de CO<sub>2</sub> eq, cambiar materias primas e incentivar una mejora drástica en eficiencia energética.</li> </ul>
<b>Transporte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lograr el nivel más alto de desempeño ambiental de los automóviles japoneses suministrados en todo el mundo para 2050.</li> </ul>
<b>Comunidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Comunidades y empresas capaces de lograr la carbono neutralidad incluso antes de 2050: cambios en los estilo de vida y construcción de comunidades carbono neutrales.</li> </ul>

Fuente: The Government of Japan, 2019

La tabla 2-7 menciona la visión a largo plazo de las medidas intersectoriales, así como las políticas asociadas:

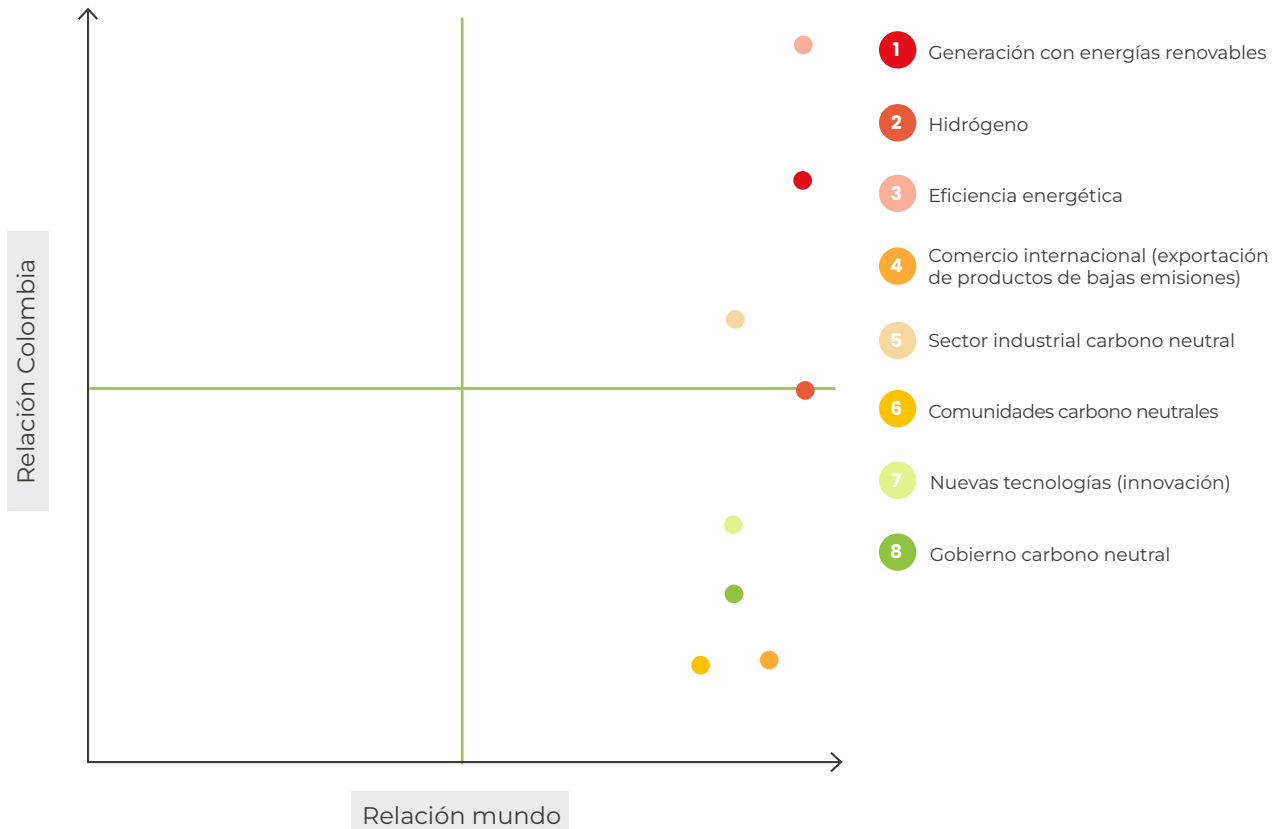
↓ **Tabla 2-7.** Estrategia a largo plazo de Japón bajo el Acuerdo de París – intersectorial

Estrategia	Descripción
<b>Estrategia de innovación ambiental progresiva</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Revisión continua de las tecnologías basadas en los últimos conocimientos científicos; buscando y creando tecnologías potenciales en Japón y en el extranjero, incentivando la creación de negocios y superando las barreras que no faciliten la comercialización.</li> </ul>
<b>Dirección de otras medidas de política intersectoriales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desarrollo de recursos humanos</li> <li>Construcción de una sociedad resiliente para adaptarse al cambio climático</li> <li>Transición justa</li> <li>El gobierno debe dar ejemplo</li> <li>Precio del carbono</li> </ul>

Fuente: The Government of Japan, 2019

Considerando lo anterior, en la figura siguiente se analiza y compara la estrategia de carbono neutralidad de Japón con los instrumentos de política que establecen los lineamientos de la transición energética en Colombia:

📌 **Figura 2-2.** Análisis cualitativo de la estrategia de carbono neutralidad de Japón



Fuente: elaboración propia

En conclusión, la estrategia de carbono neutralidad de Colombia se relaciona con la estrategia de carbono neutralidad de Japón en los aspectos de eficiencia energética y generación de renovables. La estrategia de carbono

neutralidad de Colombia *no* se relaciona con la estrategia de Japón en los aspectos de: comunidades y gobiernos carbono neutral, comercio internacional y nuevas tecnologías con énfasis en innovación.



## 2.3 Propuesta de descarbonización de los Estados Unidos

El análisis de esta sección considera los resultados del estudio titulado *Net Zero America: potential pathways, infrastructure, and impacts* de la Universidad de Princeton (2020), que tiene como objetivo generar información detallada sobre implementación, costos, tiempos e impactos de las medidas para alcanzar la neutralidad de carbono en Estados Unidos. Esto permitió identificar posibles

cuellos de botella y resaltar algunos elementos clave para la consolidación de un marco de política pública y la toma de decisión para la transición energética.

En primer lugar, se presentan las generalidades de Estados Unidos. Dichas características permitirán entender las decisiones políticas relacionadas con la carbono neutralidad.

⬇ **Tabla 2-8.** Generalidades de Estados Unidos de América

<b>Población (2019)</b>	328.239.523
<b>PIB per cápita - US\$ a precios constantes de 2010 (2019)</b>	55.670,23
<b>% PIB (2017)</b>	Industria: 18,20% Agricultura: 0,91% Importaciones: sin información Exportaciones: 11,71% Gasto: 22,87%
<b>Inflación, precios al consumidor, % anual (2019)</b>	1,8 %
<b>Sistema político - administrativo</b>	República federal presidencialista
<b>Matriz energética</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>24 % Carbón</li> <li>1 % Crudo</li> <li>38 % Gas natural</li> <li>1 % Biocombustibles</li> <li>19 % Nuclear</li> <li>7 % Hidráulica</li> <li>2 % Solar</li> <li>7 % Eólica</li> <li>0 % Residuos</li> </ul>
<b>Emisiones GEI (2016)</b>	5.006.302,07 kt

Fuente: Banco Mundial, 2019 e IEA, 2018

Con su estrategia de carbono neutralidad, Estados Unidos quiere pasar del sí al cómo; es claro en afirmar que se requieren acciones inmediatas y compromiso político, económico y social. Declara que se requiere una inversión inicial importante, pero se logrará

el retorno de inversión a través de diferentes tipos de ingresos y de la reducción de costos ambientales asociados con el daño ambiental que causa el cambio climático. A continuación se listan los 6 pilares que se necesitan para apoyar la transición:

 **Tabla 2-9.** Estrategia de descarbonización de Estados Unidos de América

Pilar	Aspecto	Indicador a 2050
Electrificación y eficiencia energética de uso final	Inversión del consumidor en energía y cambio de comportamiento en el uso	Vehículos eléctricos particulares 300 millones
	Eficiencia energética industrial	Rápidas ganancias/incrementos en productividad Fabricación de acero EAF/DRI
Energía limpia: generación solar y eólica, transmisión y energía en firme	Energía solar y eólica	10s-100s GW /año. Sostenido por décadas
		Transmisión aumenta 3x-5x
	Nuclear	250 nuevos reactores 1-GW
		Disposición de combustible empleado
	NGCC-CCS	Más de 300 plantas con 750MW
	Recursos flexibles	Turbinas de combustión de hidrógeno
Grandes y flexibles cargas: electrolisis, calderas eléctricas y captura directa de aire		
50-180 GW en materias de 6 horas		
Bioenergía y otros combustibles cero carbono, y materias primas	Industria bioenergética principal	100s nuevas instalaciones de conversión
		620 millones t/año biomasa (materia prima) producidas (1,2 Bt/año en el escenario E-B+)
	Hidrógeno e industrias de combustibles sintéticos	
Captura, utilización y almacenamiento de CO <sub>2</sub>	Almacenamiento geológico de 900-1700 Mt CO <sub>2</sub> /año	Aprox. 1000 instalaciones de captura
		21.000-25.000 Km de red de ductos troncales para CO <sub>2</sub>
		85.000 km de red de ductos de estímulo que se unen a los ductos troncales
		Miles de pozos de inyección

Pilar	Aspecto	Indicador a 2050
Reducción de emisiones de GEI que no sean CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, Fluorocarbonados	20% debajo de los niveles de 2020 y 30% de las emisiones para 2050 en el escenario de referencia
Sumideros en suelo potenciados	Manejo y gestión de bosques	Sumidero potencial de 500–1000 MtCO <sub>2</sub> eq/año, abarcando 50% o más del área de bosques de EEUU
	Prácticas de agricultura	Sumidero potencial aproximado de 200 MtCO <sub>2</sub> eq/año, si se aplican medidas de conservación, entre 1–2 millones de granjas/fincas

Fuente: Larson et al., 2020

Para lograr los pilares expuestos anteriormente, los hitos que se espera conseguir son los siguientes:


- Que la tasa de implementación de tecnologías e infraestructura sea muy superior a los datos históricos.
- Que los impactos en el entorno (ambientales) y comunidades sean mitigados para contar con el aval de la sociedad, permitiendo el desarrollo de proyectos que cuenten con apoyo y compromiso político constante.
- Movilización de grandes cantidades de capital de riesgo por parte del gobierno y el sector privado.
- Que la apropiación de la electrificación por parte de los consumidores sea rápida en todos los estados (vehículos eléctricos, adecuación térmica, etc.).
- Transformación en la industria (electrificación, hidrógeno, acero y cemento bajos en carbono, etc.).
- La expansión de tecnologías bajas en carbono debe ser ambiciosa y comenzar cuanto antes. Desde 2020, se espera que:

- La generación solar y eólica, la apropiación de vehículos eléctricos y las bombas de calor se masifiquen.
- Que haya inversión en infraestructura crítica para viabilizar la transición energética (puntos de carga para vehículos eléctricos, infraestructura de transmisión y ductos para CO<sub>2</sub>).
- Entre 2030 y 2040, se espera que las tecnologías hayan madurado para lograr una mayor implementación.

En el estudio de Larson et al. (2020), se presenta la modelación de cinco (5) trayectorias hacia la descarbonización:

- La primera, denominada E+, asume una electrificación del uso final de energía agresiva, pero con alternativas de suministro de energía que —con altas probabilidades— permitirían minimizar el costo total del sistema energético y cumplir con las metas de neutralidad de carbono en 2050.
- La segunda (E-) considera una electrificación del uso final de energía poco agresiva, pero con alternativas de suministro de energía similares a las de E+.

- La tercera (E-B+) considera el mismo nivel de electrificación que E-, pero presenta un incremento en la participación de la oferta de energía y combustibles basados en biomasa, para suplir la demanda de combustible del sector transporte no eléctrico.
  - La cuarta (E+RE-) consiste en un nivel de electrificación similar al de E+ y una oferta de energía caracterizada por el crecimiento limitado de fuentes eólicas y solares, limitadas a la tasa máxima histórica. Sin embargo, resalta una mayor capacidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub>, que permitiría un mayor consumo de combustible fósil que en E+.
  - Finalmente, la quinta (E+RE+) contempla el mismo nivel de electrificación de E+ y una oferta de energía determinada por fuentes renovables en un 100% en 2050, sin la entrada de nuevas plantas nucleares y sin almacenamiento de carbono subterráneo en 2050 (Larson et al., 2020).
- A continuación se presenta una tabla comparativa de estas trayectorias:

 **Tabla 2-10.** Comparación de trayectorias del estudio para la neutralidad de carbono en EE.UU.

Aspecto	REF (2019)	E+	E-	E-B+	E+RE-	E+RE+
Electrificación del uso final	Baja	Alta	Media alta	Media alta	Alta	Alta
Tasa de crecimiento de energía eólica y solar	N/A	10% / año	10% / año	10% / año	Máxima tasa histórica	10% / año
Capacidad instalada: nuclear	50% - 80 años vida útil	50% - 80 años vida útil	50% - 80 años vida útil	50% - 80 años vida útil	50% - 80 años vida útil	Retiro a los 60 años de vida útil
Nuevas plantas nucleares	No en California					No en todo el país
Uso de combustible	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No (2050)
Almacenamiento de CO <sub>2</sub>	N/A	1800 Mt / año (2050)	1800 Mt / año (2050)	1800 Mt / año (2050)	3000 Mt / año (2050)	No
Oferta de energía de biomasa	N/A	13 EJ / año (2050) (700 M t/año biomasa) <sup>18</sup>		23 EJ / año (2050) (300 Mt / año biomasa)	13 EJ / año (2050) (700 Mt / año biomasa) <sup>19</sup>	

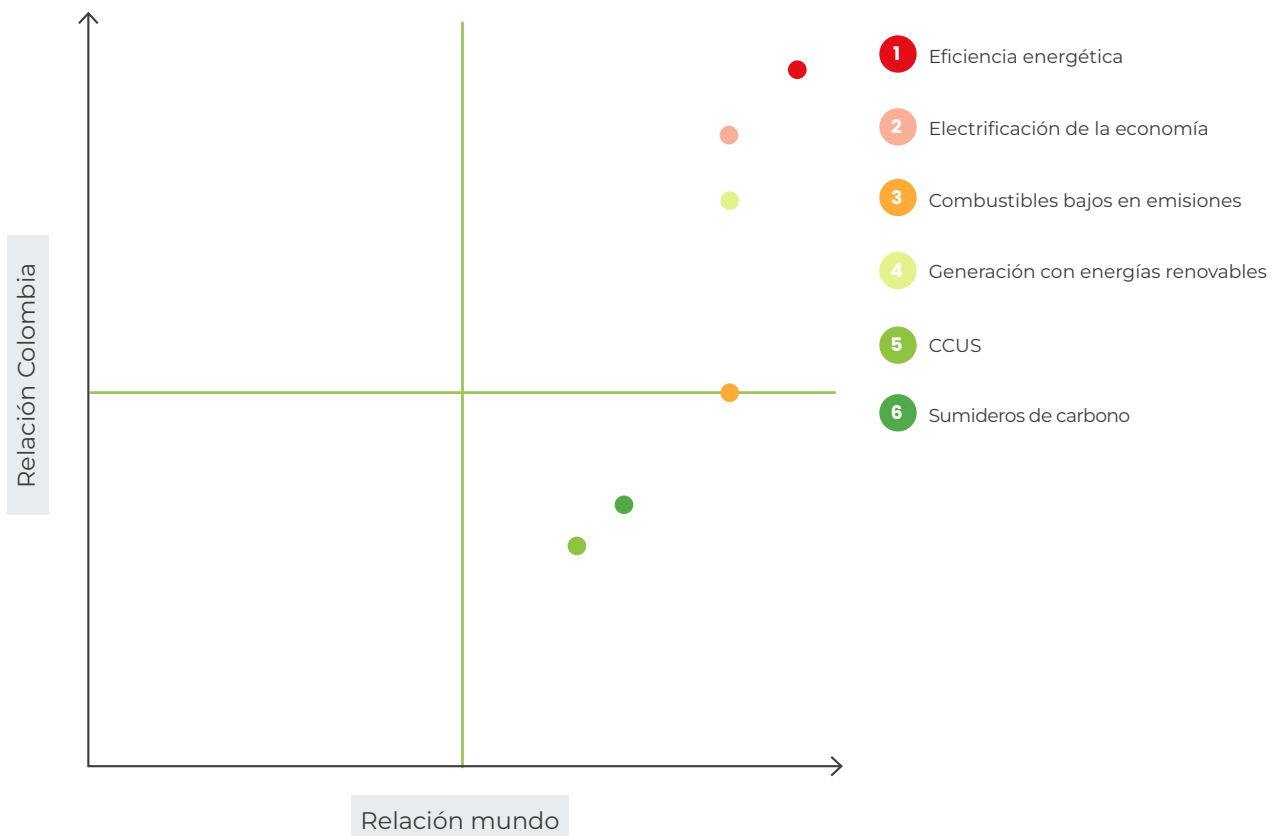
Fuente: Larson et al., 2020

18. Sin conversión de tierra para estos fines

19. Sin conversión de tierra para estos fines

Considerando lo anterior, a continuación se analiza y compara los instrumentos de política que establecen los lineamientos de la transición energética con la estrategia de carbono neutralidad de Estados Unidos:

📌 **Figura 2-3.** Análisis cualitativo de la estrategia de carbono neutralidad de Estados Unidos



Fuente: elaboración propia

En conclusión, la estrategia de carbono neutralidad de Colombia se relaciona con la propuesta de carbono neutralidad de Estados Unidos principalmente en los siguientes aspectos: eficiencia energética, electrificación de

la economía y generación con renovables. Al contrario, la estrategia de carbono neutralidad de Colombia *no* se relaciona con las estrategias de Estados Unidos en CCUS y sumideros de carbono.



## 2.4 Estrategia de largo plazo de Finlandia

A continuación se presentan las generalidades de Finlandia, características que permitirán entender las decisiones políticas relacionadas con la carbono neutralidad.

↓ **Tabla 2-11.** Generalidades y contexto de Finlandia

<b>Población (2019)</b>	5.520.314																						
<b>PIB per cápita - US\$ a precios constantes de 2010 (2019)</b>	49.241,07																						
<b>% PIB (2019)</b>	Industria: 23,97% Agricultura: 2,22% Importaciones: sin información Exportaciones: 39,97% Gasto: 37,32%																						
<b>Inflación, precios al consumidor, % anual (2019)</b>	1,02 %																						
<b>Sistema político - administrativo</b>	República parlamentaria																						
<b>Matriz Energética</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Porcentaje</th> <th>Combustible</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11,70 %</td> <td>Carbón</td> </tr> <tr> <td>0,40 %</td> <td>Aceite</td> </tr> <tr> <td>5,80 %</td> <td>Gas natural</td> </tr> <tr> <td>18,10 %</td> <td>Biocombustibles</td> </tr> <tr> <td>34,80 %</td> <td>Nuclear</td> </tr> <tr> <td>18,10 %</td> <td>Hidráulica</td> </tr> <tr> <td>0,30 %</td> <td>Solar Fotovoltaica</td> </tr> <tr> <td>8,70 %</td> <td>Eólica</td> </tr> <tr> <td>1,70 %</td> <td>Residuos</td> </tr> <tr> <td>0,40 %</td> <td>Otros</td> </tr> </tbody> </table>	Porcentaje	Combustible	11,70 %	Carbón	0,40 %	Aceite	5,80 %	Gas natural	18,10 %	Biocombustibles	34,80 %	Nuclear	18,10 %	Hidráulica	0,30 %	Solar Fotovoltaica	8,70 %	Eólica	1,70 %	Residuos	0,40 %	Otros
Porcentaje	Combustible																						
11,70 %	Carbón																						
0,40 %	Aceite																						
5,80 %	Gas natural																						
18,10 %	Biocombustibles																						
34,80 %	Nuclear																						
18,10 %	Hidráulica																						
0,30 %	Solar Fotovoltaica																						
8,70 %	Eólica																						
1,70 %	Residuos																						
0,40 %	Otros																						
<b>Emisiones GEI (2016)</b>	45.870,50 kt																						

Fuente: Banco Mundial, 2019 e IEA, 2018

La estrategia de largo plazo de Finlandia considera tres escenarios:

- Escenario con las medidas existentes (WEM): la carbono neutralidad se logra en 2050.
  - Escenario de ahorro: el objetivo de reducción de emisiones es del 90%, en comparación con los niveles de 1990. En este escenario se logra la carbono neutralidad en 2035.
  - Escenario de crecimiento continuo: el objetivo de reducción de emisiones es del 87,5%, en comparación con los niveles de 1990. En este escenario se logra la carbono neutralidad en 2035.
- A continuación se presentan los resultados del análisis de las diferentes políticas para cada sector de Finlandia:

⬇ **Tabla 2-12.** Estrategia a largo plazo de Finlandia

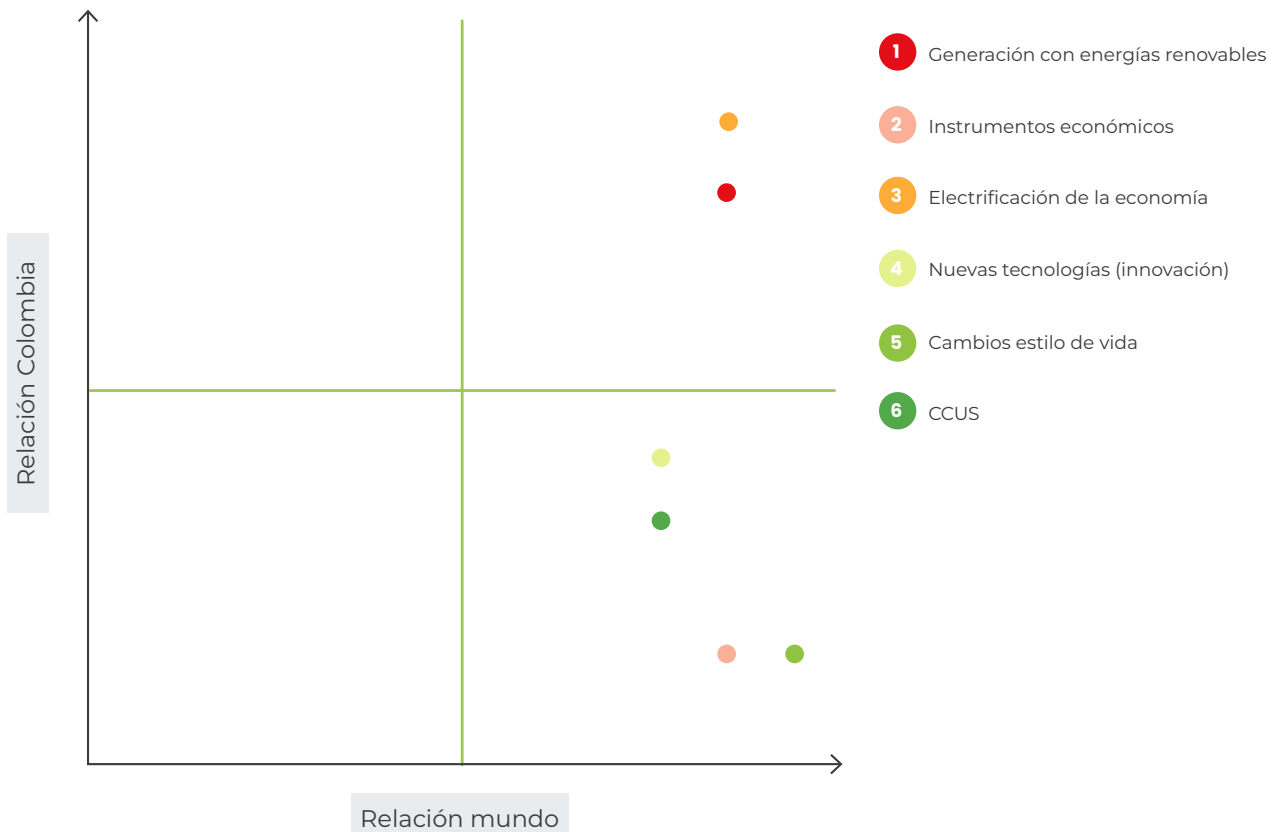
Sector	Descripción
<b>Energía</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se prevé que a futuro los niveles de consumo de energía aumenten. Para suplir la demanda, se trabaja en mecanismos que permitan la adopción de nuevas fuentes y procesos de energía, como la eólica. Además, se planea un alza en los impuestos para aquellas empresas o industrias que todavía generen emisiones.</li> <li>• El consumo de electricidad aumentará y la electricidad sustituirá ampliamente a los combustibles.</li> <li>• Las tecnologías de CCUS estarán disponibles.</li> </ul>
<b>Industria</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se prevé una sustitución de combustibles fósiles por biocombustibles para el sector industrial.</li> <li>• Reemplazo de procesos y materias primas.</li> <li>• Se incentivará la electrificación, procesos renovables neutrales en carbono y combustibles sintéticos.</li> </ul>
<b>Transporte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uno de los objetivos es incrementar el uso de energías renovables en el transporte.</li> <li>• Se afirma que es técnicamente posible reemplazar la gasolina fósil y el diésel por biocombustibles, o cambiando a vehículos eléctricos o de gas.</li> </ul>
<b>Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura y agricultura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Finlandia tiene un gran potencial de aprovechamiento forestal.</li> <li>• Se prevé que la demanda agrícola aumentará en un 5% para 2030.</li> <li>• Se asume que el consumo de carne y los productos lácteos disminuiría entre un 30% y un 50% para 2050.</li> </ul>

Fuente: Ministerio de Minas y Energía, 2020b



Considerando lo anterior, en la figura se analiza y compara la estrategia de carbono neutralidad de la Finlandia con los instrumentos de política que establecen los lineamientos de la transición energética en Colombia:

⬇ **Figura 2-4.** Análisis cualitativo de la estrategia de carbono neutralidad de Finlandia



Fuente: elaboración propia

En conclusión, la estrategia de carbono neutralidad de Colombia se relaciona con la estrategia de carbono neutralidad de Finlandia en aspectos de electrificación de la economía y genera-

ción con energías renovables. La estrategia de carbono neutralidad de Colombia *no* se relaciona con las estrategias de Finlandia en los aspectos de CCUS y cambios de estilo de vida.

## 2.5 Estrategia de carbono neutralidad de Costa Rica

A continuación se presentan las generalidades de Costa Rica, que permitirán entender las decisiones políticas relacionadas con la carbono neutralidad.

↓ **Tabla 2-13.** Generalidades y contexto de Costa Rica

<b>Población (2019)</b>	5,047,561														
<b>PIB per cápita - US\$ a precios constantes de 2010 (2019)</b>	10.046,94														
<b>% PIB (2019)</b>	Industria: 18,46% Agricultura: 4,24% Importaciones: sin información Exportaciones (2018): 33,75% Gasto: 28,81%														
<b>Inflación, precios al consumidor, % anual (2019)</b>	2,09 %														
<b>Sistema político - administrativo</b>	República presidencialista														
<b>Matriz Energética</b>	<table border="1"> <caption>Matriz Energética</caption> <thead> <tr> <th>Fuente de Energía</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Aceite</td> <td>0,80 %</td> </tr> <tr> <td>Hidráulica</td> <td>68,20 %</td> </tr> <tr> <td>Biocombustibles</td> <td>1,40 %</td> </tr> <tr> <td>Geotérmica</td> <td>13,20 %</td> </tr> <tr> <td>Eólica</td> <td>15,70 %</td> </tr> <tr> <td>Solar fotovoltaica</td> <td>0,70 %</td> </tr> </tbody> </table>	Fuente de Energía	Porcentaje	Aceite	0,80 %	Hidráulica	68,20 %	Biocombustibles	1,40 %	Geotérmica	13,20 %	Eólica	15,70 %	Solar fotovoltaica	0,70 %
Fuente de Energía	Porcentaje														
Aceite	0,80 %														
Hidráulica	68,20 %														
Biocombustibles	1,40 %														
Geotérmica	13,20 %														
Eólica	15,70 %														
Solar fotovoltaica	0,70 %														
<b>Emisiones GEI (2016)</b>	8.023,39 kt														

Fuente: Banco Mundial, 2019 e IEA, 2018

Costa Rica busca ser uno de los líderes de la descarbonización; por décadas se han realizado inversiones en fuentes renovables propias para generar electricidad, hoy en día el 99,5 % de electricidad del país es generada sin usar com-

bustibles fósiles, además de tener otras grandes apuestas como la protección del bosque y el pago de servicios ecosistémicos. A continuación se presentan las estrategias de carbono neutralidad de Costa Rica:

 **Tabla 2-14.** Ejes de la descentralización – estrategia de largo plazo de Costa Rica

Ejes de la descentralización	Descripción
Desarrollo de un sistema de movilidad eficiente y renovable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Promover la descarbonización del sector de transporte público a través de la electrificación y adopción de tecnologías cero emisiones.</li> </ul>
Transformación de la flota de vehículos ligeros a cero emisiones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acelerar la transición de la flota de vehículos hacia tecnología cero emisiones.</li> <li>• Fortalecer el despliegue masivo de una red eléctrica inteligente <i>smart grid</i> para extraer valor y mejorar los precios por almacenamiento y manejo de demanda.</li> </ul>
Consolidación del sistema eléctrico nacional, con capacidad, flexibilidad, inteligencia y resiliencia necesaria para abastecer y gestionar energía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Promover la modernización del sistema eléctrico para enfrentar los retos derivados de la descarbonización, digitalización, y descentralización en la producción eléctrica.</li> <li>• Promover la eficiencia energética.</li> <li>• Implementar estrategias para la electrificación y digitalización de los distintos sectores de la economía, que incluyan escenarios y rutas de inversión flexibles.</li> <li>• Fortalecer el programa de diversificación renovable con visión hacia el 2050, en función de la demanda proyectada y los costos.</li> <li>• Realizar las inversiones en transmisión y distribución que permitan el desarrollo de distintos modelos de generación y gestión de la demanda.</li> <li>• Implementar estrategias para consolidar el proceso de transición energética.</li> <li>• Mantener una vigilancia al área tecnológica y de innovación que permita la implementación de nuevos modelos bajos en emisiones. Visión de transformación.</li> </ul>
Desarrollo de edificaciones de diversos usos bajos estándares de alta eficiencia y procesos de bajas emisiones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Establecer elementos fiscales y de financiamiento al consumidor (Fondo de Transición Energética) para darle acceso masivo a tecnologías eficientes. Es, así, un enfoque de transición justa para todos los segmentos de la población, incluidos los grupos más vulnerables.</li> <li>• Promover el diseño e implementación de un sistema de MRV para construcción sostenible en proyectos tanto privados como públicos, y establecer una entidad que centralice los datos que se deriven de este.</li> </ul>
Transformación del sector industrial mediante procesos y tecnologías que utilicen energía de fuentes renovables	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impulsar el proceso de transformación tecnológica de bajas emisiones del sector industrial.</li> <li>• En este periodo habrá una inversión muy limitada en tecnologías fósiles, que se hará a la par de una mayor desactivación y/o sustitución de equipos fósiles viejos por opciones renovables. Esto resultará en una reducción marcada del uso de combustibles fósiles y emisiones del sector industrial, año por año.</li> </ul>
Consolidación de un modelo de gestión de territorios rurales, urbanos y costeros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementar la estrategia REDD+ para fomentar la reducción de emisiones por deforestación, la degradación evitada y la conservación de bosques y ecosistemas tanto en zonas rurales como urbanas.</li> </ul>

Fuente: Bicentenario, G. d., 2020

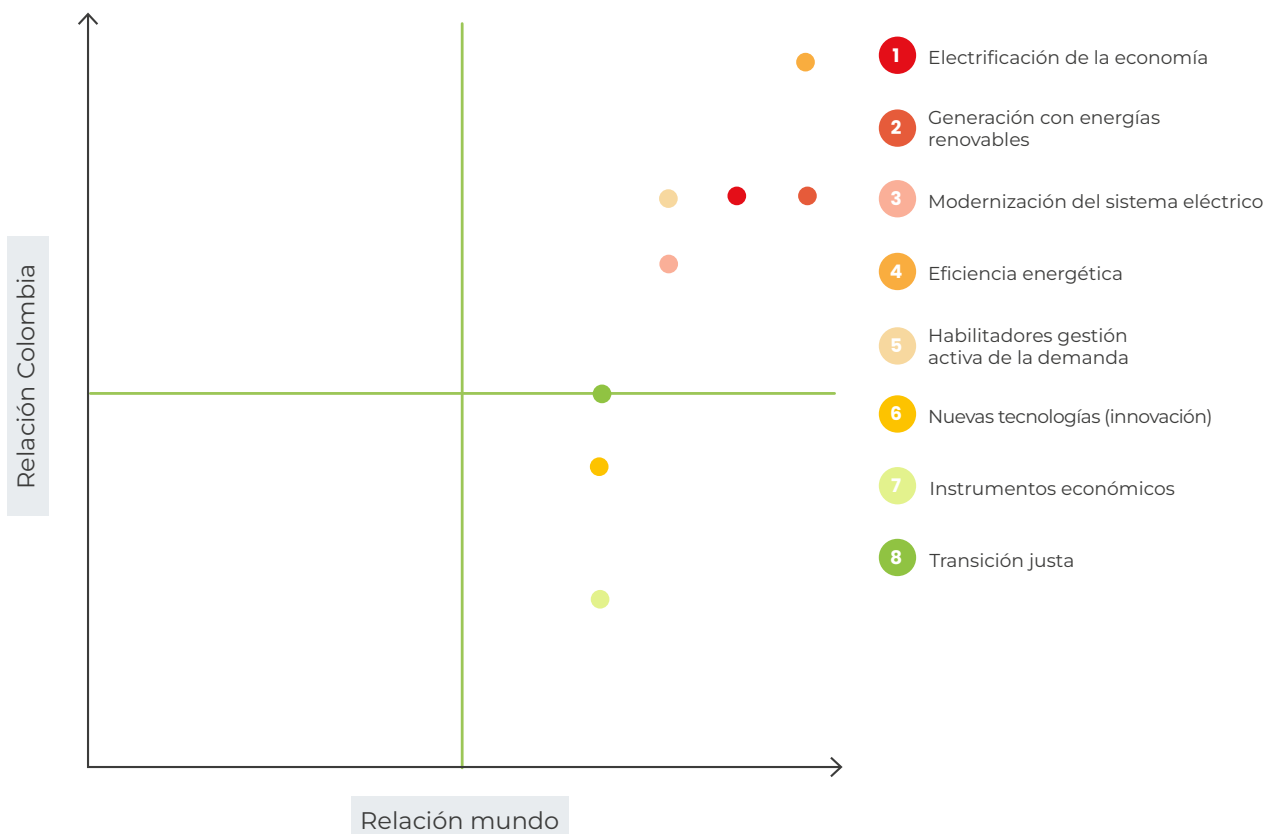
⬇ **Tabla 2-15.** Estrategias transversales – estrategia a largo plazo de Costa Rica

Estrategias transversales	Descripción
<b>Reforma Fiscal Verde</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Será necesario desacoplar los ingresos del Estado de las ventas de gasolina antes de detonar la electrificación masiva de la flota de vehículos ligeros.</li> <li>· Análisis integral del Sistema de Impuestos y Cargas Tributarias, para consolidar un proceso de alineamiento de incentivos y tributos con objetivos de descarbonización.</li> <li>· Implementación de esquemas de precios al carbono, tales como el Canon de Emisiones a fuentes móviles y fijas.</li> <li>· Consolidar un proceso de eliminación de subsidios a combustibles fósiles.</li> </ul>
<b>Estrategia de financiamiento y atracción de inversiones para la transformación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Diseñar un plan de atracción de inversiones alineado con la visión de convertir al país en un Laboratorio para Descarbonización y Resiliencia.</li> </ul>
<b>Estrategia de digitalización y de economía basada en el conocimiento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· El país debe avanzar en una estrategia que le permita acumular, procesar y analizar datos para tener condiciones competitivas en el nuevo contexto de una economía basada en el conocimiento.</li> <li>· Consolidar un <i>data center</i> que de soporte a la nube gubernamental, como parte de proyecto ancla.</li> </ul>
<b>Estrategias laborales de “transición justa”</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Se requiere identificar mejores prácticas internacionales de procesos de transición justa, evaluando su aplicabilidad en el contexto costarricense.</li> </ul>
<b>Inclusión, derechos humanos y promoción de la igualdad de género</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Los procesos de transformación se realizarán bajo consideraciones estratégicas integrales con enfoque de derechos humanos e igualdad de género, que garanticen el respeto a la diversidad y la promoción de la inclusión.</li> </ul>
<b>Estrategia de transparencia, métrica y datos abiertos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Para medir la descarbonización del país, se deberá consolidar un sistema de métrica y la formulación de indicadores de los procesos transformacionales, ya que las emisiones son un indicador retrasado o <i>lagging indicator</i>.</li> </ul>
<b>Estrategia en educación y cultura: la Costa Rica Bicentenario libre de combustibles fósiles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· En la práctica, se puede trabajar en alianza entre el Estado y la sociedad civil para informar iniciativas culturales y educativas.</li> </ul>

Fuente: Bicentenario, G. d., 2020

Considerando lo anterior, a continuación se analiza y compara la estrategia de carbono neutralidad de Costa Rica con los instrumentos de política que establecen los lineamientos de la transición energética en Colombia:

Figura 2-5. Análisis cualitativo de la estrategia de carbono neutralidad de Costa Rica



Fuente: elaboración propia

En conclusión, la estrategia de carbono neutralidad de Colombia se relaciona con la estrategia de carbono neutralidad de Costa Rica en los siguientes aspectos: eficiencia energética, generación de energía renovable, electrificación de la economía,

habilitadores de gestión activa de la demanda y modernización del sistema eléctrico. Al contrario, la estrategia de carbono neutralidad de Colombia *no* se relaciona con las estrategias de Costa Rica en la definición clara de los instrumentos económicos.



## 2.6 Estrategia de carbono neutralidad de Canadá

A continuación se presentan las generalidades de Canadá, que permitirán entender las decisiones políticas relacionadas con la carbono neutralidad.

↓ **Tabla 2-16.** Generalidades y contexto de Canadá

<b>Población (2019)</b>	37.589.262																						
<b>PIB per cápita - US\$ a precios constantes de 2010 (2019)</b>	51.588,76																						
<b>% PIB (2019)</b>	Industria: 23,29 % Agricultura: 1,86 % Importaciones: 33,33 % Exportaciones: 31,64 % Gasto: 15,18 %																						
<b>Inflación, precios al consumidor, % anual (2019)</b>	1,95%																						
<b>Sistema político - administrativo</b>	Monarquía parlamentaria – federal																						
<b>Matriz energética</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Fuente de Energía</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Hidráulica</td> <td>58,44 %</td> </tr> <tr> <td>Solar pv</td> <td>0 %</td> </tr> <tr> <td>Eólica</td> <td>5,23 %</td> </tr> <tr> <td>Otros</td> <td>0,65 %</td> </tr> <tr> <td>Carbón</td> <td>7,47 %</td> </tr> <tr> <td>Aceite</td> <td>0,94 %</td> </tr> <tr> <td>Gas natural</td> <td>10,10 %</td> </tr> <tr> <td>Biocombustibles</td> <td>1,62 %</td> </tr> <tr> <td>Marea</td> <td>0,04 %</td> </tr> <tr> <td>Nuclear</td> <td>15,48 %</td> </tr> </tbody> </table>	Fuente de Energía	Porcentaje	Hidráulica	58,44 %	Solar pv	0 %	Eólica	5,23 %	Otros	0,65 %	Carbón	7,47 %	Aceite	0,94 %	Gas natural	10,10 %	Biocombustibles	1,62 %	Marea	0,04 %	Nuclear	15,48 %
Fuente de Energía	Porcentaje																						
Hidráulica	58,44 %																						
Solar pv	0 %																						
Eólica	5,23 %																						
Otros	0,65 %																						
Carbón	7,47 %																						
Aceite	0,94 %																						
Gas natural	10,10 %																						
Biocombustibles	1,62 %																						
Marea	0,04 %																						
Nuclear	15,48 %																						
<b>Emisiones GEI (2016)</b>	584.846 kt																						

Fuente: Banco Mundial, 2019 e IEA, 2018

En esta sección se presentan las temáticas desarrolladas en el documento “A healthy environment and a healthy economy” (Envi-

ronment and Climate Change Canada, 2020), que están relacionadas con la carbono neutralidad de Canadá.



 **Tabla 2-17.** Estrategias de reducción de emisiones y carbono neutralidad de Canadá

Pilar	Descripción
Hacer que los lugares donde viven y se reúnen los canadienses sean más asequibles, al reducir el desperdicio de energía.	Los hogares y los edificios representan el 13% de las emisiones de gases de efecto invernadero de Canadá. Además, el uso de electricidad para refrigeración, iluminación y electrodomésticos eleva esta contribución a un 18%. Para reducir emisiones, se proponen medidas de eficiencia energética en hogares, edificios municipales y comunitarios, edificios del gobierno y edificios comerciales.
Hacer que el transporte y la energía limpia esté disponible en todas las comunidades.	El sector del transporte representa el 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero de Canadá, para reducirlas, se propone: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hacer los coches y camiones de cero emisiones más accesibles y asequibles.</li> <li>• Electrificar las redes de tránsito público y promover el transporte activo.</li> <li>• Apoyar la transición a alternativas más sostenibles e invertir en innovación en vehículos pesados, ferroviario, marítimo y aviación.</li> </ul>
Hacer a Canadá líder mundial en energía limpia.	Algunas medidas son: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eliminar gradualmente la energía a carbón en todo Canadá para 2030.</li> <li>• Aumentar la capacidad de generación de energía renovable, como la eólica y solar, y desplegar tecnologías de modernización de la red, como el almacenamiento de energía.</li> <li>• Garantizar que las comunidades rurales, remotas e indígenas que actualmente dependen del diésel tengan la oportunidad de funcionar con energía limpia y confiable para 2030.</li> <li>• Garantizar que la generación de electricidad de Canadá logre emisiones netas cero antes de 2050.</li> <li>• Posicionar a Canadá como líder mundial en la producción de baterías y otras tecnologías limpias.</li> </ul>
Seguir asegurándose de que la contaminación no es gratis y que los hogares reciban más dinero.	Algunas medidas son: <ul style="list-style-type: none"> <li>• El precio a la contaminación aumentará cada año hasta 2030. El gobierno propone aumentar el precio del carbono en \$15/ tCO<sub>2</sub> a partir de 2023, aumentando a \$170/tCO<sub>2</sub> en 2030.</li> <li>• Devolver la mayor parte de los ingresos por combustible directamente a las familias, a través de pagos de incentivos de acción climática.</li> <li>• Apoyar a empresas, comunidades, escuelas y hospitales. Estas empresas pueden buscar financiamiento de hasta el 25% de los costos elegibles para modernizaciones energéticamente eficientes.</li> </ul>
Abrazar el poder de la naturaleza para tener familias más saludables y comunidades más resilientes.	Algunas medidas son: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inversiones para la conservación, para restaurar y mejorar humedales, turberas, pastizales y tierras agrícolas, con el fin de impulsar el secuestro de carbono.</li> </ul>

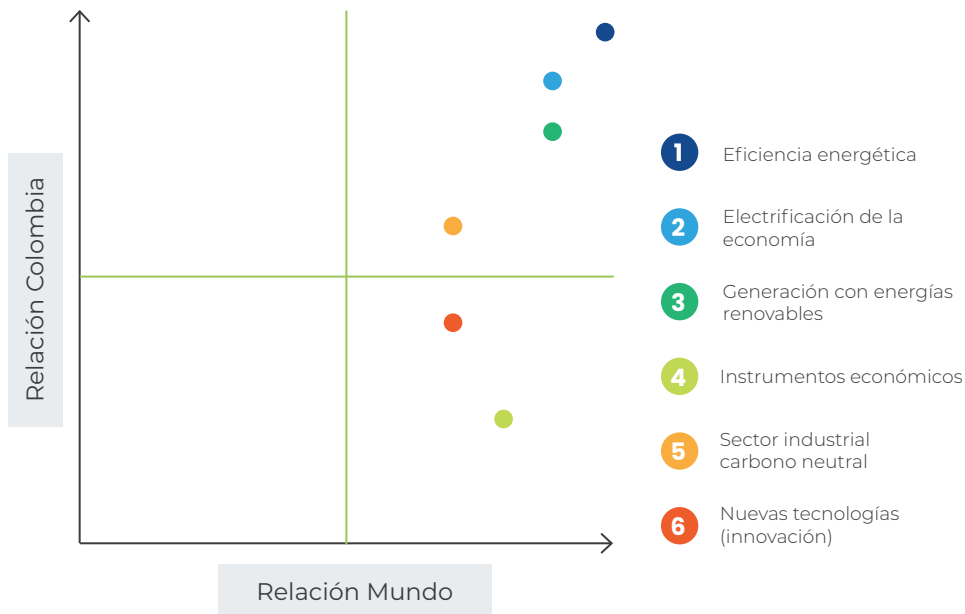
Pilar	Descripción
<p>Construir la ventaja de la industria limpia canadiense.</p>	<p>Algunas medidas son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Apoyar las economías locales y las pequeñas y medianas empresas: ingresos por precios del carbono y reducción del impuesto corporativo para las empresas que fabrican productos de cero emisiones.</li> <li>• Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero del sector industrial de Canadá (37% del total nacional), incluida la producción de petróleo y gas, mediante la implementación de tecnologías limpias para maximizar su competitividad en el contexto mundial.</li> <li>• Apoyar la transformación del sector minero hacia la neutralidad de carbono.</li> <li>• Promover el desarrollo de tecnología para capturar y almacenar carbono en el sector de petróleo y gas.</li> <li>• Apoyar la implementación de combustibles bajos en carbono, como el hidrógeno o nuevas tecnologías de emisión cero.</li> <li>• Lanzar un desafío <i>net zero</i> para grandes emisores industriales, para desarrollar e implementar planes que busquen alcanzar las emisiones netas cero para 2050.</li> <li>• Crear el fondo de Innovación Estratégica - Net Zero Accelerator, cuyo objetivo será apoyar el desarrollo y la adopción de soluciones de tecnología limpia en todos los sectores industriales.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia con base en Environment and Climate Change Canada, 2020

Considerando lo anterior, en la siguiente figura se analiza y compara la información presentada anteriormente con los instrumentos de política

que establecen los lineamientos de la transición energética en Colombia:

⬇️ **Figura 2-6.** Análisis cualitativo estrategia de carbono neutralidad de Canadá



Fuente: elaboración propia

En conclusión, la estrategia de carbono neutralidad de Colombia se relaciona con la estrategia de carbono neutralidad de Canadá en: eficiencia energética, electrificación de la economía y generación

con renovables. Por otra parte, la estrategia de carbono neutralidad de Colombia *no* se relaciona con la estrategia de Canadá en: instrumentos económicos y nuevas tecnologías con énfasis en innovación.

## 2.7 Transición energética

En esta sección se presentan algunas de las iniciativas más relevantes respecto a la transición energética en el contexto internacional. Específicamente, aquellas presentadas por la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés), la Comisión Europea, el Consejo Mundial de Energía (WEC, por sus siglas en inglés) y el Foro Económico Mundial (WEF, por sus siglas en inglés).

Tales iniciativas fueron seleccionadas para identificar conceptualizaciones y visiones de la transición energética, al igual que las tendencias tecnológicas a considerar para su materialización en el contexto internacional. Se espera que —junto con los resultados de la Misión de Transformación energética (ver sección 1.3.1), los avances propuestos por el PEN 2020–2050 (ver sección 1.2.1) y la actualización de la NDC (2020) (ver sección 1.2.2)— puedan servir de marco de referencia para la gestión de cambio climático en el sector minero energético.

La transición energética es un cambio estructural a largo plazo en los sistemas energéticos del planeta, que tiene el objetivo de promover el desarrollo sostenible económico y social, y de superar los retos impuestos por el cambio cli-

mático (World Energy Council [WEC], 2020b). Así, este concepto está intrínsecamente relacionado con la mitigación de gases de efecto invernadero, mediante la promoción del uso de combustibles limpios para alcanzar la neutralidad de carbono en la segunda mitad de este siglo (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2020b). Además, este proceso debe buscar lograr seguridad energética, mayor competitividad en la economía y beneficios en calidad de ambiente y salud para la población (International Energy Agency [IEA], 2020a).

Este proceso es de gran complejidad y requiere de acciones ambiciosas e innovadoras que junto con el compromiso de los diferentes países se podrán alcanzar. Estas se habilitarán mediante tecnología de la información, tecnología inteligente, marcos de políticas e instrumentos de mercado (IRENA, 2020b). En Colombia se está avanzando en este proceso de cambio con la Misión de Transformación Energética (ver sección 1.3.1), que prevé un sistema energético compuesto significativamente de fuentes de energía renovables variables, participación activa de la demanda, expansión ágil de las redes transporte y un mercado eléctrico flexible y dinámico para afrontar los retos que presenta el cambio climático (Corredor et al., 2020).

### 2.7.1 Caja de herramientas para la transición energética (WEC)

La evolución de los sistemas energéticos es compleja, especialmente respecto a la forma en que se produce, consume y comercializa la energía. Hoy en día, con la entrada de las fuentes no convencionales de energía, existen nuevos actores en estos sistemas (los denominados *prosumers*) que no solo tienen la capacidad de generar y consumir energía, sino también de entregar sus excedentes a la red. Asimismo, considerando los retos que afronta nuestra sociedad, se han promovido e incorporado en mayor proporción fuentes de energía alternativas, que

requieren de un marco especial para su apropiado desarrollo. A partir de esto, se identificaron 5 perspectivas principales (WEC, 2020b):

- Identificar y entender los aspectos emergentes relacionados con los sistemas energéticos en general, específicamente lo relacionado con la transición energética.
- Gestionar las necesidades del “trilema energético”; aspectos que compiten entre sí: seguridad, equidad y sostenibilidad.

- Asumir el futuro con un pensamiento creativo, al igual que una visión sistémica y a largo plazo.
- Promover la resiliencia de los sistemas energéticos para gestionar riesgos sistemáticos.
- Asumir el reto de la innovación en el sector energético.

Las herramientas que se presentarán a continuación permitirán afrontar la planeación e implementación de soluciones en los sistemas energéticos. Estas son: 1. Mapas y monitor de aspectos, 2. Índice de Trilema Energético; 3. Escenarios energéticos mundiales; 4. Marco de resiliencia dinámica; y, 5. Percepciones en la innovación.

### 2.7.1.1 Mapas y monitor de aspectos

Este monitor y sus respectivos mapas son contruidos anualmente a partir de la consulta a 94 expertos y líderes del sector energético, en el contexto mundial de los temas relevantes para la transición energética, tanto en el sector público como en el privado. La intención de estos

insumos es promover la discusión entre expertos e identificar las prioridades para la acción en pro de la transición energética. Además, esta información presenta los resultados de aspectos, tendencias y *drivers* energéticos en el contexto nacional, regional y global (WEC, 2020a).

⬇ **Tabla 2-18.** Aspectos críticos y acciones prioritarias para la transición energética en Colombia según el WEC

Hallazgo	Descripción
Aspectos críticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hay una alta dependencia en las relaciones comerciales con Estados Unidos para la exportación de petróleo.</li> <li>• Las tensiones existentes en la disputa comercial entre Estados Unidos y China pueden limitar sus inversiones en Colombia.</li> </ul>
	Temas regionales de integración, especialmente las relaciones con Venezuela y la crisis migratoria de su población.
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La alta dependencia de la economía colombiana en las exportaciones de petróleo ha afectado el valor de la moneda nacional frente al dólar.</li> <li>• La tasa de cambio determinará el potencial de recuperación económica, considerando antiguos niveles de producción de petróleo.</li> </ul>
Acciones prioritarias	Desarrollar soluciones de transporte innovadoras, especialmente la incorporación de vehículos eléctricos en la flota vehicular nacional.
	Promoción de eficiencia energética mediante la implementación de programas de uso racional y eficiente de energía.
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integración de las fuentes no convencionales y renovables de energía.</li> <li>• Procesos de digitalización y desarrollo de marcos normativos y regulatorios que faciliten la adopción de FNCER en el territorio nacional.</li> </ul>

Fuente: WEC, 2020a

Figura 2-7. Monitor mundial de aspectos energéticos 2020 – Colombia



Fuente: WEC, 2020a

### 2.7.1.2 Índice de Trilema Energético - 2020

Las iniciativas de política energética adelantadas por los gobiernos nacionales dan respuesta a las necesidades y particularidades específicas del contexto, de la disponibilidad de recursos naturales, de las características geográficas y de sus sistemas socioeconómicos. Los resultados y el análisis de este do-

cumento indican que no existe un camino predeterminado para lograr la transición energética exitosamente; la hoja de ruta debe diseñarse para atender las necesidades puntuales y prioridades, y debe hacerse mediante el desarrollo de un oportuno marco de política pública y sectorial.

Este índice se compone de tres aspectos (WEC, 2020c):

**1** Seguridad energética: mide la habilidad de un sistema tanto para atender la demanda de energía actual y futura como para soportar y dar respuesta a comportamientos atípicos. En esta dimensión se evalúa la efectividad en el manejo de los recursos energéticos nacionales y extranjeros, así como la resiliencia y confiabilidad del sistema energético. Así, el grado de diversificación de las matrices energéticas, las iniciativas de descarbonización de los sistemas energéticos y la disponibilidad de recursos naturales son aspectos positivos en estas actividades. Sin embargo, la abundancia de hidrocarburos puede tener una connotación negativa, pues se puede presentar concentración de las matrices energéticas en estos recursos.

**2** Equidad energética: considera el desarrollo de políticas en pro del acceso universal a la energía, de forma asequible y confiable para el consumidor final. Específicamente, considera aspectos como el precio de la energía percibido por el consumidor (incluyendo subsidios), la interconectividad del sistema y los costos bajos de generación (relacionados con la existencia de subsidios y/o la abundancia y facilidad de acceso a recursos energéticos extraíbles). Igualmente, contempla que el acceso confiable y asequible a la energía es promotor de la prosperidad económica de un país, haciendo énfasis

en la calidad de la oferta del recurso. Asimismo, es importante considerar que los subsidios pueden obstaculizar la diversificación de los sistemas energéticos, pues pueden fomentar la concentración y dependencia en energéticos fósiles. En consecuencia, esto genera desbalance en el índice del Trilema.

**3** Sostenibilidad ambiental: abarca los avances en la consolidación de un marco político para la descarbonización de la economía que sea inclusivo para toda la sociedad. Para esto, considera la diversificación de los sistemas energéticos, el desarrollo de medidas de eficiencia energética y la reducción de la intensidad energética del sistema.

En los resultados del estudio para 2020, Suiza fue el país con mejor desempeño, debido a su baja dependencia en importaciones de energía y la resiliencia de su sistema energético, relacionada con una abundancia de energía y un buen manejo de precios. Igualmente, se resaltan sus avances para optimizar la intensidad de carbón en la economía y sus amplios esfuerzos en la gestión de emisiones (WEC, 2020e). Por su parte, Colombia ocupó el puesto 35 a nivel mundial y 6 en la región Latinoamérica y el Caribe (LAC), lo que muestra una gran fortaleza en sostenibilidad ambiental y seguridad energética respecto a la región y el resto del mundo. Sin embargo, a pesar de que se ha avanzado en temas de equidad energética, los resultados en este aspecto de LAC y el mundo son superiores a los del país (WEC, 2020c).

**Tabla 2-19.** Comparación de puntuación por dimensiones del Índice de Trilema Energético en el contexto global, Latinoamérica y el Caribe (LAC) y Colombia

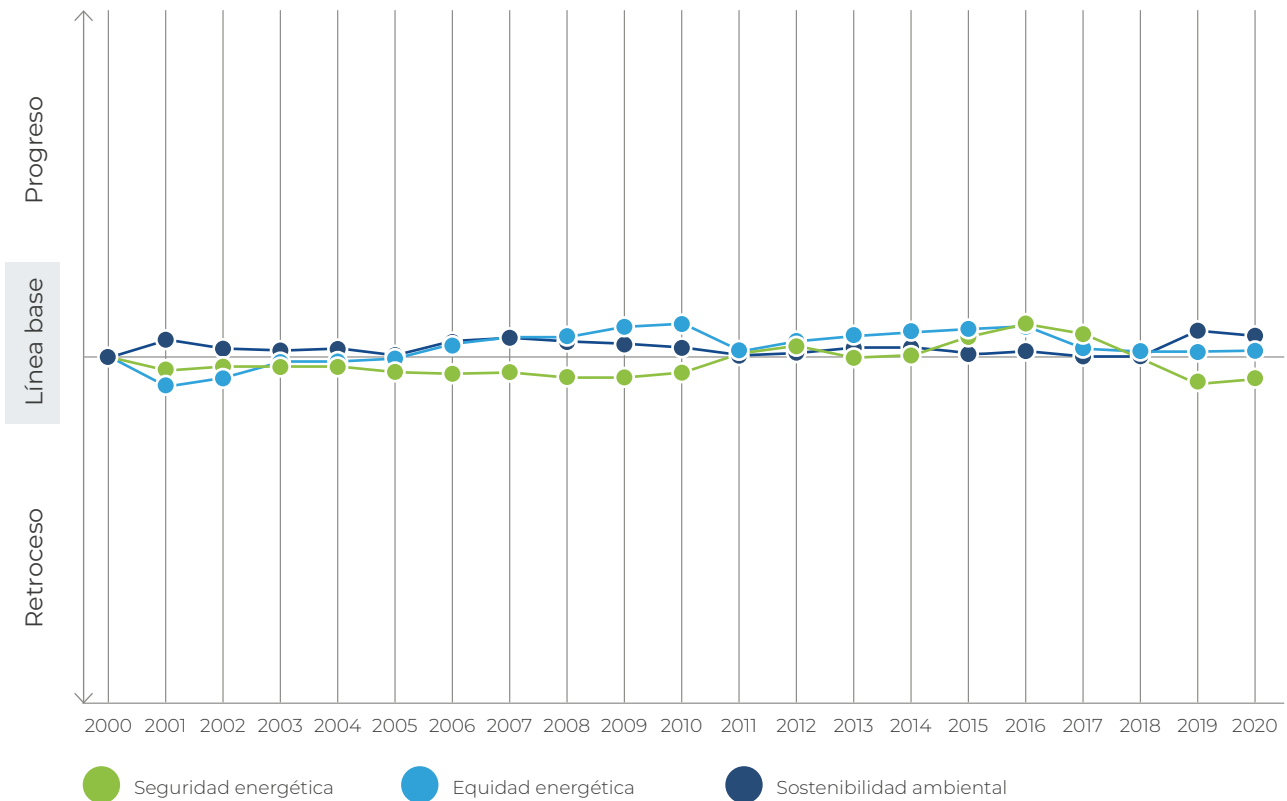
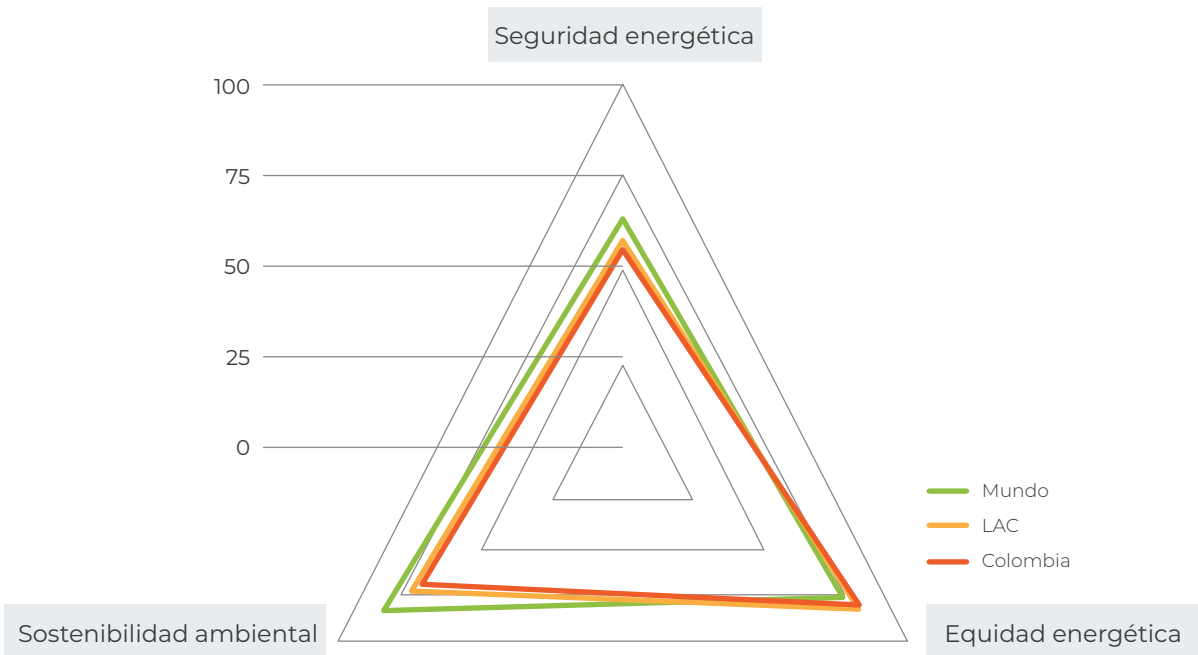
Dimensión	Mundo	LAC	Suiza (Posición n.º 1)	Colombia (Posición n.º 35)
Seguridad energética	58	60	66,4	63,7
Equidad energética	83	82	97,9	75,8
Sostenibilidad	69	74	90	83,8

Fuente: WEC, 2020c

Al evaluar las tendencias históricas, se puede evidenciar que los resultados obtenidos en el índice para 2020 presentan un comportamiento

similar a los de 2018 y 2019 (ver Figura 28). A continuación se presentan unos aspectos puntuales para cada una de las dimensiones (WEC, 2020c):

Figura 2-8. Comparación en el índice de Trilema Energético entre la calificación mundial, región LAC y Colombia



Fuente: WEC, 2020c

⬇ **Tabla 2-20.** Resultados por dimensiones del Índice de Trilema Energético para Colombia

Aspecto	Resultados
Seguridad energética	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se presentó un aumento entre 2019 y 2020, gracias a las políticas de promoción de fuentes renovables de energía. Esto permitirá que Colombia cuente con 2500 megavatios de capacidad instalada para la generación de energía solar y eólica en el año 2022.</li> <li>• Es importante considerar puntos a futuro sobre la alta dependencia en las utilidades percibidas por la actividad hidrocarburífera, la necesidad de una mayor diversificación de la matriz energética y el incremento de inversiones en tecnologías de almacenamiento.</li> <li>• La tendencia en años recientes muestra que las exportaciones han disminuido debido a una mayor demanda interna de productos refinados.</li> <li>• Colombia es un país rico en recursos, pues cuenta con las reservas más grandes de carbón en Suramérica.</li> <li>• En cuanto al consumo de gas natural, Colombia consume la totalidad de su explotación y realiza importaciones entre el 3% y 5% para cerrar la brecha entre la oferta y la demanda.</li> <li>• Es importante considerar que la dependencia en energía hidroeléctrica puede verse amenazada por la ocurrencia de sequías, que se traducen en mayores niveles de importación de gas natural.</li> </ul>
Equidad energética	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entre 2019 y 2020, el incremento en la cobertura de energía eléctrica se ve reflejado en la valoración de esta dimensión.</li> <li>• Se destaca que en 2017 Colombia generó dos guías de política pública para la autogeneración a grande y pequeña escala.</li> <li>• Es importante considerar la manifestación social como un indicador de la importancia que tiene contar con la aceptación social para la toma de decisiones por parte de los gobiernos y las compañías privadas. Por ejemplo, en Colombia se están desarrollando debates sobre la implementación del <i>fracking</i> y sus implicaciones en la seguridad energética considerando la opinión de la población.</li> </ul>
Sostenibilidad ambiental	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colombia cuenta con una matriz energética limpia, gracias a la generación hídrica, por lo que ocupa el puesto 10 a nivel mundial.</li> <li>• La ocurrencia de sequías puede presentar un incremento en las emisiones de GEI, asociado al incremento de funcionamiento de plantas térmicas.</li> <li>• Se han adelantado grandes esfuerzos en la diversificación de la matriz, especialmente mediante la incorporación de fuentes eólicas y solares.</li> </ul>

Fuente: WEC, 2020c



## 2.7.1.4 Escenarios energéticos mundiales

Estos escenarios han sido diseñados con el objetivo de dar una visión a gran escala del contexto energético, y de explorar potenciales caminos para la conformación de sistemas energéticos de mejor calidad en un futuro. Consisten en 3

planteamientos de alternativas para los diferentes sistemas energéticos a 2040 y buscan ilustrar los impactos y logros que se pueden alcanzar con la implementación de soluciones innovadoras (WEC, 2019d).

 **Tabla 2-21.** Escenarios energéticos mundiales – WEC

Descripción y características	Resultados del modelo
<b>Escenario <i>Modern Jazz</i></b>	
<p>Mundo liderado por el mercado y orientado al cliente, con altos niveles de innovación y digitalización, que dan cuenta de un crecimiento económico rápido y desigual, y de un crecimiento grande de productividad. Este escenario presenta el camino para lograr la meta de 2,5 °C en 2100, comparado con los niveles preindustriales. Se caracteriza por:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor acceso a la energía limpia en las escalas global y nacional</li> <li>• Nuevos esquemas de integración de sistemas, además de riesgos de ciberseguridad y de protección de datos</li> <li>• Alta electrificación en el sector de transporte y el manufacturero</li> <li>• Consumidores empoderados con mayor disponibilidad de información y con altos estándares de transparencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A mediados de 2030, los precios de vehículos de combustión interna, eléctricos de batería y eléctricos de combustible celular (hidrógeno) alcanzan la paridad.</li> <li>• En 2040, los vehículos de combustión interna acumularán el 47 % de la flota vehicular.</li> <li>• En la década de 2020, países de consumo intensivo de carbón —como India, Sudáfrica e Indonesia, entre otros— disminuyen su demanda y emplean otros combustibles fósiles de bajo costo (gas natural), energía limpia y nuclear.</li> <li>• La demanda de gas después del año 2040 continúa creciendo.</li> <li>• La demanda de petróleo alcanza su pico antes de 2035.</li> <li>• Entre 2025 y 2030, las emisiones de GEI alcanzan su pico.</li> <li>• En 2030, el almacenamiento alcanza los 96 USD /kWh.</li> <li>• En 2040, la demanda de electricidad alcanza el 28 % del total de la demanda energética.</li> <li>• Entre 2020 y 2040, se alcanza una reducción de CO<sub>2</sub> del 0,06%/año.</li> <li>• En 2030, los renovables (energía solar y eólica) alcanzan el 17 % de la matriz energética.</li> </ul>
<b>Escenario <i>Unfinished Symphony</i></b>	
<p>Mundo liderado por el desarrollo de políticas que promueven los procesos de planeación a largo plazo y la coordinación de diferentes iniciativas, para procurar la acción global unificada en pro de afrontar los retos interrelacionados, especialmente el futuro bajo en carbono. Este escenario presenta el camino para lograr la meta de 2 °C en 2100, comparado con los niveles preindustriales. Se caracteriza por:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor activismo y compromiso en la atención de la gestión de cambio climático subnacional</li> <li>• Visión de la mitigación de cambio climático con un enfoque más socialmente inclusivo</li> <li>• Agenda de desarrollo sostenible económicamente asequible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La demanda de gas continúa creciendo después de 2040.</li> <li>• La demanda de petróleo alcanza su pico en 2025.</li> <li>• La demanda de carbón alcanza su pico antes de 2020.</li> <li>• En 2020, las emisiones de CO<sub>2</sub> alcanzan su pico.</li> <li>• En 2040, la demanda de electricidad alcanza el 31 % del total de la demanda energética.</li> <li>• Entre 2020 y 2040, se alcanza una reducción de CO<sub>2</sub> del 0,06%/año.</li> <li>• Entre 2030 y 2035, la participación de los combustibles fósiles en la generación de energía cae por debajo del 50 %.</li> <li>• Entre 2040 y 2035, la demanda de energía eléctrica con hidrógeno alcanza el 2 % del total de la demanda.</li> <li>• En 2030, los renovables (energía solar y eólica) alcanzan el 17 % de la matriz energética.</li> <li>• Entre 2020 y 2040, las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyen 1,1%/año.</li> </ul>

Descripción y características	Resultados del modelo
Escenario <i>Hard Rock</i>	
<p>Mundo fragmentado con políticas hacia el interior, dejando de lado lo global, lo que resulta en un desarrollo menor y en menos vínculos de cooperación global. Este escenario presenta el camino para lograr la meta de 3°C en 2100, comparado con los niveles preindustriales. Se caracteriza por:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento de líderes populistas</li> <li>• Aumento de incertidumbre en la cooperación internacional</li> <li>• Consolidación del contexto regional, con cimientos firmes en términos de seguridad y no hacia la fragmentación total</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La demanda de carbón alcanza su pico en 2025.</li> <li>• En 2030, los renovables (energía solar y eólica) alcanzan el 11% de la matriz energética.</li> <li>• La demanda de gas y de petróleo continúa creciendo después de 2040.</li> <li>• En 2040, las emisiones de CO<sub>2</sub> alcanzan su pico.</li> <li>• En 2040, la demanda de electricidad alcanza el 20% del total de la demanda energética.</li> <li>• Entre 2020 y 2040, se alcanza una reducción de CO<sub>2</sub> del 0,06%/año.</li> <li>• Entre 2030 y 2035, la participación de los combustibles fósiles en la generación de energía cae por debajo del 50%.</li> <li>• Entre 2040 y 2035, la demanda de energía eléctrica con hidrógeno alcanza el 2% del total de la demanda.</li> </ul>

Fuente: WEC, 2019d

### 2.7.1.5 Marco de resiliencia dinámica

Este marco tiene el objetivo de promover la resiliencia de todo el sistema energético, al mismo tiempo que se avanza en la transición energética. Para esto, es necesario desarrollar habilidades y capacidades para anticipar riesgos sistemáticos y emergentes, de forma que sea posible absorber, recuperarse y adaptarse a las nuevas y rápidas condiciones cambiantes (WEC, 2020d). Así, el marco busca explorar los siguientes puntos:

- **Reservas de línea base:** corresponde a las políticas, instrumentos y redes de colaboración ya existentes en el gobierno y las empresas del sector eléctrico que puedan ponerse a prueba, con el fin de ajustarlas de manera preventiva y complementarlas según sea el caso (WEC, 2020d).
- **Capacidades de conocimiento:** se refiere a las capacidades y habilidades para el conocimiento, evaluación y entendimiento de los riesgos emergentes y los impactos en cadena que puedan desencadenarse de llegar a materializarse algún evento extremo. También, considera la planeación de comunicaciones conforme con el desarrollo y evolución de las situaciones (WEC, 2020d).

- **Agilidad y velocidad de respuesta:** es la capacidad de repuesta en tiempo real a la información y los datos de un evento en desarrollo. Considera la implementación de estrategias y planes para mitigar y adaptarse de forma eficiente y efectiva (WEC, 2020d).
- **Capacidad de adaptación y flexibilidad:** los planes de respuesta no son diseñados para dar respuesta exacta a todos los problemas o impactos que surjan de la materialización de estos eventos; sin embargo, se debe contar con la capacidad de adaptarse rápidamente a estas nuevas condiciones (WEC, 2020d).
- **Capacidad de prevención y recuperación:** corresponde a la capacidad de recuperar condiciones de operación normales e impactos positivos de forma efectiva y en el menor tiempo posible. Es recomendable incorporar soluciones creativas para el desarrollo de sinergias entre actores con base en principios de adaptación interactiva e innovación colaborativa (WEC, 2020d).

Con base en lo anterior, este marco se enfoca en tres aspectos principales:

## Eventos climáticos extremos

Considerando que los sistemas energéticos de todos los países están expuestos a eventos climáticos cada vez más severos y recurrentes, los gobiernos y las empresas del sector enfrentan un panorama de riesgos emergentes y sistemáticos más diverso y de mayor complejidad; de materializarse dichos eventos, se esperan impactos negativos con consecuencias encadenadas a lo largo y ancho de la sociedad (WEC, 2020d). En esta sección se realiza una revisión a casos de estudio y lecciones aprendidas en distintos países<sup>20</sup>, entre ellos Colombia, al igual que a las respecti-

vas consecuencias (en términos de inversiones), con el fin de mitigar los impactos ocasionados.

En Colombia se presentó el caso del fenómeno de El Niño entre 2015 y 2016, que llevó a considerar la implementación de racionamientos de energía. A pesar de contar con la suficiente capacidad instalada y el respaldo de plantas de generación térmica, el sistema eléctrico estuvo cerca de no poder satisfacer la demanda del país. A continuación se presenta una descripción de los hallazgos:



**Tabla 2-22.** Impactos y respuestas al FEN 2015–2016 en Colombia

Impactos	Respuesta
Niveles de agua en hidroeléctricas decayeron 60 %-70 %	Se introdujo un tope de precio en el mercado spot: 75 % del primer nivel del costo operacional incremental por apagón.
Daño imprevisto en la planta hidroeléctrica más grande	Se estableció un precio base para el precio spot, para recuperar costos.
Escasez acumulada de energía 200 MW (abril 2016)	Se lanzó una campaña para disminuir el consumo denominada “Apagar paga”, para lograr un ahorro diario del 5%. Aumentó la importación de GNL del caribe.
Falla de mercado: precios de electricidad en el mercado spot alcanzaron los US400/ MWh	Se importó energía de Ecuador, alcanzando 5,6 Gwh en marzo de 2016. Trabajo conjunto entre el IDEAM y el sector eléctrico <i>Fast-track</i> en licenciamiento de proyectos de expansión de plantas térmicas Dos nuevas plantas térmicas entraron en funcionamiento en 2018, una de 100 MW (gas natural) y otra de 260 MW (carbón). Promoción al desarrollo de energías renovables

Fuente: WEC, 2020d

En conclusión, el estudio recomienda considerar en la planeación energética del país el impacto de los diferentes eventos climáticos relevantes, no solamente El Niño y La Niña. Para esto,

es necesario robustecer el funcionamiento del IDEAM, la articulación interinstitucional y el desarrollo de modelos de precipitación de mayor precisión en las presas (WEC, 2019a).

<sup>20</sup> **Incendio forestal:** Alberta, Canadá (mayo, 2016); California, EE. UU. (2017–2018); Victoria, Australia (2009). **Sequía:** Colombia (2015–2016); Ciudad del Cabo, Sudáfrica (2017–2018); Islandia (2013–2014). **Tormenta de hielo:** Quebec, Canadá (1998). **Tormenta de viento:** Véneto, Italia (2018). **Tifón:** Hong Kong (2018); Japón (2018). **Tormentas e intensas nevadas:** Finlandia (2001–2007). **Ciclón:** Omán (mayo, 2018).



## Riesgos cibernéticos

La transición energética está avanzando de la mano de la evolución de la tecnología y la digitalización del funcionamiento del sector; con la incorporación de soluciones de monitoreo y control basadas en inteligencia artificial (IA) y de tecnologías de información (TI) para el desarrollo de las operaciones del sector, como infraestructura interconectada con Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) y soluciones de *blockchain* para trazabilidad y transparencia en el funcionamiento del sector, entre otras. Esto, a su vez, implica la exposición del sector a nuevos riesgos, que deben ser parte de la planeación para determinar mecanismos de protección, capacidades de respuesta y protocolos de prueba ante diferentes amenazas para una efectiva recuperación. Amenazas como robo de información confidencial de servidores, ataques de hackeo de software y equipos de operación de la infraestructura, entre otros ataques cibernéticos (WEC, 2019c).

## Análisis geoespacial

Se refiere al uso de herramientas tecnológicas para asistir los procesos de gestión de riesgo, específicamente a la generación de información relevante para el conocimiento del riesgo, al igual que su prevención y la preparación oportuna de los sistemas. Algunas de estas son la visualización y el mapeo dinámico de amenazas climáticas (WEC, 2020d).

En este sentido, es necesario que las organizaciones y los gobiernos desarrollen capacidades para afrontar los retos de la transición de forma estratégica y proactiva. Algunos aspectos prioritarios son el desarrollo de redes de colaboración, políticas públicas oportunas y eficientes, metodologías de evaluación de riesgos, mecanismos de respuesta y capacidad adaptativa en nuevos contextos tecnológicos (WEC, 2020d).

### 2.7.1.6 Percepciones en la innovación

La rápida transición a una economía descarbonizada requiere de la regulación y el desmontaje temprano de la infraestructura que hace uso de fuentes convencionales de energía (carbón, nuclear, petróleo y gas natural). Esta transformación debe realizarse de forma tal que se minimicen los costos y se gestionen oportunamente los riesgos de impactos en cadena que puedan desprenderse sobre el sistema energético. La determinación de la forma en que se maneje dicha infraestructura depende de la hoja de ruta que sigan los diferentes países para lograr su transición energética y descarbonización exitosamente. Considerando lo anterior, se determinaron los siguientes principios para el desmontaje y modificación del propósito de uso de la infraestructura asociada (WEC, 2019b):

- La transición energética requiere de infraestructura adaptable, confiable y asequible. Se debe encontrar mejores formas de emplear activos energéticos durante la transición energética.
- Usar infraestructura existente es un recurso para lograr una transición energética más asequible. Es importante repensar el propósito de la infraestructura existente.
- La cantidad de activos en desuso o por quedar en condición de desuso es desconocida en un escenario de transición energética. Esto puede hacer inviable económica y financieramente dicha transición.
- Los negocios y empresas deben buscar estrategias de mercado que les permitan reutilizar infraestructura existente, a la vez que contribuyen a la transición a un futuro bajo en carbono.

Para lo anterior, los sectores públicos y privados deben trabajar conjuntamente en el desarrollo

de un plan de acción de infraestructura energética que permita identificar oportunidades que se alineen con las metas de descarbonización y de transición energética (WEC, 2019b). El conjunto de herramientas planteadas por la WEC puede brindar diferentes insumos para el planteamiento de hojas de ruta para acelerar la transición energética, con base en espacios de colaboración e innovación para los retos del futuro. Así, este conjunto permitirá convertir dichos retos en oportunidades, ya sea mediante el uso de uno de sus componentes o la combinación de varios de ellos, de la siguiente forma (WEC, 2020b):

- Al utilizar los resultados del Índice de Trilema Energético junto con los escenarios energéticos mundiales, se pueden generar diferentes marcos para el desarrollo de política pública.
- Al utilizar los resultados de los mapas y monitor de aspectos junto con el marco de resiliencia dinámica, se puede generar un registro de riesgo de transición.
- Al utilizar los resultados del Índice de Trilema Energético junto con las percepciones en la innovación, se puede generar un marco integrado para el desarrollo de política pública.
- Al utilizar los resultados de los mapas y monitor de aspectos junto las percepciones en la innovación, se puede articular eventos de participación ciudadana relacionados con aspectos prioritarios, por ejemplo, eventos de *hackathon*.
- Al utilizar los resultados de las percepciones en la innovación junto con los escenarios energéticos mundiales, se puede identificar medidas a implementar con altos niveles de innovación y pertinencia.

Este documento se relaciona con la Misión para la Transformación Energética de Colombia de forma transversal con todos los focos desarrollados por el panel de expertos. Principalmente, abarca aspectos de análisis comunes en cuanto a la inclusión de fuentes de energía renovable; los procesos de descarbonización de la matriz energética y la eco-

nomía; la automatización, descentralización y digitalización del sistema eléctrico; el desarrollo de redes de transporte y distribución robustas para el sector; el desarrollo del sector energético con altos niveles de confiabilidad para atender la demanda futura; y el incremento de la cobertura y calidad de acceso al servicio eléctrico en el SIN y ZNI.

## 2.7.2 Energía limpia para todos (Comisión Europea)

Con el objetivo de asumir los retos futuros, la Unión Europea ha planteado este documento buscando liderar la transición energética de forma segura, competitiva y sostenible, para, de esta forma, afrontar los retos impuestos por el cambio climático ante nuestra sociedad. La transformación de la economía y la transición energética deben ser bien manejadas para evitar la disparidad social y regional, por lo que se deben diseñar iniciativas y procesos con principios de justicia y que sean socialmente aceptables. La meta es, entonces, que todos los europeos, sin importar su ubicación, se beneficien por igual, haciendo énfasis

en la protección del consumidor más vulnerable (European Commission, 2019).

De esta forma, se ha planteado una estrategia que se articula con los objetivos de carbono neutralidad a 2050 para promover un planeta más limpio en el futuro. Para dar mayor celeridad al proceso de transición energética en la UE, se espera que la inversión en temas de cambio climático incremente del 20% al 25%, de acuerdo con lo establecido en el presupuesto 2021-2027. A partir de esto, se plantean las siguientes metas (European Commission, 2019):



 **Tabla 2-23.** Medidas y metas de transición energética – Comisión Europea (Clean Energy for all europeans)

Medidas propuestas	Meta		Año
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transparencia en las facturas del servicio para generar una mayor capacidad de decisión en el usuario, con información real y oportuna sobre la cantidad y el costo de su consumo.</li> <li>• Marco normativo más inclusivo y flexible para FNCER y nuevos actores, como <i>prosumers</i> y autogeneradores.</li> <li>• Marco normativo y regulatorio que permita la negociación en tiempo real.</li> <li>• Robustecer los procesos de medición de información y mejorar su precisión, especialmente los pronósticos climáticos, para que las plantas de fuentes de energía renovables puedan predecir su producción y participar más eficientemente en el mercado.</li> <li>• Esquema de subsidios en el que se incentive las fuentes limpias por encima de las más contaminantes.</li> <li>• Determinar tarifas dinámicas de electricidad para el consumidor final y crear plataformas certificadas para la comparación de precios.</li> <li>• Desarrollo de iniciativas de <i>Internet of Things</i>, <i>Smart-grids</i> y baterías y sistemas de almacenamiento, para movilizar la curva de demanda a lo largo del día.</li> </ul>	Reducción de emisiones GEI <sup>21</sup>	40%	2030
	Uso de FNCER <sup>22</sup>	32%	2030
	Eficiencia energética general	32,5%	2030
		50%	2050
	Eficiencia energética de edificaciones	40%	2030
	Reducción de emisiones GEI de edificaciones	36%	2030
	Participación de energías renovables y nuclear	80%	2050
	Generación de empleos	1,4 millones	2030
	Crecimiento económico (GDP) por transición energética	1%	2030
	Soluciones eólicas descentralizadas de propiedad comunitaria	17%	2030
	Soluciones solares descentralizadas de propiedad comunitaria	21%	2030

Fuente: elaboración propia con base en European Commission, 2019

Este documento se relaciona con la Misión para la Transformación Energética de Colombia de forma transversal con todos los focos desarrollados por el panel de expertos. Principalmente, abarca aspectos de análisis comunes en cuanto a la inclusión de fuentes de energía renovable en la matriz energética; el desarrollo de soluciones para

promover el empoderamiento del usuario; los procesos de descarbonización de la matriz energética y la economía; la descentralización, digitalización y modernización del sistema eléctrico; la implementación de soluciones DER e infraestructura de medición inteligente (AMI); y el diseño de esquemas tarifarios dinámicos y nodales.

21 El proyecto HYBRIT espera lograr una reducción de 6 Mt CO<sub>2</sub> a 2040, con iniciativas de reducción de consumo de energía en industrias energéticamente intensivas en Suecia (European Commission, 2019).

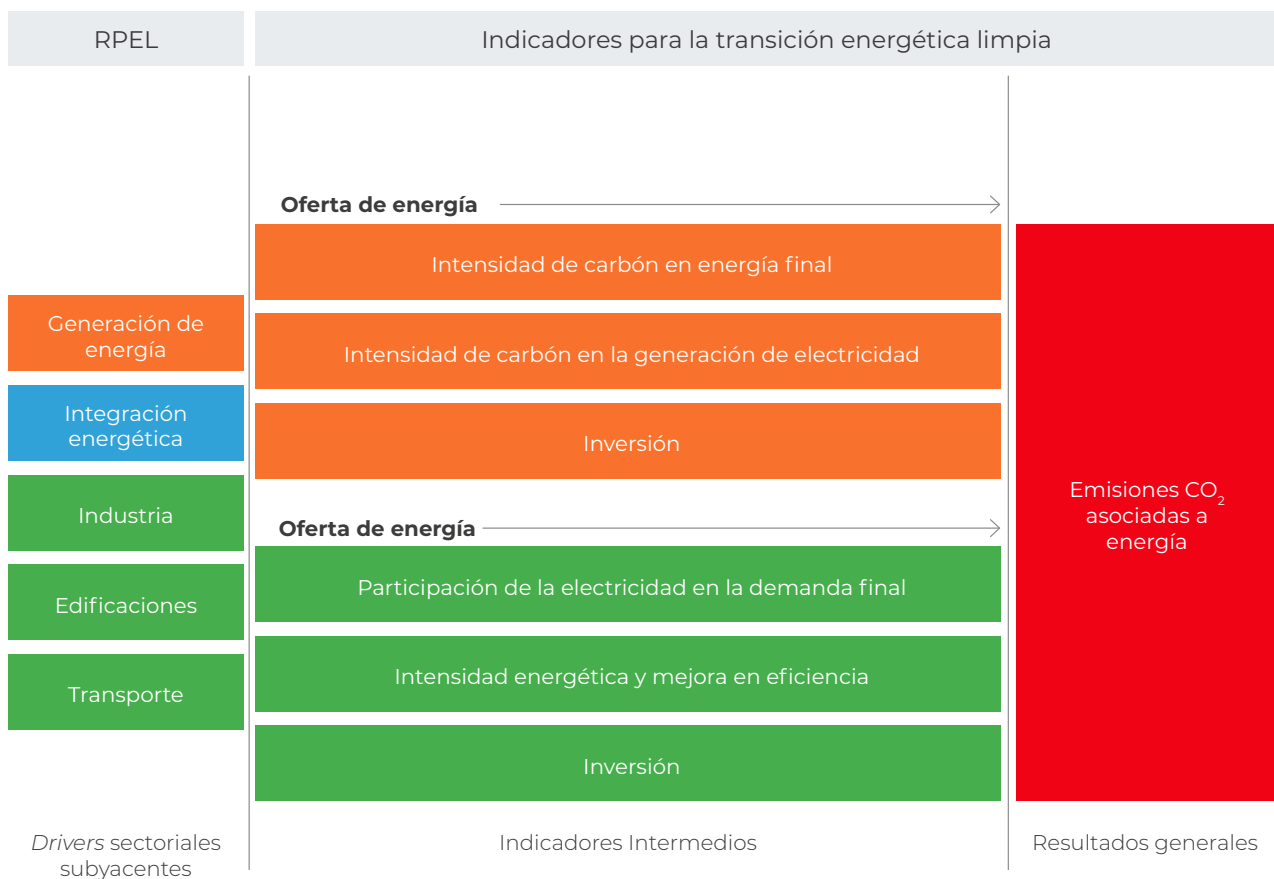
22 Desarrollo de procesos de innovación en la implementación de nuevas fuentes de energía y de almacenamiento de energía, especialmente en la generación de energía con base en tecnología de fusión (Proyecto ITER), la digitalización de sector energético, el almacenamiento de energía en hidrógeno y el almacenamiento y captura de carbono (European Commission, 2019).

## 2.7.3 Indicadores de transición energética (IEA)

Teniendo en cuenta que el sector energético representa cerca del 90% de las emisiones de CO<sub>2</sub> del planeta, se determinó un esquema de indicadores intermedios y de resultado para determinar los cambios en las emisiones, considerando la implementación de medidas de transición energética (enfoque abajo arriba). A

partir de este, es posible determinar alternativas de política y estrategias a largo plazo para la descarbonización. Cabe mencionar que, con el objetivo de obtener los mejores resultados, es recomendable tener una visión del proceso de transición energética para optimizar el rastreo del proceso (IEA, 2019).

⬇ **Figura 2-9.** Esquema de los indicadores de transición energética de IEA



Fuente: IEA, 2019

Este estudio incorpora datos históricos de los dos principales escenarios del World Energy Outlook: Stated Energy Policies Scenario (STEPS) y Sustainable Development Scenario (SDS). El primero corresponde a los impactos que pueden generar los marcos de política existentes y los que están previstos a ser imple-

mentados, mientras que el segundo determina diferentes hojas de ruta para alcanzar las metas de mitigación de cambio climático, calidad del aire y metas universales de acceso a la energía (IEA, 2019). A continuación se presentan los temas analizados para lograr el Acuerdo de París en 2040 en el contexto global:



 **Tabla 2-24.** Medidas consideradas para la estimación de indicadores de transición energética IEA

Medidas propuestas	Indicador	Valor	Año
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Promover las FNCER para la descarbonización de la generación de energía.</li> <li>• Gestionar la intensidad energética y de carbono en la oferta de energía en industria, transporte y edificaciones.</li> <li>• Crear marcos de desarrollo para separar el crecimiento económico y la demanda de energía mediante una matriz energética más limpia.</li> <li>• La conversión de carbón a gas natural sigue siendo una de las principales alternativas en la generación de energía, pero no es la mejor debido a sus factores de emisión<sup>23</sup>.</li> <li>• En el sector transporte, promover medidas de eficiencia energética mediante la optimización del tamaño y diseño de los vehículos, el aumento de la ocupación del vehículo y el incremento de la participación de EV.</li> <li>• En el sector residencial, promover el uso de equipos y dispositivos eficientes, y optimizar el consumo energético por unidad de área vivienda per cápita.</li> </ul>	Reducción de emisiones de CO <sub>2</sub>	2%/año	2020–2029
		4,6%/año	2030–2040
	Reducción de la intensidad de carbón en la energía final	85%	2040
		3,6%/año	
	Consumo de energía eléctrica	33%	2040
	Venta de vehículos eléctricos	75%	2040

Fuente: elaboración propia con base en IEA 2019

Para lograr la transición energética efectiva, se necesita una inversión adicional del 20% de los niveles reportados actualmente; sin embargo, se debe generar un gran proceso de redistribución de la inversión para dar prioridad a fuentes renovables. Asimismo, la inversión en eficiencia energética y en fuentes energéticas bajas en carbono debe ser doblada, si se considera el costo de generación por unidad de energía generada (IEA, 2019).

Este documento se relaciona con la Misión para la Transformación Energética de Colombia de forma transversal con todos los focos desarrollados por el panel de expertos. Principalmente, abarca aspectos de análisis comunes en cuanto a la inclusión de fuentes de energía renovable en la matriz energética; los procesos de descarbonización de la matriz energética y la economía; la digitalización del sistema eléctrico; y la promoción de la competitividad tanto del sector energético como de la economía del país.

<sup>23</sup> En este sentido, se destacan los casos de países como Estados Unidos o los de la Unión Europea, en los que se requiere una mayor proliferación de tecnologías bajas en carbono y el retiro de plantas basadas en carbón para lograr una intensidad de 42 g/kWh en 2040 (IEA, 2019).

## 2.7.4 Perspectivas mundiales de las energías renovables: transformación energética 2050<sup>24</sup> (IRENA)

La International Renewable Energy Agency (IRENA) ha desarrollado este producto con el objetivo de orientar y cuantificar la transformación del sistema energético mundial, determinando hojas de rutas ambiciosas y viables tanto técnica como económicamente. En este sentido, la

agencia presentó los resultados del actual proceso de transformación en el contexto regional en términos de energía y beneficios percibidos por los sistemas socioeconómicos, en el marco político hasta abril de 2019. Para esto, el estudio hace uso de los siguientes escenarios (IRENA, 2020a):

### Escenario de línea base energética

Este escenario determina las emisiones considerando el marco político de los diferentes países en 2015, año en que se promulgó el Acuerdo de París. Según las proyecciones, las emisiones

del sector energético aumentan a una tasa del 0.7 % anual alcanzando a 2050 las 43.000 Mt; lo que traería consigo un aumento de la temperatura media del planeta tierra en 3 °C.

⬇ **Tabla 2-27.** Indicadores línea base - IRENA

Indicador	Histórico
Emisiones GEI en 2019	34.000 Mt
Demanda de energía total	599 EJ
Total de renovables del consumo final de energía en 2018	10,5 %
Disminución de la intensidad de energía entre 2015 y 2018	1,8 %/año
Renovables en la generación eléctrica en 2018	26 %
Electricidad en el consumo final de energía en 2017	20 %
Vehículos eléctricos en todo el mundo en 2019	7,9 millones
Bombas de calor en todo el mundo en 2019	38 millones
Renovables variables en la generación en 2018	10 %
Generación de renovables variables con energía solar en 2019	582 GW
Generación de renovables variables con energía eólica en 2019	624 GW
Capacidad de almacenamiento fijo en 2019	30 GWh
Capacidad de almacenamiento de vehículos eléctricos en 2019	200 GWh
Generación de hidroeléctricas en la generación en 2019	1189 GW
Capacidad almacenamiento de hidroeléctricas de bombeo en 2019	121 GW
Bioenergía total en la oferta total de energía primaria en 2018	9,8 %
Bioenergía moderna en la oferta total de energía primaria en 2018	5,1%
Producción de biocombustibles líquidos	136 billones L
Producción de hidrógeno azul en 2018	0,6 Mt
	0,08 EJ
Producción de hidrógeno verde en 2018	1,2 Mt
	0,16 EJ
Costo de producción de hidrógeno verde en 2018	4,0-8,0 USD/kg

24 Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050

Indicador	Histórico
Capacidad de electrolizadores en GW	0,04 GW
Demanda de electricidad para la producción de hidrógeno verde	0,26 TWh

Fuente: Elaboración propia con base en IRENA 2020a

## Escenario energético planeado (PES, por sus siglas en inglés)

Corresponde al desarrollo energético del sistema, considerando los planes energéticos de los gobiernos y otras metas planteadas, como la NDC. Este escenario espera alcanzar un incremento de temperatura de 2,5 °C en la segunda mitad del siglo (IRENA, 2020a).

 **Tabla 2-25.** Indicadores del escenario PES a 2030 y 2050

Indicador	2030	2050
Emisiones GEI	35.000 Mt	33.000 Mt
Reducción del consumo de combustibles fósiles	7,16 %	9,28%
Reducción del consumo de carbón	10%	28%
Aumento del consumo de petróleo	0%	2%
Aumento del consumo de gas natural	41%	53%
Total de renovables del consumo final de energía	17%	25%
Disminución en la intensidad de energía	2,4%/año	2,6%/año
Renovables en la generación eléctrica	38%	55%
Electricidad en el consumo final de energía	24%	30%
Vehículos eléctricos en todo el mundo	269 millones	627 millones
Bombas de calor en todo el mundo	63 millones	119 millones
Renovables variables en la generación de energía	19%	36%
Generación de renovables variables con energía solar	2037 GW	4474GW
Generación de renovables variables con energía eólica	1455 GW	2434 GW
Capacidad de almacenamiento fijo	370 GWh	3400 GWh
Capacidad de almacenamiento de vehículos eléctricos	3294 GWh	7546 GWh
Capacidad de las hidroeléctricas en la generación de energía eléctrica	1356 GW	1626 GW
Capacidad de almacenamiento de hidroeléctricas de bombeo	200 GW	300 GW
Bioenergía total en la oferta total de energía primaria	9%	10%
Bioenergía moderna en la oferta total de energía primaria	8%	10%
Producción de biocombustibles líquidos	285 billones L	393 billones L
Producción de hidrógeno azul	10 Mt	40 Mt
	1,25 EJ	5 EJ
Producción de hidrógeno verde	9 Mt	25 Mt
	1,1 EJ	3 EJ
Costo de producción de hidrógeno verde	2,5-5,0 USD/kg	1,6-3,3 USD/kg
Capacidad de electrolizadores	100 GW	270 GW
Demanda de electricidad para la producción de hidrógeno verde	450 TWh	1200 TWh

Fuente: elaboración propia con base en IRENA, 2020a

## Escenario de transformación energética (TES)

Este es un escenario ambicioso y realista basado en el desarrollo de energías renovables y en la mejora sostenida de la eficiencia energética aso-

ciada a dichas fuentes de energía. Este escenario busca alcanzar las metas de incremento de temperatura de 2 °C y 1,5 °C a 2100 (IRENA, 2020a).

**Tabla 2-26.** Indicadores del escenario TES a 2030 y 2050

Indicador	2030	2050
Reducción de emisiones GEI respecto a 2020	26.5 %	3,8%/año 70 %
Reducción del consumo de combustibles fósiles	35.5 %	73.2 %
Reducción del consumo de carbón	41%	87 %
Reducción del consumo de petróleo	31%	70 %
Aumento (+) y/o reducción (-) del consumo de gas natural	(+) 3%	(-) 41%
Total de renovables del consumo final de energía	28%	66%
Disminución de la intensidad de energía	3,6% /año	3,2%/año
Renovables en la generación eléctrica	57%	86%
Electricidad en el consumo final de energía	29%	49%
Vehículos eléctricos en todo el mundo	379 millones	1109 millones
Bombas de calor en todo el mundo	155 millones	334 millones
Renovables variables en la generación de energía	35%	61%
Generación de renovables variables con energía solar	3227 GW	8828 GW
Generación de renovables variables con energía eólica	2526 GW	6044 GW
Capacidad de almacenamiento fijo	745 GWh	9000 GWh
Capacidad de almacenamiento de vehículos eléctricos	5056 GWh	14145 GWh
Capacidad de las hidroeléctricas en la generación de energía eléctrica	1444 GW	1822 GW
Capacidad de almacenamiento de hidroeléctricas de bombeo	225 GW	325 GW
Bioenergía total en la oferta total de energía primaria	12%	23%
Bioenergía moderna en la oferta total de energía primaria	12%	23%
Producción de biocombustibles líquidos	378 billones L	652 billones L
Producción de hidrógeno azul	30 Mt	80 Mt
	3.75 EJ	10 EJ
Producción de hidrógeno verde	25 Mt	160 Mt
	3 EJ	19 EJ
Costo de producción de hidrógeno verde	1,8-3,2 USD/kg	0,9-2,0 USD/kg
Capacidad de electrolizadores	270 GW	1700 GW
Demanda de electricidad para la producción de hidrógeno verde	1200 TWh	7500 TWh

Fuente: Elaboración propia con base en IRENA, 2020a

En el contexto regional, este escenario presenta los siguientes resultados para Latinoamérica y El Caribe (IRENA, 2020a):

- Emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la energía: 1200 Mt CO<sub>2</sub>/año en 2017, 1000 Mt CO<sub>2</sub>/año en 2030 y 600 Mt CO<sub>2</sub>/año en 2050.
- Participación de la electricidad en el consumo final de energía: 18% en 2017, 26% en 2030 y 39% en 2050.
- Participación de las energías renovables en el total del consumo final de energía: 30% en 2017, 53% en 2030 y 73% en 2050.
- Participación de las energías renovables en la oferta total de energía primaria: 30% en 2017, 53% en 2030 y 73% en 2050.
- Participación de las energías renovables en generación de energía: 65% en 2017, 85% en 2030 y 93% en 2050.

## Perspectiva de descarbonización más profunda (DDP)

A parte del planteamiento del TES, este escenario plantea la implementación de medidas adicionales para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al consumo energético y a los procesos industriales. Dichas medidas buscan la reducción acelerada de emisiones para lograr la carbono neutralidad entre 2050 y 2060 (IRENA, 2020a). En particular, este planteamiento tendría las siguientes ventajas:

- Alcanzaría la reducción de emisiones en su totalidad a 2050, como máximo en 2060.
- Permitiría un incremento de temperatura de 1,5 °C en la segunda mitad del siglo.

Los resultados de TES y DDP permitirían alcanzar un 70% de reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> para 2050. Cerca del 90% de esta reducción se debe a la implementación de energías reno-

vables y medidas de eficiencia energética. Igualmente, la meta mayor es lograr la neutralidad de carbono en 2050 (IRENA, 2020a).

La transición energética requiere de políticas que incentiven la economía después de la pandemia por el COVID-19, como el Acuerdo Verde Europeo. En este sentido, este documento plantea que tales escenarios permitirán un crecimiento económico 2,4% mayor al que los planes actuales permitirían (IRENA, 2020a).

La transición energética en pro de lograr un futuro responsable y seguro requiere de inversiones mayores orientadas a tecnologías de energías limpias, junto con un marco de incentivos que desincentive el uso de combustibles fósiles. Por tanto, a continuación se presentan las inversiones estimadas por cada escenario entre 2016 y 2050 (IRENA, 2020a):



Tabla 2-28. Costos por del escenario entre 2016 y 2050 - IRENA

Tipo	PES		TES		DDP	
	Trillones USD	(%)	Trillones USD	(%)	Trillones USD	(%)
Costo total acumulado	95	100	110	100	130	100
Inversión en renovables	12,4	13	27	25	38	29
Inversión en electrificación e infraestructura: 26 trillones USD (23%)	13	14	26	23	27	21
Inversión en combustibles fósiles y otros	40	42	20	18	22	17
Inversión en eficiencia energética: 37 trillones USD (34%)	29	31	37	34	43	33
Reducción de externalidades – cambio climático			27		22	
Reducción de externalidades – contaminación del aire en exteriores			13		18	
Reducción de externalidades – contaminación del aire en interiores			20		20	

Fuente: elaboración propia con base en IRENA, 2020a

Por último, a 2050, la transformación energética generará 42 millones de nuevos empleos en energías renovables en todo el mundo. De hecho, se espera que el sector energético alcance 100 millones de empleos para el mismo año. Asimismo, se espera que los indicadores de bienestar de la población en términos de salud y calidad ambiental mejoren considerablemente. Al respecto, el escenario TES arroja como resultado un incremento del 13,5% en el bienestar de la población para 2050 (IRENA, 2020a).

Este documento se relaciona con la Misión para la Transformación Energética de Colombia de

forma transversal con todos los focos desarrollados por el panel de expertos. Principalmente, abarca aspectos de análisis comunes en cuanto a la inclusión de fuentes de energía renovable en la matriz energética; los procesos de descarbonización de la matriz energética y la economía; la modernización del sistema eléctrico; el desarrollo de redes de distribución de energía eléctrica ágiles y eficientes; la implementación de soluciones DER e infraestructura de medición inteligente (AMI); el diseño de esquemas tarifarios dinámicos y nodales; y la promoción de la competitividad tanto del sector energético como de la economía del país.

## 2.7.5 Fomentando la transición energética efectiva 2020<sup>25</sup> (WEF)

Este estudio tiene la intención de promover la acción conjunta de la comunidad global en la gestión de cambio climático, específicamente mediante el monitoreo y seguimiento de la transición energética emprendida por diferentes países. En este se presentan los insumos para determinar hojas de ruta para la transición energética; de acuerdo con los resultados del Índice de Transición Energética (ETI, por sus siglas en inglés), que toma como base el Índice de Desempeño de Arquitectura Energética (EAPI, por sus siglas en inglés) (WEF, 2020).

Se considera que un proceso efectivo de transición es aquel que es ejecutado oportunamente con el fin de lograr un sistema energético flexible, más inclusivo, sostenible, asequible y seguro que pueda afrontar los retos energéticos del futuro con visión de largo plazo. Este debe tener la capacidad de generar valor para la sociedad y los negocios, sin comprometer el balance del triángulo energético (acceso y seguridad energética, sostenibilidad ambiental y desarrollo económico). Para esto, la transición energética debe reconocer y gestionar apropiadamente sus actores, con el objetivo de priorizar las necesidades y establecer planes de acción eficientes (WEF, 2020).

 **Tabla 2-29.** Subíndices considerados en la estimación del ETI para la medición del desempeño del sistema energético

Dimensión	Subíndice	Conclusiones
Acceso y seguridad a la energía	Electrificación	Los programas de acceso a la energía deben dar prioridad a soluciones que promuevan mayor diversidad en los servicios energéticos del sector residencial, acceso a servicios comunitarios viables energéticamente, distribución del consumo energético en los países, y calidad y confiabilidad del suministro.  La distribución de recursos energéticos renovables puede contribuir a disminuir la inequidad en el consumo energético per cápita y mejorar el sistema energético.
	Acceso a combustibles de cocina limpios	
	Importaciones netas de energía	
	Diversificación de la matriz de combustibles	
	Diversificación de la importación	
	Calidad de la oferta de electricidad	
Crecimiento y desarrollo económico	Precios de la electricidad residencial	Los países exportadores evidenciaron un peor desempeño que los importadores.  La disponibilidad de recursos para inversión en medidas de transición energética es un reflejo de las restricciones de mercado y los altos precios para acceder a la energía. Esto no solo ralentiza la transición, sino que puede promover el uso de combustibles no apropiados.
	Precios de venta de gas	
	Subsidios de energía	
	Externalidades	
	Exportaciones de combustible	
	Importaciones de combustible	
Sostenibilidad ambiental	PM2.5	Todavía se debe trabajar en afrontar los aspectos prioritarios, ambientales y sociales de los sistemas energéticos.  Es necesario desarrollar un marco regulatorio para las emisiones de CH <sub>4</sub> , teniendo en cuenta que existe una tendencia creciente al uso del gas en la transición energética.
	Intensidad de carbono de la energía	
	Emisiones CO <sub>2</sub> per cápita	
	Intensidad energética	

Fuente: WEF, 2020

Por otro lado, el segundo aspecto evaluado por el índice de transición energética es la preparación del país para realizar dicho proceso. Esta evaluación se hace mediante 6 aspectos: estructura del sistema energético, capital e inversión, compromiso político y regulaciones, participación del consumidor y capital humano, infraestructura e innovación, y gobernanza e instituciones. En el contexto global, se observó que la mayoría de países mejoraron en este aspecto mediante el mejoramiento del acceso a capital y del nivel de inversión, así como al incrementar sus compromisos políticos. No obstante, es importante verificar que entre los países que mostraron mejores resultados se pueda observar una aproximación integral sobre los diferentes aspectos considerados en esta dimensión, pues la transición energética requiere de una aproximación sistémica en su planeación e implementación (WEF, 2020).

En general, todos los países han avanzado en la transformación de sus sistemas energéticos, aunque no existe una tendencia o consistencia entre ellos o en el tiempo de implementación. Durante los últimos 6 años, Argentina, Bulgaria, República Checa, India, Irlanda, Italia, República Eslovaca, Sri Lanka y Ucrania han presentado consistencia en este proceso. Asimismo, algunos países que acumulan gran parte de la demanda de energía mundial —como India y China— han avanzado favorablemente en su proceso de transición energética; mientras que otros —Brasil, Canadá, Irán y Estados Unidos— presentan un comportamiento de estancamiento o de retroceso (WEF, 2020).

En esta ocasión, Colombia se ubicó en el puesto 25 a nivel mundial y 2 en Latinoamérica y El Caribe, después de Uruguay. Su calificación global es de 62,7%; obtuvo un 72% en el desempeño del sistema energético y un 54% en su preparación para la transición. De hecho, en este último aspecto, el sector energético colombiano se destaca como uno de los que tuvo como mayores mejoras entre el 2019 y el 2020.

Este documento se relaciona con la Misión para la Transformación Energética de Colombia de forma transversal con todos los focos desarrollados por el panel de expertos. Principalmente, abarca aspectos de análisis comunes en cuanto a la inclusión de fuentes de energía renovable en la matriz energética; el desarrollo de soluciones para promover el empoderamiento del usuario; los procesos de descarbonización de la matriz energética y la economía; la modernización del sistema eléctrico; el desarrollo de redes de transporte y de distribución de energía eléctrica ágiles y eficientes; la implementación de soluciones DER e infraestructura de medición inteligente (AMI); la automatización del sector eléctrico; el desarrollo del sector energético con altos niveles de confiabilidad para atender la demanda futura; el diseño de esquemas tarifarios dinámicos y nodales; la promoción de la competitividad, tanto del sector energético como de la economía del país; y el incremento de la cobertura y calidad de acceso al servicio eléctrico en el SIN y ZNI.





## 2.8 Otros documentos

### 2.8.1 Clean Energy Innovation: Part of Energy Technology Perspectives

La emergencia sanitaria por el COVID-19 desencadenó una crisis económica que puede afectar los esfuerzos de innovación en energía limpia, precisamente en el momento en el que se necesita un progreso más rápido. Como consecuencia, este informe cuantifica las necesidades de inversión e innovación tecnológica para un sector energético más limpio y resistente con

emisiones netas cero. Asimismo, se identifican atributos tecnológicos clave que pueden ayudar a acelerar los ciclos de innovación. Además, se resalta la importancia de que los gobiernos mantengan la financiación de la investigación y el desarrollo en los niveles planificados hasta el año 2025, considerando un aumento progresivo en áreas estratégicas (IEA, 2020b).

#### Estado global de la innovación en energías limpias

Para cumplir las metas que muchos países se han planteado sobre las emisiones netas cero, es necesario promover el desarrollo de energías limpias de forma rápida, de manera que se alineen las intenciones políticas (Acuerdo de París) y la evolución tecnológica requerida. Las tecnologías

disponibles actualmente son insuficientes para lograr las metas ambiciosas establecidas por las naciones y para garantizar, al mismo tiempo, la seguridad energética requerida por la sociedad. Por tanto, es apremiante avanzar en los procesos de innovación (IEA, 2020b).

#### Desafíos para alcanzar la carbono neutralidad (innovación energética)

La reducción de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> requerirá una amplia gama de tecnologías diferentes que funcionen en todos los sectores de la economía y de diversas combinaciones, de las cuales, algunas se encuentran en etapas primitivas de desarrollo y requieren de procesos robustos de innovación<sup>26</sup>. Se ha reconocido que para cumplir las metas planteadas es necesario avanzar en cuatro enfoques tecnológicos: 1. electrifica-

ción de sectores de uso final, como la calefacción y el transporte; 2. aplicación de la captura, utilización y almacenamiento de carbono; 3. uso de hidrógeno con bajo contenido de carbono; y 4. uso de bioenergía. Estos enfrentan retos de gran importancia, especialmente en cuanto a su comercialidad y acceso por parte de usuarios; por ejemplo, este es el caso de la energía solar fotovoltaica y el uso de baterías (IEA, 2020b).

---

26 Estos procesos se presentan en cuatro etapas: 1) **prototipo**: etapa preliminar con baja probabilidad de éxito y costos generalmente bajos. 2) **Demostración**: etapa en la que se muestra la efectividad de la tecnología, para reducir la percepción de riesgos financieros. 3) **Adopción temprana**: etapa en la que existe una brecha entre altos costos y el desempeño de la nueva tecnología en comparación con unas ya establecidas. Por esto, requiere de apoyo de política pública. La tecnología usualmente es utilizada por clientes que desean probarla o la necesitan para un propósito particular. 4) **Madurez**: el producto entra al mercado principal para alcanzar nuevos clientes y competir con otros actores ya presentes.

Para lograr las metas de reducción de emisiones, cerca del 35% de las reducciones acumuladas de emisiones de CO<sub>2</sub> dependen de tecnologías que actualmente se encuentran en la fase de prototipo o demostración, y otro 40% adicional se basa en tecnologías que aún no se

han comercializado en una escala de mercado masivo. Esto requiere esfuerzos urgentes para acelerar la innovación, pues las actuales tecnologías (2020) y las que están en fase de desarrollo serán insuficientes para alcanzar la neutralidad de carbono en 2050 (IEA, 2020b).

## Desarrollo de tecnologías y cadenas de valor del sector energético

En la cadena de valor de la electricidad baja en carbono, varias tecnologías han alcanzado la madurez. Sin embargo, otras tienen un largo camino por recorrer, como es el caso de la electrificación de la industria pesada y el transporte de larga distancia. En los sectores de uso final, algunas

tecnologías —como los vehículos eléctricos y las bombas de calor— están disponibles comercialmente, pero la innovación sigue siendo un tema importante (IEA, 2020b). Las tecnologías que se encuentran en etapa de adopción temprana para la generación de electricidad son:

⬇ **Tabla 2-30.** Tecnologías a lo largo de la cadena de valor de la electricidad baja en carbono que están en niveles de adopción temprana y prototipo

Etapa	Adopción temprana	Prototipo
Generación de electricidad	Paneles solares, energía térmica, energía solar, energía eólica, CCUS, energía mareomotriz y bombas de calor de gran escala	
Infraestructura eléctrica	Equipos de rápida carga, de respuesta a la demanda y de almacenamiento de batería	Transmisión de voltaje ultra alto, infraestructura de rápida frecuencia de respuestas y de carga inteligente
Transporte	Vehículos eléctricos de carga liviana y pesada	Aviación eléctrica
Industria		Electrificación de la industria de acero primario, la industria de químicos y la industria de cemento
Edificaciones	Bombas de calor y equipos de enfriamiento evaporativo	Enfriamiento en estado sólido
Combustibles	Hidrógeno	

Fuente: IEA, 2020b

## Captura, almacenamiento, transporte y uso de emisiones de CO<sub>2</sub>

La captura, almacenamiento, transporte y uso de emisiones de CO<sub>2</sub>, como una estrategia de descarbonización exitosa, depende de la disponibilidad comercial de tecnologías en cada etapa del proceso, así como del desarrollo y expansión de las redes de almacenamiento y de transporte de CO<sub>2</sub> a una escala considerable (IEA, 2020c). Sobre cada una, vale mencionar lo siguiente:

- **Captura:** este proceso se ha realizado efectivamente durante décadas en ciertos procesos industriales y de transformación de combustibles, como la producción de amoníaco y el procesamiento de gas natural. Recientemente, se ha explorado su aplicación a gran escala en otras actividades, desde la generación de energía y la transformación de combustibles hasta la producción de cemento, hierro y acero (IEA, 2020c).
- **Almacenamiento:** existe una experiencia relativamente limitada en el almacenamiento de emisiones de CO<sub>2</sub>. Hay cinco instalaciones a gran escala que almacenan actualmente más

de 7 Mt CO<sub>2</sub>/año en formaciones salinas, de las cuales, una ha estado en funcionamiento desde 1995 (proyecto Sleipner CCS). El almacenamiento en pozos de petróleo y gas se ha limitado a demostraciones piloto (IEA, 2020c).

- **Uso:** hoy en día, existen diferentes procesos industriales que usan el CO<sub>2</sub>; por ejemplo, en la producción de urea y la elaboración de bebidas carbonatadas, en las que el CO<sub>2</sub> se almacena temporalmente para finalmente ser liberado a la atmósfera. Actualmente, se están explorando algunas aplicaciones del CO<sub>2</sub> en el sector de la construcción (IEA, 2020c).
- **Emisiones negativas:** la captura y el almacenamiento de emisiones de CO<sub>2</sub> en biomasa, así como la captura directa de aire (DAC), tienen la capacidad de producir emisiones negativas, por lo tanto, tienen un importante potencial a largo plazo. Sin embargo, muy pocas tecnologías han llegado a los mercados a gran escala (IEA, 2020c).

 **Tabla 2-31.** Tecnologías de la cadena de valor de captura de carbono que están en niveles de adopción temprana y prototipo

Etapa	Adopción temprana	Prototipo
Captura en químicos	Absorción física en amonio y química de metanol	Adsorción física en amonio
Captura en acero y hierro	Absorción química de reducción, directa de hierro	Absorción química (encendido de hornos y enriquecimiento de gas de proceso) y adsorción física (reducción directa de hierro)
Captura en cemento		Oxicombustión, adsorción física y separación directa
Captura del aire		Sólido y líquido
Captura en producción de combustibles	Hidrógeno a partir de gas	Producción de bioetanol con lignocelulosa y obtención de hidrógeno de carbón
Generación de energía eléctrica	Absorción química en carbón	
Transporte de CO <sub>2</sub>	Ductos o tuberías	Transporte en puerto a mar abierto
Almacenamiento de CO <sub>2</sub>	Formaciones salinas	
Uso de CO <sub>2</sub>	Concreto	Hidrocarburos líquidos sintéticos

Fuente: IEA, 2020b

## Hidrogeno bajo en carbono

En la actualidad, esta tecnología no está completamente desarrollada a escala comercial, pues requiere de muchos avances para producir, almacenar, transportar y consumir hidrógeno bajo en carbono, que se encuentran en diferentes grados de madurez y con sus respectivos desafíos técnicos. En este momento, algunas de las aplicaciones disponibles comercialmente son el uso de hidrógeno electrolítico en procesos industria-

les pesados y el gas natural con CCUS (instalaciones en funcionamiento). Cabe mencionar que gran parte de la demanda potencial total de hidrógeno no se podrá determinar hasta que se desarrollen tecnologías para utilizarlo en el transporte pesado y la industria (hierro y acero); incluso, no se podrá determinar hasta que se demuestren combustibles derivados de hidrógeno con bajo contenido de carbono.

↓ **Tabla 2-32.** Tecnologías de la cadena de valor de hidrógeno que están en niveles de adopción temprana y prototipo

Etapa	Adopción temprana	Prototipo
Producción de hidrogeno bajo en carbono	Electrolisis y CC a partir de gas natural	CCUS a partir de gasificación en extracción de carbón y separación de metano
Infraestructura para hidrogeno	Tanques de amonio, estaciones de reabastecimiento y almacenamiento en cavernas salinas	Tanques para hidrogeno líquido y contenedor para hidrogeno líquido orgánico
Transformación de combustibles	CCUS en refinación de petróleo basado en hidrogeno	Hidrocarburos líquidos sintéticos
Uso de hidrogeno en la industria	Captura de carbono basado en metanol	Hidrógeno a partir de hierro reducido directo
Uso de hidrogeno en transporte	Vehículos de carga liviana	Motores de hidrogeno para vehículos y embarcaciones, y embarcaciones propulsadas por amonio
Uso de hidrogeno en edificaciones	Calderas de hidrogeno y celdas de combustibles	
Uso de hidrogeno en la generación de electricidad	Celdas de temperaturas de altas temperatura	Plantas de generación térmicas duales con carbón y amonio

Fuente: IEA, 2020b

## Financiamiento gubernamental para I+D

En el marco del Acuerdo de París (COP21), los gobiernos de las principales economías han aumentado las inversiones en investigación ener-

gética. A continuación se presentan algunos datos relevantes sobre el gasto en I+D:

↓ **Tabla 2-33.** Datos de gasto público y privado en I+D del sector eléctrico entre 2010 y 2019

Gasto público	Gasto privado
Sector energético global aumentó 3% (2019) China aumentó 10% (2019) Europa y EE.UU. aumentaron 7%	Inversión en tecnología energética aumentó 40% (2010-2019) Crecimiento global aumentó 3% (2019) Fuentes de energía renovables aumentaron 74% (2010-2019)

Fuente: IEA, 2020b

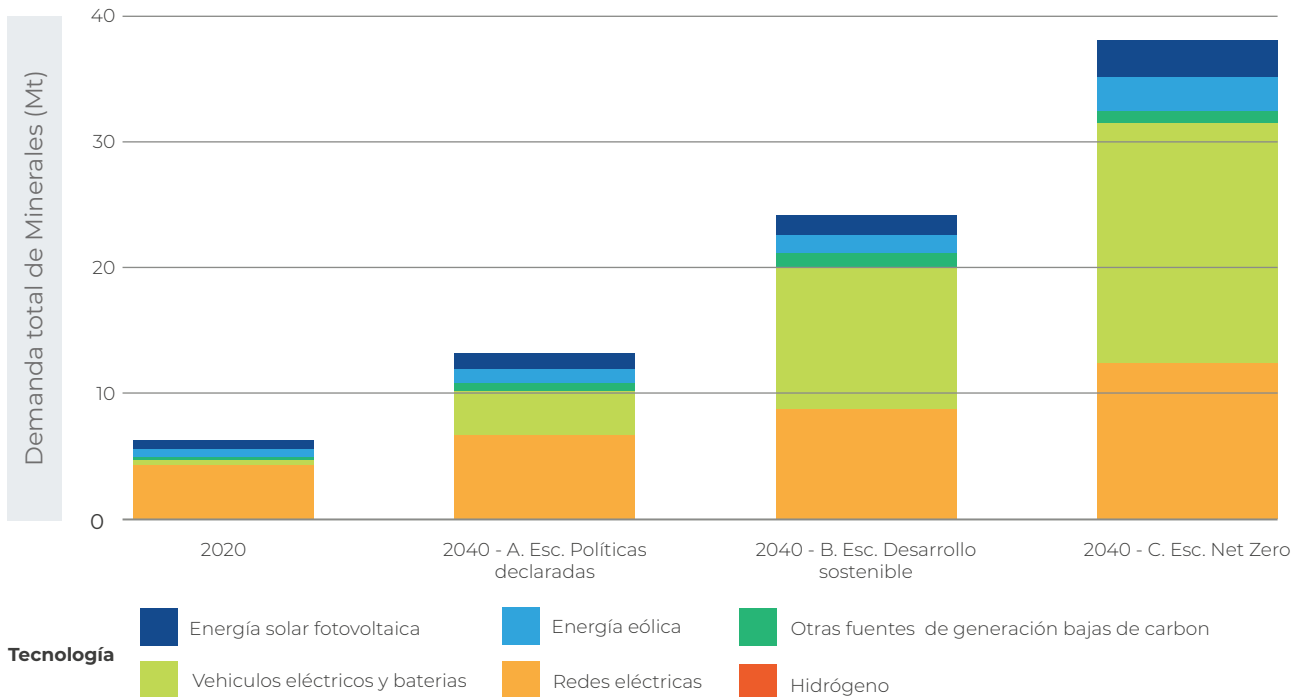
## 2.8.2 El rol de los minerales en la transición energética limpia (Agencia Internacional de Energía – IEA, por sus siglas en inglés)

Este informe desarrollado por la Agencia Internacional de Energía destaca cómo las diversas políticas asociadas con procesos de transición energética dominados por energías renovables, declaradas por diferentes gobiernos durante los últimos años, están conduciendo al mundo a incrementar la demanda de minerales para el año 2040, en relación con los niveles demandados para el año 2020.

Específicamente, con el pronunciamiento de objetivos asociados a emisiones *net zero* para el año 2050 en más de 70 países, se estima que la demanda de minerales a nivel mundial podría multiplicarse por seis para el año 2040; este incremento estaría liderado por la electrificación de sistemas de transporte (vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía – baterías) y la expansión de redes eléctricas. Asimismo, cabe resaltar un aumento en la deman-

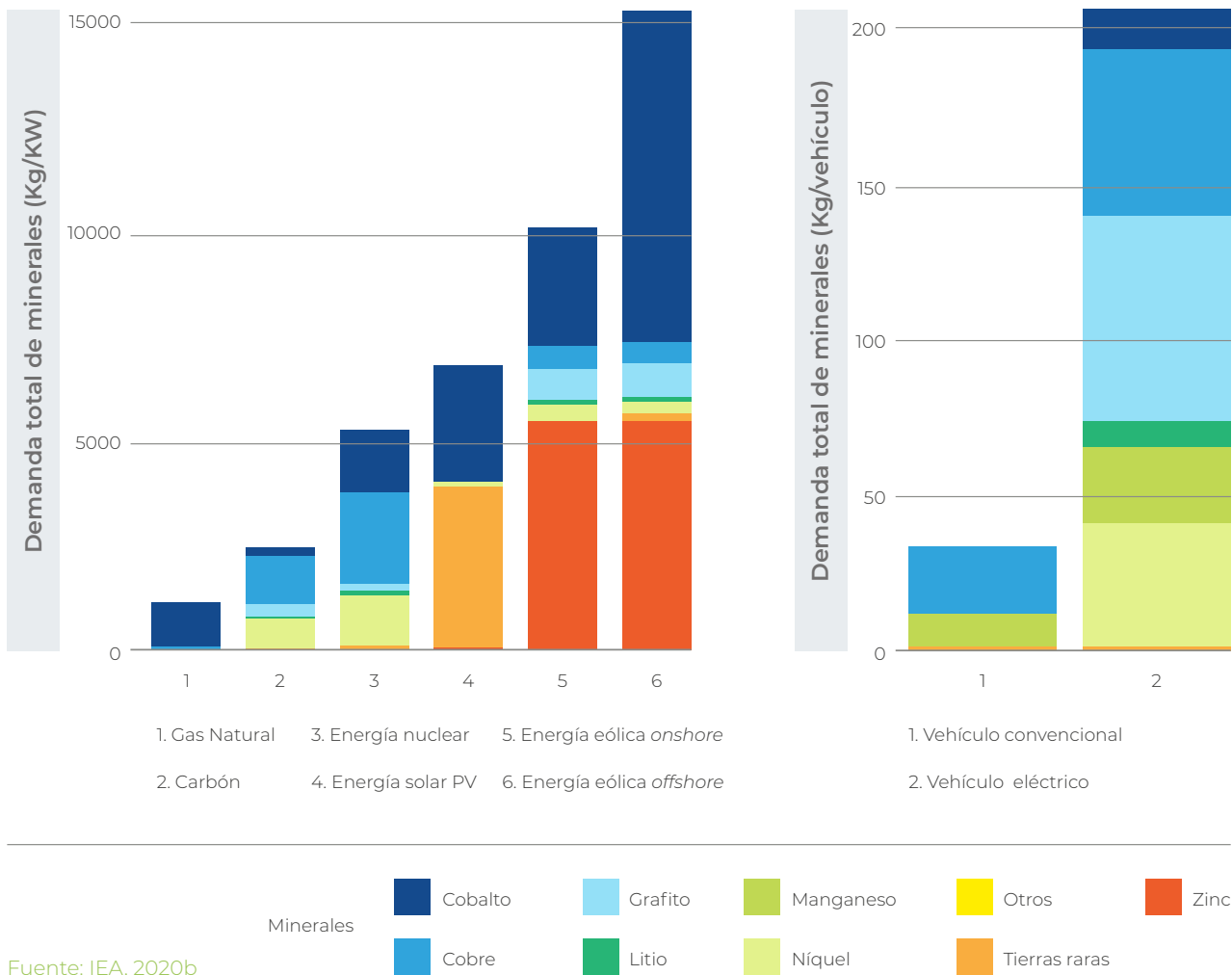
da de minerales críticos para la generación de energía eléctrica a través de FNCER, que puede llegar a ser de hasta tres veces los niveles demandados en el año 2020 (6,2 Mt para el año 2040, en el escenario *net zero* 2050). Por último, cabe señalar que la energía hidroeléctrica, la biomasa y la energía nuclear podrían alcanzar una demanda de minerales críticos de aproximadamente 1,3 Mt para mediados de siglo (0,3 Mt para el año 2020), dadas sus modestas adiciones de capacidad a nivel mundial (Figura 2-10). Por ejemplo, sin nuevas rutas de producción, la construcción de una planta eólica requerirá 9 veces más recursos minerales que la de una planta convencional de energía (en este caso, una central de gas), mientras que la construcción de un vehículo eléctrico demandará aproximadamente 6 veces más recursos minerales que la de un automóvil con motor de combustión interna (Figura 2-11).

 **Figura 2-10.** Demanda total de minerales año 2020-2040



Fuente: IEA, 2020b

**Figura 2-11.** Minerales empleados en tecnologías de energías limpias



Fuente: IEA, 2020b

## Disponibilidad y confiabilidad del suministro de minerales críticos en la transición energética a nivel mundial

El rápido crecimiento en la demanda de minerales ha planteado múltiples interrogantes asociados a la disponibilidad y la confiabilidad del suministro. Esto se debe a las posibles tensiones que a largo plazo se puedan presentar entre la oferta y la demanda de minerales críticos, que traerían consigo no solo un retraso en los procesos de transición energética, sino también una volatilidad de precios. Más aun, dicha volatilidad aumentaría significativamente los costos de las energías renovables, los sistemas de almacenamiento de energía y la electrificación del transporte (p. ej. duplicar los precios de minerales tales como litio o níquel induciría un aumento del 6% en el costo final de las baterías).

En un contexto global, es fundamental garantizar el suministro de metales críticos, tales como aluminio, cobalto, cobre, cromo, grafito, hierro, indio, litio, manganeso, molibdeno, níquel, plata, plomo, titanio, vanadio y zinc, entre algunas tierras extrañas; minerales que en su gran mayoría están siendo extraídos hoy en día por la República Democrática del Congo y la República Popular de China. Es importante mencionar que si bien se prevé un exceso en la oferta de minerales como litio y cobalto en el corto plazo, metales como el níquel “grado de batería” y tierras raras como neodimio y disprosio (elementos clave en la construcción de aerogeneradores) pueden presentar un déficit en el mediano plazo; esta es una posibilidad que el mundo no puede permitirse.

## Importancia de minerales como el cobre y níquel en los procesos de transición energética a nivel mundial: metales con un alto potencial de ocurrencia en Colombia

En un escenario que aborda los objetivos del Acuerdo de París (limitar el incremento de la temperatura promedio del planeta tierra en 1,5 °C, de acuerdo con los niveles registrados en la era preindustrial), la participación de tecnologías limpias o bajas en carbono en la demanda total de minerales aumenta significativamente durante las próximas dos décadas, alcanzando un 40% para metales como el cobre y un 60% para metales como el níquel (Figura 2-12) (IEA, 2020b).

Con una demanda que asciende a más de 6000 Mt —si bien no siempre se menciona como un

mineral crítico—, la presencia del níquel en la construcción de baterías<sup>27</sup> para el almacenamiento de energía está ayudando a reducir las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) en diversos sectores de la economía, permitiendo que las soluciones de energía limpia constituyan una parte central del esfuerzo mundial por afrontar el calentamiento global (Nickel Institute, 2018). Actualmente, Indonesia y Filipinas representan el 45% de la producción mundial de níquel (IEA, 2020b). Colombia, por su parte, ocupó el décimo puesto en la producción de níquel a nivel mundial y el cuarto puesto a nivel Latinoamérica para el año 2019.

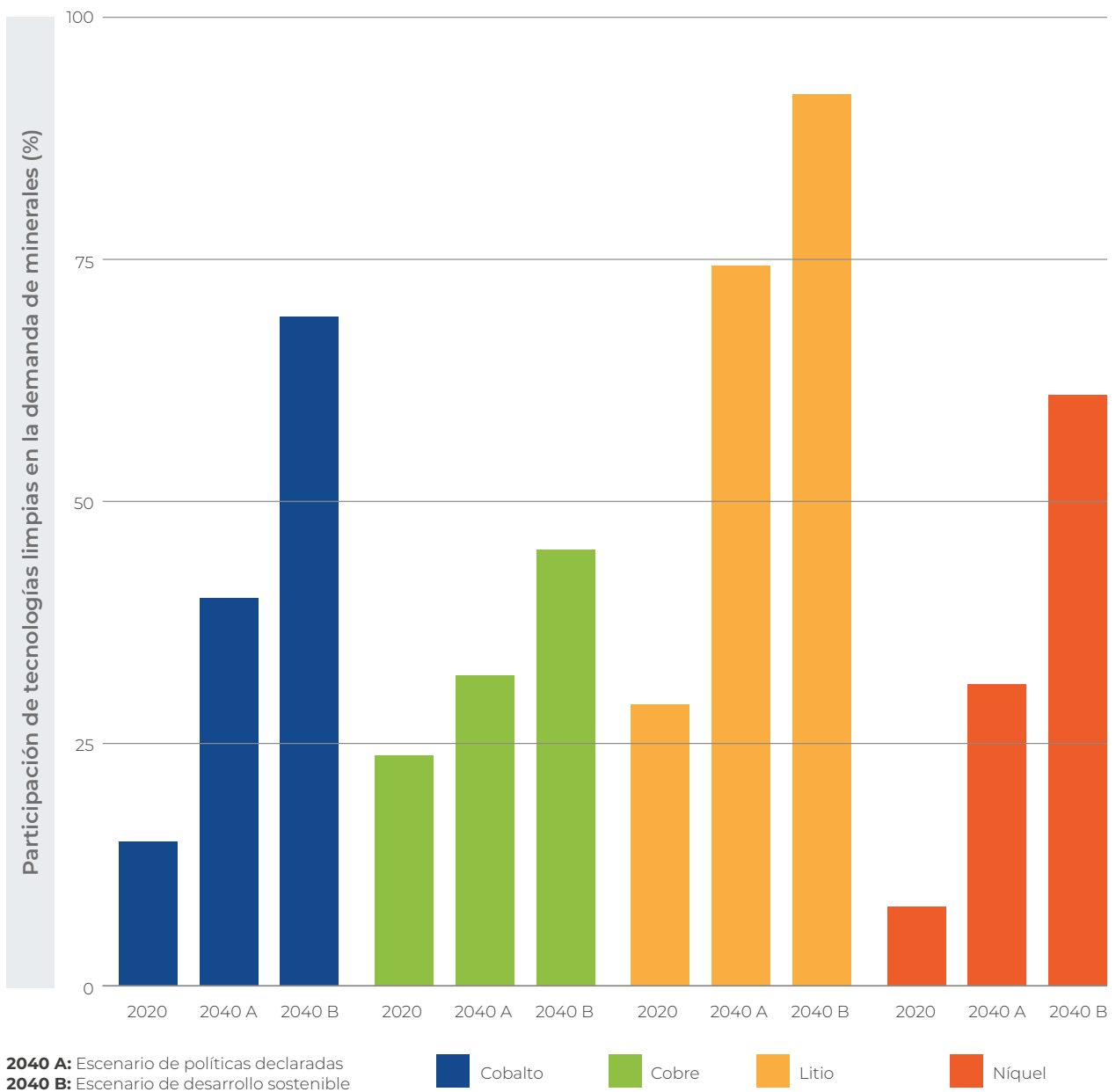


27 Para el año 2018, con una composición química NMC 1:1:1 (es decir 33.3 % Ni, 33.3 % Mg y 33.3 %), la producción masiva de baterías de litio empleó aproximadamente un 3 % del suministro mundial de níquel. Dados los ajustes que la industria automotriz intenta realizar a la composición química NMC —pasando a un cátodo 8:1:1 (80 % Ni, 10% Mg y 10 % Co)— se prevé un incremento acelerado en la demanda de níquel hasta el 2050 (Nickel Institute, 2018).

Al igual que el níquel, el cobre representa para Colombia un componente clave en el desarrollo económico y energético del país durante los próximos 30 años. Estimaciones realizadas por el Banco Mundial sugieren un consumo cercano a los 30 millones de toneladas para el año 2050; a causa de la implementación masiva de fuentes no convencionales de energía renovable, la expansión de redes eléctricas y la electrificación del transporte. Sobre este último aspecto, cabe señalar que paí-

ses como Noruega, Reino Unido, Alemania, Países Bajos, China, Japón, Canadá, Francia y España, entre otros, han elaborado iniciativas, programas o legislaciones *ad hoc* que tienen como finalidad terminar con el uso de vehículos energizados por combustibles fósiles e incentivar la compra de vehículos eléctricos (Climate-Smart Mining Facility, 2020). Actualmente, la mayor producción de cobre se concentra principalmente en Chile y Perú (40% de la producción mundial).

**Figura 2-12.** Participación de tecnologías limpias o bajas en carbono en la demanda total de minerales



Fuente: IEA, 2020b



## 2.8.3 Minerales para la acción climática: la intensidad minera que requiere la transición energética limpia (Banco Mundial – WBG, por sus siglas en inglés)

Un crecimiento en la demanda de minerales críticos, siempre y cuando sean explotados de manera responsable, es sinónimo de desarrollo socioeconómico para la región y su población circundante (Climate-Smart Mining Facility, 2020). No obstante, son muchos los ejemplos de agentes que, por una gestión deficiente, han transformaron el concepto de minería en un conjunto de consecuencias negativas, que incluyen: emisiones significativas de gases efecto invernadero (GEI); impactos ambientales adversos, de los cuales se destaca la pérdida de biodiversidad, el cambio en el uso de suelo, la contaminación de corrientes hídricas, la contaminación atmosférica y la generación de residuos; e impactos sociales derivados de la corrupción, de los cuales cabe mencionar el uso inadecuado de recursos públicos, la explotación laboral y la exclusión de género, entre otros.

En este sentido —y con el objetivo de abordar la creciente demanda global de minerales y materiales de construcción, sin que ello represente un riesgo para el medio ambiente y su entorno—, el Banco Mundial lanzó su iniciativa “Cli-

mate Smart Mining”. Su finalidad no solo es garantizar que los minerales críticos de la transición energética limpia sean explotados y suministrados de manera sostenible y responsable (con la menor huella de carbono posible), sino también que los países con grandes reservas reciban retribuciones producto de este cambio.

En términos generales, la iniciativa “Climate Smart Mining” busca la participación activa de: i) gobierno, ii) formuladores de política pública, iii) líderes climáticos, iv) líderes energéticos, v) sectores interesados y vi) organizaciones de la sociedad civil en las distintas actividades de la industria minera. Esto tiene el objetivo de abordar nuevas oportunidades para reducir aun más las emisiones de GEI propiciadas en las fases de exploración y explotación (inclusión de energías renovables en el sector, nuevas formas de extracción basadas en innovación y sostenibilidad, y eficiencia energética en toda la cadena de valor) e impulsar la adaptación al cambio climático del sector minero en general (empleando soluciones basadas en la naturaleza y “Forest-Smart Mining”, con el fin de reducir los impactos de la actividad).



**Figura 2-13.** Pilares de la iniciativa “Climate Smart Mining”



Fuente: The World Bank, 2020

## 2.8.4 Carbono cero a 2050: hoja de ruta global para el sector energía

Considerando que en la última década ha existido un repunte en las emisiones del sector energético, se requiere una transformación sin precedentes a nivel mundial en la manera en que se produce, se transporta y se usa la energía. En este informe se presenta una hoja de ruta que permitirá no solo alcanzar sistemas energéticos *net zero* a 2050, sino también establecer sistemas sólidos que respondan a necesidades relacionadas con un suministro confiable, asequible y de eficiencia energética (IEA, 2021).

Para lograr este objetivo, el sector debe desplegar de manera pronta y acelerada todas las tecnologías de energía limpia disponibles en el mercado, lo que hará que la inversión anual para el 2030 en este sector se triplique, llegando a 4 billones USD (IEA, 2021). En este sentido, de este año en adelante se deben impulsar tecnologías que se encuentren en fases de prototipo y demostración. Igualmente, para el 2035 se prevé una reducción en el consumo de petróleo, gas y carbón, que implicará la necesidad de habilitar mecanismos de transición justa para centrales que funcionen con estos combustibles. Para el 2040, se espera que la generación eléctrica alcance emisiones netas cero, donde la energía hidroeléctrica y nuclear garanticen un suministro energético confiable. Posteriormente, se espera que para el 2045 una generalización de tecnologías energéticas; la gran mayoría del stock de vehículos funcionarán a través de electricidad y la aviación dependerá en gran medida de biocombustibles o combustibles sintéticos. Además, aquellas industrias que aún usen combustibles fósiles emplearan tecnologías de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) (IEA, 2021).

La construcción del escenario no contempla la exploración y explotación de nuevos campos petrolíferos ni la proyección de nuevas áreas mineras, esto es inicialmente posible en la medida en que los gobiernos nacionales incentiven políticas públicas asociadas a energías renovables,

eficiencia energética, reformas de mercado y al desincentivo de la inversión en combustibles fósiles. Para esto, el escenario también contempla la creación de un impuesto al carbono para actividades de generación de energía e industrias en todas las regiones del mundo (IEA, 2021).

Los principios de la construcción del escenario Net-Zero Emissions (NZE) son los siguientes:

- La adopción de tecnologías y/o opciones para la reducción de emisiones de GEI está determinada por costos, madurez tecnológica, preferencias políticas y condiciones de mercado.
- La cooperación internacional es necesaria para alcanzar emisiones netas cero en todo el mundo.
- La transición energética ordenada se dará en todo el sector, priorizando el abastecimiento seguro y confiable tanto de los combustibles como de la electricidad.

Respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub>, el subsector de energía eléctrica presenta las mayores reducciones de emisiones en el corto y largo plazo; puntualmente, las emisiones de la generación de energía eléctrica se reducen en un 60% para 2030 debido a la disminución de centrales térmicas de carbón, la implementación de medidas de eficiencia energética y el despliegue de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono. Aunque las energías renovables desplazarán el uso de combustibles fósiles en el escenario NZE 2050, no significa que estas desaparezcan; por el contrario, se estima que se pueda lograr una matriz energética totalmente diversificada, donde los aportes de estas fuentes sean cercanos al 20%.

Por otro lado, en el plan se identifican 7 pilares para lograr la descarbonización a 2050, que son resumidos a continuación (IEA, 2021):

## Eficiencia energética

La importancia de las medidas relacionadas con la eficiencia energética es mayor en el periodo 2020-2030, ya que en este se espera una reducción total de la demanda de energía de los sectores de uso final. Para el sector transporte se espera, por ejemplo, la aparición de políticas públicas que prohíban la venta de vehículos de combustión interna a partir del 2035. Igualmente, se espera que en todas las regiones del mundo se implementen códigos de construcción de edificaciones *net zero* (IEA, 2021).

## Cambios en el comportamiento de la ciudadanía

Para la reducción de las emisiones, se necesita participación activa y compromiso de la ciudadanía; se estima que una reducción del 8% de los GEI está relacionada únicamente con cambios su comportamiento. Entre el tipo de medidas están la reducción del uso excesivo de energía en edificaciones y transporte y la implementación de un mayor uso de bicicletas y viajes compartidos (IEA, 2021).

## Electrificación

Se prevé que el sector eléctrico sea el principal portador de energía, con una participación del 49%. Aunque se estima que la demanda energética aumente, el uso directo de energía eléctrica contribuirá en una reducción del 20% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>. Por ejemplo, se estima que la participación de la energía eléctrica en el sector transporte pasará del 2% en el 2020 al 45% en 2050 (IEA, 2021).

## Energías renovables

Se espera que el aporte en la generación eléctrica de las energías renovables pase del 29% en 2020, al 61% en 2030 y al 88% en 2050. En concordancia, se prevé que la energía eólica y la solar fotovoltaica se conviertan en las fuentes líderes de suministro de electricidad antes el 2030 (IEA, 2021).



## Hidrógeno

Se espera que la demanda de hidrógeno aumente de 90Mt en 2020 a más de 200 Mt en 2030, llegando a 500Mt en 2050. Se estima que cerca el 55% de la producción mundial del hidrogeno bajo en carbono procederá de procesos electro-líticos, y que el restante provendrá de recursos fósiles, en conjunto con tecnologías de uso y almacenamiento de carbono (CCUS) (IEA, 2021).

## Bioenergía

Se espera que el uso de biomasa sólida para la cocción de alimentos disminuya hasta 0 para el 2030, y que la bioenergía moderna incremente su producción de 40EJ en 2020 a más de 100 EJ para 2050. Igualmente, que la electricidad generada por bioenergía ascienda a 3300 TWh para el año 2050, lo cual, junto con la implementación de BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage), reducirá las emisiones aproximadamente en 1300 MtCO<sub>2</sub> a 2050. En relación con los biocombustibles líquidos, el sector transporte impulsará la demanda de cerca de 1,6 MBOE diario a 6 MBOE en 2030 (IEA, 2021).

## Captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS)

Por la implementación de tecnologías CCUS, se estima una reducción en las emisiones de 1600 MtCO<sub>2</sub> para el año 2030, y cerca de 7600 MtCO<sub>2</sub> al 2050. Se espera que el 95% esté almacenado en formaciones geológicas, mientras que el 5% sea usado en la producción de combustibles sintéticos. Para 2050, se prevé una generación de 220 GW de electricidad generada por centrales de carbón y 170 GW generadas por gas natural, las cuales deben estar relacionadas con tecnologías CCUS.

Cerca del 20% del total de emisiones capturadas provienen del sector eléctrico. Este tipo de tecnologías es clave para la meta de emisiones netas cero, en la medida que abordan las emisiones de los activos existentes. Por este motivo, esta práctica se consolida como la opción más factible en sectores donde la reducción de emisiones es todo un desafío, ya que proporciona una vía rentable para la producción de hidrogeno bajo en carbono y podría contribuir a eliminar el dióxido de carbono de la atmosfera (IEA, 2021).





3

**CONCLUSIONES**  
Y RELACIÓN CON EL  
PIGCCme 2050

En los próximos años el sector minero energético tiene retos importantes para lograr la carbono neutralidad. Para empezar, la implementación de medidas de mitigación con un potencial de reducción de emisiones GEI que ronda entre los 19,85 MtCO<sub>2</sub>eq y 27,01 MtCO<sub>2</sub>eq, un valor equivalente a reducir el 50 % de los automóviles, camionetas, buses, camiones y volquetas registrados en Colombia. Una meta de compensaciones ambientales con la que se espera sembrar en promedio 634.251 hectáreas de bosque natural, equivalente a detener 3,6 veces la deforestación en Colombia. Además, la rápida y exitosa incorporación de nuevas tecnologías, tales como el uso gradual de la Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono (CCUS por sus siglas en inglés), en las centrales térmicas y la participación de hidrógeno y energía térmica en la matriz energética del país. Para lograr lo propuesto, es necesaria una inversión cercana a los 42.224 millones de dólares, lo que se traduce en una porción importante del VPN del PIB sectorial en el periodo 2020-2050, alrededor del 4,32 %. Pese a ello, si se compara con el costo ahorrado por el no pago de impuestos y el costo social de carbono, la relación costo-beneficio siempre es positiva.

La carbono neutralidad neta es posible si se logra una combinación efectiva de ajustes en la manera en que se producen los energéticos, se continúan los esfuerzos de diversificación de la matriz y se asumen compromisos más fuertes en temas como eficiencia energética y gestión de la demanda.

Lo que se ha trabajado en los últimos años -el Plan Energético Nacional, la Misión de Transformación, el Plan Integral de Gestión de Cambio Climático del sector minero-energético (PIGCC<sub>me</sub>) y la reciente Hoja de Ruta para el Hidrógeno, entre otros- son señales inequívocas del compromiso del sector por avanzar hacia una matriz diversificada, más resiliente, moderna, competitiva y con menor impacto en emisiones. Sin embargo, esto no implica que para

2050 por sí mismos estos esfuerzos lleven a la carbono neutralidad.

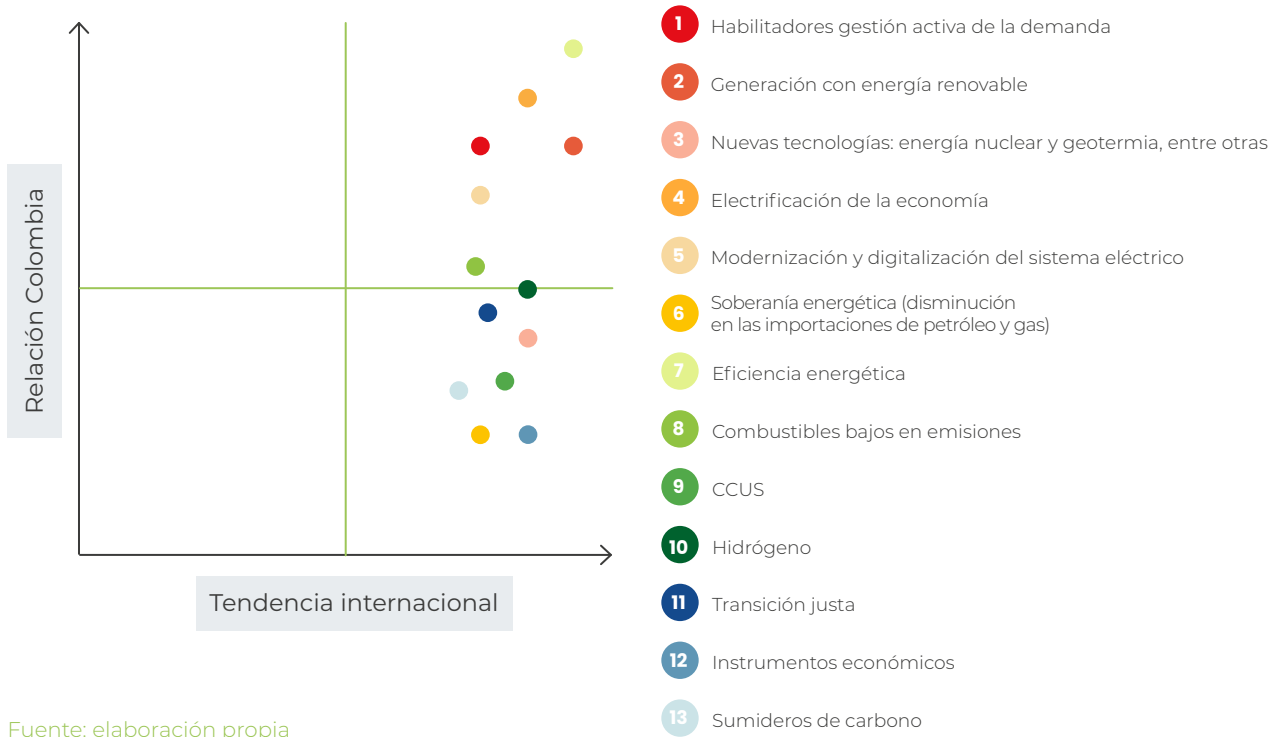
Precisamente en la capacidad que el sector tenga en identificar sus compensaciones como proyectos de largo plazo, capaces de ofrecer retornos económicos y ambientales, es donde se encuentra uno de los mayores retos y también uno de los grandes beneficios.

El de minas y energía es un sector que tiene un valor intrínseco no solo para la generación de valor a la economía, sino para las regiones y los entornos en los cuales ejerce presencia. En consecuencia, si la discusión sobre carbono neutralidad ha de avanzar, debe también apuntar a entender a las empresas no solo como generadores de ingresos, sino también como catalizadores de cambio en las regiones donde operan. Pueden hacerlo ofreciendo garantías e incentivos para que los proyectos que hoy operan como compensaciones mañana sirvan como soluciones basadas en la naturaleza que permitan reducir el riesgo de los entornos.

Adicionalmente, entender el cambio climático como un factor exógeno que cada vez va a impactar más la demanda y la calidad de la oferta, implica mayores esfuerzos en la generación de datos de mayor calidad, y en la incorporación de más variables climáticas en la planeación de todos los actores de la cadena.

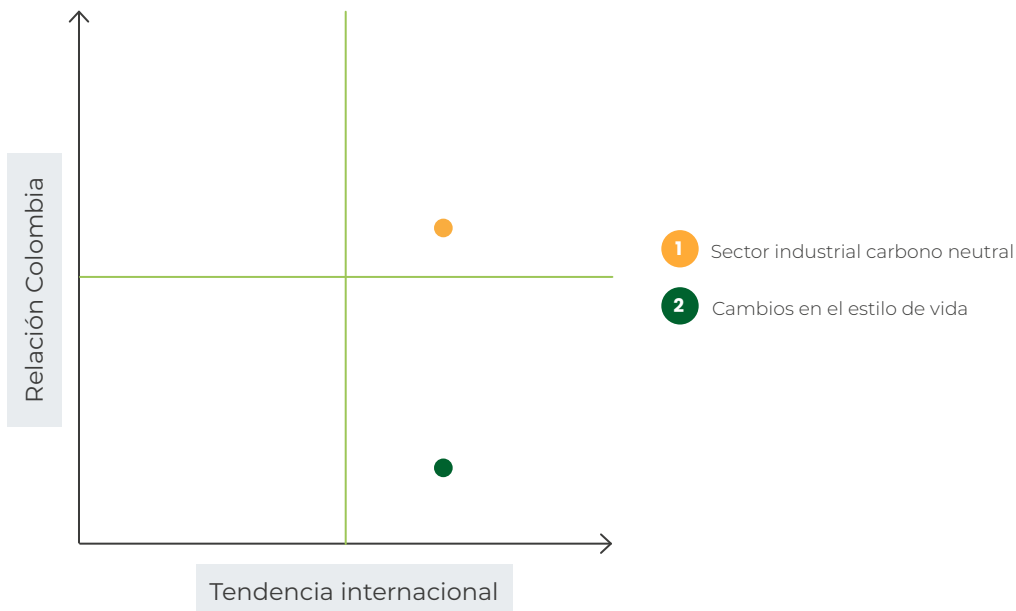
En conclusión, alcanzar la carbono neutralidad requiere la habilitación y desarrollo de diversas opciones que le permitan al país aprovechar de una manera cada vez más eficiente y limpia los recursos minero energéticos con los que cuenta. Todo lo anterior debe ser soportado por una aceleración y mayor inversión en innovación, investigación y desarrollo (I+D+i), así como por una apropiación cada vez mayor de la política de cambio climático de las empresas y grupos sociales que tienen injerencia sobre el sector.

**Figura 3-1.** Relación de acciones identificadas desde la oferta<sup>28</sup>



Fuente: elaboración propia

**Figura 3-2.** Relación de acciones identificadas desde la demanda<sup>29</sup>



Fuente: elaboración propia

28 La oferta total de energía es la cantidad de energía primaria y secundaria disponible para satisfacer las necesidades energéticas de un país, tanto en los procesos de transformación como en el consumo final (OLADE, 2004).

29 La demanda es toda la energía que se entrega a los sectores de consumo, tanto para usos energéticos como no energéticos (OLADE, 2004).



Durante el proceso de análisis de datos, se buscó diferenciar las medidas que —en términos de ejecución— correspondían a la oferta y a la demanda, de modo que se contara con un criterio de análisis adicional. El análisis muestra que el peso de la implementación de las estrategias de carbono neutralidad está en la provisión de energéticos limpios y en la generación de políticas para su fomento. Sin embargo, en la mayoría de los casos se ha prestado muy poca o nula atención a los sectores de consumo final, como motivadores de cambios en los patrones de consumo. Esta es un área que se debe explorar, ya que no solo la sociedad civil sino el mismo sector privado pueden demandar energéticos carbono neutrales de acuerdo a sus necesidades propias, buscando acelerar la implementación de políticas de transición energética y carbono neutralidad.

Es importante señalar el rol de la soberanía energética en los países más dependientes de energéticos importados. Bajo esta premisa, cabe preguntarse si en un escenario de incertidumbre sobre la producción de hidrocarburos, vale la pena —bajo criterios de seguridad nacional— promover el uso de alternativos a partir del hidrógeno o la energía nuclear.

Finalmente, si bien no ocurre en todos los casos estudiados, es muy importante resaltar que la implementación de políticas de carbono neutralidad no es únicamente una cuestión técnica de identificación e implementación de acciones. Esta corresponde también a un ejercicio de apropiación sociocultural que arranca con un mandato ciudadano, el cual hace que este tipo de políticas, más que de gobierno, sean de estado y, en consecuencia, trasciendan en el tiempo. Los casos de Costa Rica y Finlandia son representativos de esto, ya que la construcción de la estrategia de carbono neutralidad pasó por un proceso de validación social, que se convirtió posteriormente (por medio del voto) en un mandato ciudadano hacia su implementación. En el caso de Colombia, y más concretamente en el sector minero energético, se deben impulsar acciones que permitan a la sociedad la apropiación y participación en la implementación de la estrategia climática.





4

## BIBLIOGRAFÍA

- Banco Mundial. (2019). *Datos de libre acceso del Banco Mundial*. <https://datos.bancomundial.org/>
- Barrera, F. (coord.), Escobar, A., Maiguashca, M., & Rudnick, H. (2020). Foco 5: Revisión del marco institucional. En Misión de transformación energética y modernización de la industria eléctrica: hoja de ruta para la energía del futuro. Ministerio de Minas y Energía. <https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24202647/Foco+5+-+Informe+Final.pdf>
- Batle, C., Rodilla, P., & Barroso, L. A. (2020). Foco 3: Hoja de ruta regulatoria para un desarrollo más eficiente de los recursos distribuidos. En Misión para la Transformación y Modernización del Sector Eléctrico en Colombia. Ministerio de Minas y Energía. <https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24202647/Foco3+-+Fase+2+Informe+Final.pdf>
- Bicentenario, G. d. (2020). Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050. Obtenido de: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Plan%20Nacional%20de%20Descarbonizaci%C3%B3n%20-%20Espa%C3%B1ol.pdf>
- Chahín, C., Ferreira, A., Madero, D., & Vázquez, M. (2020). Consultoría en apoyo a la misión de transformación en los temas de abastecimiento, comercialización, transporte, almacenamiento, regasificación, demanda, aspectos institucionales y regulación de gas natural. Banco Interamericano de Desarrollo, World Bank. <https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24202647/Foco+2+-+Informe+Final.pdf>
- Climate-Smart Mining Facility. (2020). Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank. <http://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Clean-Energy-Transition.pdf>
- Corredor, P., Helman, U., Jara, D., & Wolak, F. (2020). Foco 1: Competencia, participación y estructura del mercado eléctrico. En Misión de transformación energética y modernización de la industria eléctrica: hoja de ruta para la energía del futuro. Ministerio de Minas y Energía. <https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24202647/Foco+1+-+Espa%C3%B1ol+Informe+Final.pdf>
- Institute for Climate Economics. (2016). COP22 in Marrakech: a push for accelerated action by 2018. Climate Brief N° 43. Institute for Climate Economics.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2020). Boletín Técnico: Exportaciones (EXPO) Octubre 2020. [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/exportaciones/bol\\_exp\\_oct20.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/exportaciones/bol_exp_oct20.pdf)
- Environment and Climate Change Canada. (2020). A healthy Environment and a healthy economy. *Government of Canada*. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/news/2020/12/a-healthy-environment-and-a-healthy-economy.html>
- European Commission. (2019). *Clean energy for all Europeans*. Publications Office of the European Union. [https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b4e46873-7528-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-en?WT.mc\\_id=Searchresult&WT.ria\\_c=null&WT.ria\\_f=3608&WT.ria\\_ev=search](https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b4e46873-7528-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-en?WT.mc_id=Searchresult&WT.ria_c=null&WT.ria_f=3608&WT.ria_ev=search)
- Gil, L. & Bernardo, J. (2020). *An approach to energy and climate issues aiming at carbon neutrality*. Directorate General of Energy and Geology.
- Gobierno de Colombia. (2020). Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC). <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Colombia%20First/NDC%20actualizada%20de%20Colombia.pdf>
- International Energy Agency [IEA]. (2018). *Data and statistics*. <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=EU28&fuel=Energy%20consumption&indicator=TFCbySource>
- International Energy Agency [IEA]. (2 de diciembre de 2019). Energy Transitions indicators. IEA. <https://www.iea.org/articles/energy-transitions-indicators>
- International Energy Agency [IEA]. (2020a). *Clean energy transitions. Global leadership to accelerate*

- the shift to clean energy*. IEA. <https://www.iea.org/topics/clean-energy-transitions>
- International Energy Agency [IEA]. (2020b). *Clean Energy Innovation*. <https://www.iea.org/reports/clean-energy-innovation>
- International Energy Agency [IEA]. (2020c). *CCUS in Clean Energy Transitions*. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>
- International Energy Agency [IEA]. (2021). *Net Zero by 2050: a Roadmap for the Global Energy Sector*. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- International Renewable Energy Agency [IRENA]. (2020a). *Global Renewables Outlook: Energy Transformation 2050*. <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>
- International Renewable Energy Agency [IRENA]. (2020b). *Energy transition*. <https://www.irena.org/energytransition>
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza [IUCN]. (2020). *Orientación para usar el Estándar Global de la UICN para soluciones basadas en la naturaleza*. IUCN.
- Larson, E., Greig, C., Jenkins, J., Mayfield, E., Pascale, A., Zhang, C., Drossman, J., Williams, R., Pacala, S., Socolow, R., Baik, E. J., Birdsey, R., Duke, R., Jones, R., Haley, B., Leslie, E., Paustian, K. & Swan, A. (2020). *Net-Zero America: Potential pathways, infrastructure, and impactacts (Interim Report)*. Princeton University. [https://lpdd.org/wp-content/uploads/2020/12/Princeton\\_NZA\\_Interim\\_Report\\_15\\_Dec\\_2020\\_FINAL.pdf](https://lpdd.org/wp-content/uploads/2020/12/Princeton_NZA_Interim_Report_15_Dec_2020_FINAL.pdf)
- Matthews, J.(2018). *Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza*. OMM, PNUMA.
- Ministerio de Ambiente y Transición Energética. (2019). *Roadmap for carbon neutrality 2050 (RNC2050). Long-term strategy for carbon neutrality of the portuguese economy by 2050*. Ministerio de Ambiente y Transición Energética (República Portuguesa), Environment Portugal, Portuguese Environment Agency.
- Ministerio de Minas y Energía [MinEnergía]. (2019). *Plan Integral de Cambio Climático / Sector Minero Energético*. <https://www.minenergia.gov.co/en/plan-integral-cambio-climatico>
- Ministerio de Minas y Energía [MinEnergía]. (2020a). *ABC de las propuestas de la Misión de la Transformación Energética*. <https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24169616/ABC+Mision%C-C%81n+Transformacio%CC%81n+Energie%CC%81tica.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía [MinEnergía]. (2020b). *Informe de resultados Enero 2019 - Abril 2020*. <https://pigccme.minenergia.gov.co/public/web/>
- Ministerio de Minas y Energía [MinEnergía]. (2020c). *Lineamientos de Política para la Minería de Carbón en Colombia*. Dirección Minería Empresarial.
- Nickel Institute. (2018). *La transición energética: el níquel ayuda a combatir el cambio climático*. *Revista Nickel*, 33(1), 1–16.
- Organización Latinoamericana de Energía [OLADE]. (2004). *SIEN: GUÍA M-1 Metodología para la elaboración de los balances de energía*. OLADE, Comisión Europea.
- Ortiz Jara, R. P., Pérez-Arriaga, J. I., Dueñas, P., González, A., Eslava, M. & Révolo, M. J. (2020). *Foco No. 4: Cierre de brechas, mejora de la calidad y diseño y formulación eficiente de subsidios*. En Misión de transformación energética y modernización de la industria eléctrica: hoja de ruta para la energía del futuro. <https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24202647/Foco+4+-+Informe+Final.pdf>
- Oxford University Press. (13 de Noviembre de 2006). *Carbon Neutral: Oxford Word of the Year*. *OUP Blog*. [https://blog.oup.com/2006/11/carbon\\_neutral/](https://blog.oup.com/2006/11/carbon_neutral/)

- Romero-Grass, A., Mach, T., Guzmán, S., Velásquez, M. A. & Zambrano, A. (2020). Foco 3, fase I: Descentralización y Digitalización de la Industria y la Gestión Eficiente de la Demanda. En Misión de transformación energética y modernización de la industria eléctrica: hoja de ruta para la energía del futuro. <https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24202647/Foco+3+-+Fase+1+Informe+Final.pdf>
- The Government of Japan. (2019). The Long-term Strategy under the Paris Agreement. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/The%20Long-term%20Strategy%20under%20the%20Paris%20Agreement.pdf>
- United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC]. (2020). *Yearbook of Global Climate Action*.
- Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2018). *Carbón*. <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/carbon.aspx>
- Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2021). *El Plan Energético Nacional 2020-2050. La transformación energética que habilita el desarrollo sostenible*. MinEnergía, UPME. [https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN\\_2020\\_2050/Plan\\_Energetico\\_Nacional\\_2020\\_2050.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf)
- World Energy Council [WEC]. (2019a). Casestudy - Extreme Weather: Drought - El Niño, Colombia 2015/16. [https://www.worldenergy.org/assets/downloads/El\\_ni%C3%B1o\\_Colombia\\_-Extreme\\_weather\\_conditions\\_SEP2019.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/El_ni%C3%B1o_Colombia_-Extreme_weather_conditions_SEP2019.pdf)
- World Energy Council [WEC]. (2019b). *Innovation Insights Brief. Energy Infrastructure. Affordable Enabler or Decarbonization Constraint*. <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Innovation-Insights-Brief-Energy-Infrastructure-Affordability-Enabler-or-Decarbonisation-Constraint.pdf>
- World Energy Council [WEC]. (2019c). *Cyber challenges to the energy transition*. [https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Cyber\\_Challenges\\_to\\_the\\_Energy\\_Transition\\_WEC\\_MMC\\_2019.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Cyber_Challenges_to_the_Energy_Transition_WEC_MMC_2019.pdf)
- World Energy Council [WEC]. (2019d). *World Energy Scenarios. Exploring Innovation Pathways to 2040*. [https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Scenarios\\_FINAL\\_for\\_website.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Scenarios_FINAL_for_website.pdf)
- World Energy Council [WEC]. (2020a). *Energy Issues Monitor. Decoding new signals of change*. [https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World\\_Energy\\_Issues\\_Monitor\\_2020\\_-\\_Full\\_Report.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World_Energy_Issues_Monitor_2020_-_Full_Report.pdf)
- World Energy Council [WEC]. (2020b). *Energy Transition Toolkit User's guide*. <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World-Energy-Council-Energy-Transition-Toolkit-User-Guide.pdf>
- World Energy Council [WEC]. (2020c). *Trilemma Energy Index*. [https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World\\_Energy\\_Trilemma\\_Index\\_2020\\_-\\_REPORT.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World_Energy_Trilemma_Index_2020_-_REPORT.pdf)
- World Energy Council [WEC]. (2020d). *Dynamic Resilience Framework*. <https://www.worldenergy.org/transition-toolkit/dynamic-resilience-framework>
- World Energy Council [WEC]. (2020e). *Switzerland: Country profile*. <https://trilemma.worldenergy.org/#!/country-profile?country=Switzerland&year=2020>
- World Economic Forum [WEF]. (2020). *Fostering effective energy transition. 2020 Edition*. [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Fostering\\_Effective\\_Energy\\_Transition\\_2020\\_Edition.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Fostering_Effective_Energy_Transition_2020_Edition.pdf)

# La NUEVA ENERGÍA

