



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Análisis de la Seguridad Energética en la Cadena de Suministro del Petróleo y los Combustibles Líquidos en Colombia**

**Daniel Camilo Andrade Rendón**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión

Medellín, Colombia

2019



# **Análisis de la Seguridad Energética en la Cadena de Suministro del Petróleo y los Combustibles Líquidos en Colombia**

**Daniel Camilo Andrade Rendón**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería - Sistemas Energéticos**

Directora:  
Ph.D., Yris Olaya Morales

Línea de Investigación:  
Mercados de energía

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión  
Medellín, Colombia

2019



*“Siempre acabamos llegando a donde nos  
esperan”*

*LIBRO DE LOS ITINERARIOS*

*José Saramago*



## **Agradecimientos**

A mi familia, especialmente a mis padres y a mi hermana, por darme su apoyo y permitir que siga adelante con la construcción de mis sueños.

A la Profesora Yris Olaya, por tan acertada orientación y por acompañarme con tanta paciencia en cada etapa de este proceso.

A la Facultad de Minas por apoyarme con la beca de posgrado y por poner a mi disposición los recursos académicos que fueron necesarios para culminar este trabajo de grado.

A todos mis amigos, quienes pendientes de mi avance me animaron a terminar con éxito esta etapa académica.





## Resumen

La seguridad energética es un asunto de amplio interés entre gobiernos y organizaciones debido a la importancia que tiene la energía en el desarrollo económico y social. Sin embargo, por tratarse de un concepto multidimensional, no existe un consenso sobre cómo evaluar la seguridad energética y como adaptarla a contextos específicos.

En este trabajo se recopilan algunas de las definiciones más relevantes de la seguridad energética y sus conceptos asociados, que junto con un análisis del balance energético colombiano y del Plan Energético Nacional, permiten presentar un enfoque de seguridad energética para Colombia con una perspectiva de cadena de suministro, a partir de cuatro dimensiones: disponibilidad, accesibilidad, asequibilidad y aceptabilidad.

Centrando el análisis en el subsistema del petróleo y los combustibles líquidos, se evaluaron 32 indicadores de seguridad energética para el periodo entre 2010 y 2016, junto con otros 5 indicadores relacionados específicamente con la sostenibilidad en la seguridad energética, permitiendo incorporar retos ambientales, sociales y políticos vinculados con temas energéticos en el país.

Finalmente, al ser el sector transporte el que representa el mayor consumo de energía, algunas de las políticas energéticas propuestas en el Plan Energético Nacional para este sector fueron evaluadas a través de un modelo dinámico. Las proyecciones de consumo de combustibles para diferentes escenarios de entrada de tecnologías vehiculares y de mejoras en eficiencia, permiten concluir que los impactos en el largo plazo sobre la seguridad energética son poco significativos, considerando que persiste un aumento en el consumo de energía per cápita.

**Palabras clave:** Seguridad energética, Políticas energéticas, Petróleo y combustibles líquidos, Indicadores de seguridad energética, Sector transporte, Modelo dinámico.

## Abstract

Energy security is an important issue for governments and organizations due to the importance of energy for economic and social development; nevertheless, being a multidimensional concept, there is no consensus about the best method to assess energy security for a specific context.

The next document is presented with some of the most important definitions about energy security and related concepts according to literature review, with a Colombian energy balance and national energy plan analysis that allows a focus for Colombia with a supply chain approach from four dimensions: availability, accessibility, affordability and acceptability.

Focusing analysis over oil and liquid fuels subsystem, 32 energy security indicators were evaluated and calculated between 2010 and 2016, besides 5 other indicators related to sustainability aspects of energy security, incorporating environmental, social and political challenges linked to energy issues in the country.

Finally, in view of transportation being the largest energy consumer, some of the energy policies for this sector in Colombia were assessed using a dynamic model. Fuels projection for different scenarios of vehicular technologies and fuel economy improvements lets conclude that impact on the long-term energy security are not significant considering the increase in per capita fuels consumption persists.

**Keywords:** Energy security, Energy policy, Oil and liquid fuels, Energy security indicators, Transport sector, Dynamic model.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen .....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XVI</b>
<b>Lista de símbolos y abreviaturas .....</b>	<b>XVII</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Seguridad Energética.....</b>	<b>5</b>
1.1 Seguridad de los sistemas energéticos.....	5
1.1.1 Sistema energético como sujeto .....	6
1.1.2 Sistemas energéticos como objeto.....	7
1.2 Definiciones de seguridad energética .....	8
1.2.1 Seguridad de suministro.....	9
1.2.2 Seguridad de demanda .....	11
1.2.3 Seguridad de la cadena de suministro .....	13
1.3 Propósitos de la seguridad energética .....	14
1.3.1 Mitigación de riesgos.....	15
1.3.2 Lineamiento de políticas energéticas .....	16
1.4 Dimensiones de la seguridad energética .....	18
1.4.1 Dimensiones según componentes.....	18
1.4.2 Dimensiones según evaluación de riesgos.....	20
1.5 Transición de los sistemas energéticos .....	21
<b>2. Seguridad Energética en Colombia .....</b>	<b>25</b>
2.1 Contexto energético colombiano.....	25
2.1.1 Balance Energético Colombiano .....	27
2.1.2 Política Energética Colombiana .....	31
2.2 Índices de seguridad energética para Colombia .....	34
2.2.1 Índice de Energía Choiseul .....	34
2.2.2 Índice de Desempeño Global de Arquitectura Energética .....	35
2.2.3 Índice del Trilema Energético .....	35
2.3 Problema de Investigación.....	36
2.3.1 Objetivo general.....	37
2.3.2 Objetivos específicos .....	37
2.4 Definición de seguridad energética para Colombia .....	39
<b>3. Subsistema del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia.....</b>	<b>41</b>

3.1	Cadena del petróleo y sus derivados.....	41
3.1.1	Exploración y producción.....	42
3.1.2	Refinación.....	42
3.1.3	Distribución y consumo de productos derivados .....	43
3.1.4	Agentes de la cadena .....	44
3.2	Indicadores de seguridad energética.....	46
3.2.1	Indicadores para el subsistema del petróleo y combustibles líquidos..	48
3.2.2	Priorización de indicadores .....	50
3.2.3	Cálculo de indicadores.....	55
3.2.4	Indicadores agregados .....	66
<b>4.</b>	<b>Sostenibilidad en la seguridad energética.....</b>	<b>73</b>
4.1	Sistemas energéticos y desarrollo sostenible .....	73
4.2	Indicadores de sostenibilidad en la seguridad energética.....	73
4.2.1	Contaminación del aire .....	74
4.2.2	Uso de agua y suelo para producción de biocombustibles.....	79
4.2.3	Generación de valor para las comunidades .....	81
<b>5.</b>	<b>Impacto de políticas para el transporte en la seguridad energética .....</b>	<b>83</b>
5.1	Políticas energéticas en el sector transporte .....	83
5.1.1	Plan Indicativo de Abastecimiento de Combustibles Líquidos.....	85
5.1.2	Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética .....	86
5.1.3	Mapa de ruta para la transición hacia vehículos de bajas y cero emisiones .....	86
5.2	Modelos de planeación y evaluación de políticas .....	87
5.3	Modelo dinámico del sector transporte carretero en Colombia .....	89
5.3.1	Descripción del modelo.....	89
5.3.2	Validación del modelo.....	96
5.3.3	Evaluación de políticas .....	100
5.3.4	Impactos sobre la seguridad energética .....	105
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>113</b>
6.1	Conclusiones.....	113
6.2	Recomendaciones.....	117
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>119</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1:</b> Relación entre los sistemas energéticos y la seguridad (Johansson, 2013).	6
<b>Figura 2-1:</b> Participación del sector minero energético en el PIB Colombiano. ....	26
<b>Figura 2-2:</b> Participación del sector minero energético en IED en Colombia. ....	26
<b>Figura 2-3:</b> Participación del sector minero energético en las Exportaciones colombianas	26
<b>Figura 2-4:</b> Balance energético nacional para el año 2016 .....	28
<b>Figura 2-5:</b> Participación de las pérdidas de energía según sectores de uso final ...	29
<b>Figura 2-6:</b> Balance del subsector del petróleo y los combustibles líquidos para el año 2016	30
<b>Figura 2-7:</b> Preguntas de investigación en relación con estado actual y futuro de la seguridad energética. ....	37
<b>Figura 3-1:</b> Flujo de petróleo y combustibles líquidos en la cadena de abastecimiento en Colombia	45
<b>Figura 3-2:</b> Ubicación de los indicadores de seguridad energética en el subsistema del petróleo y los combustibles líquidos .....	55
<b>Figura 3-3:</b> Reservas y producción de petróleo en Colombia.....	56
<b>Figura 3-4:</b> Relación reservas producción de petróleo en Colombia .....	56
<b>Figura 3-5:</b> Oferta interna e importaciones de petróleo en Colombia .....	57
<b>Figura 3-6:</b> Pozos exploratorios y actividad sísmica exploratoria en Colombia .....	58
<b>Figura 3-7:</b> Índice Shannon Weiner para la producción de petróleo en Colombia ....	59
<b>Figura 3-8:</b> Producción de combustibles y biocombustibles en Colombia .....	60
<b>Figura 3-9:</b> Carga a refinerías en Colombia .....	60
<b>Figura 3-10:</b> Consumo e importaciones de combustibles y biocombustibles en Colombia	60
<b>Figura 3-11:</b> Consumo de combustibles por sectores y per cápita en Colombia .....	61
<b>Figura 3-12:</b> Diversidad en uso de combustibles para el sector transporte en Colombia	61
<b>Figura 3-13:</b> Volatilidad del precio internacional del petróleo y de los precios de los combustibles en Colombia .....	62
<b>Figura 3-14:</b> Inversión extranjera directa en la industria petrolera en Colombia .....	63
<b>Figura 3-15:</b> Contratos vigentes y firmados en la industria petrolera en Colombia ....	63
<b>Figura 3-16:</b> Consumo de agua para producción y refinación de petróleo en Colombia	64

<b>Figura 3-17:</b>	Incidentes con riesgo ambiental y derrames de hidrocarburos en Colombia	65
<b>Figura 3-18:</b>	Participación de biocombustibles en el sector transporte colombiano	65
<b>Figura 3-19:</b>	Emisiones de CO <sub>2</sub> asociadas al uso de petróleo y combustibles en Colombia	66
<b>Figura 3-20:</b>	Indicador agregado de seguridad energética en la dimensión de disponibilidad para la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia	69
<b>Figura 3-21:</b>	Indicador agregado de seguridad energética en la dimensión de accesibilidad para la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia	70
<b>Figura 3-22:</b>	Indicador agregado de seguridad energética en la dimensión de asequibilidad para la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia	70
<b>Figura 3-23:</b>	Indicador agregado de seguridad energética en la dimensión de aceptabilidad para la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia	71
<b>Figura 4-1:</b>	Relación entre la energía y el desarrollo sostenible	74
<b>Figura 4-2:</b>	Contenido de azufre en las gasolinas distribuidas en Colombia	75
<b>Figura 4-3:</b>	Contenido de azufre en el diésel distribuido en las ciudades de Bogotá y Medellín	76
<b>Figura 4-4:</b>	Contenido de azufre en el diésel distribuido en Colombia (a excepción de Medellín y Bogotá)	76
<b>Figura 4-5:</b>	Concentración de PM <sub>2.5</sub> en las estaciones del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire con representatividad temporal igual o mayor a 75% en Medellín y Bogotá	77
<b>Figura 4-6:</b>	Concentración de NO <sub>2</sub> en las estaciones del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire con representatividad temporal igual o mayor a 75% en Medellín y Bogotá	78
<b>Figura 4-7:</b>	Concentración de SO <sub>2</sub> en las estaciones del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire con representatividad temporal igual o mayor a 75% en Medellín y Bogotá	79
<b>Figura 4-8:</b>	Consumo de agua para la producción de biocombustibles en Colombia en relación con el consumo de agua de la industria del petróleo	80
<b>Figura 4-9:</b>	Área sembrada de palma de aceite y de caña de azúcar para la producción de biocombustibles en Colombia	81
<b>Figura 4-10:</b>	Ingresos de regalías por cada barril de petróleo producido en Colombia	82
<b>Figura 5-1:</b>	Subsistemas del modelo para el sector transporte carretero en Colombia	90
<b>Figura 5-2:</b>	Diagrama causal del modelo para el sector transporte carretero en Colombia	91
<b>Figura 5-3:</b>	Diagrama de flujos y niveles por categoría vehicular	91
<b>Figura 5-4:</b>	Diagrama de flujos y niveles por edad para categorías de automóviles, camperos y camionetas	93
<b>Figura 5-5:</b>	Diagrama de flujos y niveles para vehículos con combustibles alternativos	93

---

<b>Figura 5-6:</b>	Diagrama de relación entre proyección de viajes, número de vehículos y distancia recorrida. ....	94
<b>Figura 5-7:</b>	Resultados de simulación con valores extremos en el modelo. ....	98
<b>Figura 5-8:</b>	Resultados de simulación variando método de integración y tamaño de paso de la simulación. ....	99
<b>Figura 5-9:</b>	Resultados de simulación en las pruebas de sensibilidad del modelo. .	100
<b>Figura 5-10:</b>	Consumo de combustibles líquidos del sector transporte carretero para cada uno de los escenarios. ....	104
<b>Figura 5-11:</b>	Proyección de la demanda de combustibles líquidos en Colombia. ....	107
<b>Figura 5-12:</b>	Proyección de consumo de combustibles líquidos per cápita. ....	109
<b>Figura 5-13:</b>	Proyección de emisiones de CO <sub>2</sub> per cápita. ....	109
<b>Figura 5-14:</b>	Proyección del indicador agregado de seguridad energética en la dimensión de accesibilidad para la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia	111

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 2-1:</b> Enfoque metodológico para el cumplimiento de los objetivos de la investigación.....	38
<b>Tabla 3-1:</b> Agentes de la cadena de distribución de combustibles en Colombia (SICOM & MME, 2015).....	46
<b>Tabla 3-2:</b> Indicadores de seguridad energética para la cadena del petróleo y los combustibles líquidos.....	49
<b>Tabla 3-3:</b> Indicadores priorizados para la cadena de suministro del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia.....	52
<b>Tabla 3-4:</b> Auto abastecimiento de petróleo en Colombia.....	57
<b>Tabla 3-5:</b> Calculo de indicadores y su valor normalizados para la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia.....	67
<b>Tabla 3-6:</b> Indicador agregado según dimensiones para la seguridad energética de la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia.....	69
<b>Tabla 4-1:</b> Requerimientos de agua y suelo por unidad de energía de biocombustible producido en Colombia.....	79
<b>Tabla 5-1:</b> Metas a 2050 del mapa de ruta de transición a vehículos de bajas y cero emisiones	87
<b>Tabla 5-2:</b> Parámetros y ecuaciones del modelo dinámico para el sector transporte carretero en Colombia.....	94
<b>Tabla 5-3:</b> Comparación del consumo real de combustibles en el 2016 con datos del modelo.	97
<b>Tabla 5-4:</b> Descripción de escenarios para la evaluación de políticas en el modelo.	101
<b>Tabla 5-5:</b> Valores tomados por las variables en cada uno de los escenarios. ....	102



## Lista de símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
<i>Bbl</i>	Barriles	m <sup>3</sup>	6,2898 m <sup>3</sup>
<i>Lt</i>	Litros	m <sup>3</sup>	1x10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
<i>Toe</i>	Toneladas equivalentes de petróleo	J	4,1868x10 <sup>10</sup> J
<i>Ton</i>	Toneladas	Kg	1x10 <sup>3</sup> Kg

### Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>ANH</i>	Agencia Nacional de Hidrocarburos
<i>BanRep</i>	Banco de la República de Colombia
<i>BECO</i>	Balance Energético Colombiano
<i>CIDET</i>	Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico del Sector eléctrico
<i>CO</i>	Monóxido de carbono
<i>CO<sub>2</sub></i>	Dióxido de carbono
<i>COP</i>	Pesos Colombianos
<i>DANE</i>	Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas
<i>EIA</i>	Energy Information Administration (Administración de Información de Energía de los Estados Unidos)
<i>E&amp;P</i>	Exploración y Producción
<i>EU</i>	Unión Europea

**Abreviatura Término**

---

<i>GEI</i>	Gases de efecto invernadero
<i>GLP</i>	Gas licuado del petróleo
<i>GNV</i>	Gas Natural Vehicular
<i>IDEAM</i>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
<i>IEA</i>	Agencia Internacional de Energía
<i>IED</i>	Inversión Extranjera Directa
<i>MME</i>	Ministerio de Minas y Energía
<i>NOx</i>	Dióxidos de nitrógeno
<i>OPEP</i>	Organización de Países Exportadores de Petróleo
<i>PEN</i>	Plan Energético Nacional
<i>PIB</i>	Producto Interno Bruto
<i>PM2.5</i>	Material particulado menor a 2,5 micras
<i>ppm</i>	Partes por millón
<i>RUNT</i>	Registro Único Nacional de Transito
<i>SE</i>	Seguridad Energética
<i>SICOM</i>	Sistema de Información de Combustibles Líquidos
<i>SIPG</i>	Sistema de Información de Petróleo y Gas
<i>SO<sub>2</sub></i>	Dióxido de azufre
<i>TEA</i>	Contratos de evaluación técnica
<i>Toe</i>	Toneladas equivalentes de petróleo
<i>UPME</i>	Unidad de Planeación Minero Energética
<i>US</i>	Estados Unidos de América
<i>USD</i>	Dólares estadounidenses

# Introducción

Los sistemas energéticos a nivel global se enfrentan a diferentes retos para lograr garantizar la adquisición y el uso de energía, por lo que tener un conocimiento de las características y de los riesgos asociados a cada uno de los sistemas es fundamental. Desde la primera mitad del siglo XX, en medio de la primera Guerra Mundial, se configura el concepto de seguridad energética, en un primer momento exclusivamente en relación con el suministro continuo de petróleo para el transporte de las flotas militares, pero con el paso de los años y la aparición de nuevas formas y usos de energía, el concepto se ha ampliado con el fin de involucrar aspectos económicos, políticos, tecnológicos, ambientales y sociales que tienen efecto sobre el estado de vulnerabilidad o la probabilidad de daño de un sistema energético vital o de infraestructura crítica (Cherp & Jewell, 2014).

En la literatura académica la seguridad energética es abordada desde diferentes perspectivas, dándole un carácter multidimensional y exigiendo que el concepto deba adaptarse a las características de cada uno de los sistemas energéticos en estudio (Zhao & Chen, 2014). Adicionalmente, la seguridad energética también debe ser un concepto dinámico capaz de incorporar los cambios propios de las transiciones energéticas globales, especialmente en relación con la adopción de medidas de mitigación del cambio climático, las cuales tendrán efectos significativos en la configuración futura de los sistemas energéticos (Jonsson et al., 2015).

Países como Estados Unidos y los miembros de la Unión Europea han incluido en sus planes energéticos políticas que buscan mejorar el estado de su seguridad energética, considerando medidas proactivas que mantengan la estabilidad de los sistemas energéticos en el largo plazo y medidas reactivas que permitan atender amenazas de agentes externas que pongan en riesgo la disponibilidad de energéticos en el corto plazo (European Commission, 2014; US Government Information, 2007).

En el caso Colombiano, el Plan Energético Nacional a 2050 está enfocado en garantizar el abastecimiento interno y externo de energía de forma eficiente, con el mínimo impacto ambiental y generando valor para las regiones y la población, además destaca la diversificación de la canasta de energéticos, la gestión eficiente de la demanda y la incorporación de tecnologías limpias en el sector transporte (UPME, 2015a). Sin embargo, no existe un consolidado del estado de la seguridad energética nacional, cómo se evidencia en el resultado de la investigación del Convenio de Ciencia y Tecnología entre la Unidad de Planeación Minero Energética y el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Sector Eléctrico (UPME & CIDET, 2017), en donde tan solo se presenta un concepto homologado de la seguridad energética para el país, sin considerar aún modelos de análisis que permitan conocer su estado actual o futuro.

Considerando que Colombia es un exportador neto de energía, especialmente por los volúmenes exportados de petróleo crudo y de algunos combustibles líquidos, pero que aun así requiere importaciones de gasolina y diésel debido a las limitaciones en la capacidad de transformación en refinerías, resulta evidente que la cadena del petróleo y los combustibles líquidos tienen una gran importancia dentro de la seguridad energética del país. Por lo tanto, a partir del análisis del balance energético nacional, en este trabajo se propone evaluar el estado actual de la seguridad energética de la cadena de suministro del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia y el estado posible de la seguridad energética en los escenarios propuestos por el Plan Energético Nacional a 2050.

Para cumplir los objetivos de este trabajo, el documento se ha estructurado de la siguiente manera: en el Capítulo 1: Seguridad Energética, se presenta el resultado de la revisión de literatura académica, recopilando diferentes definiciones de seguridad energética, seguridad de suministro y seguridad de demanda, además de las aproximaciones a su análisis según la capacidad que tenga un sistema energético de cambiar su propio estado de seguridad energética (sistema como sujeto), o si depende de factores externos (sistema como objeto). Finalmente, se analiza las diferencias en el análisis de la seguridad energética en el corto plazo, como herramienta para la mitigación de riesgos, y en el largo plazo, como insumo para la planeación y elaboración de políticas energéticas.

El Capítulo 2: Seguridad Energética en Colombia, analiza el balance energético, el Plan Energético Nacional y la calificación obtenida por Colombia en algunos índices

internacionales de seguridad energética, permitiendo identificar la cadena del petróleo y los combustibles líquidos como un subsistema crítico. Además, se proponen las dimensiones de disponibilidad, en relación directa con las fuentes primarias de energía; accesibilidad, en cuanto a disponibilidad de infraestructura de transformación y transporte de energéticos; asequibilidad, enfocada en la estabilidad de los mercados de energía; y aceptabilidad, ocupándose de aspectos ambientales, sociales y políticos relacionados con la generación y el uso de energía en el país.

El subsistema del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia se caracteriza en el Capítulo 3, identificando las etapas y los agentes de la cadena, además de indicadores que permiten conocer el estado de su seguridad energética. De la literatura académica fueron seleccionados y priorizados 32 indicadores principalmente por la disponibilidad de información en fuentes oficiales, de forma que pudieran ser cálculos para Colombia en el periodo entre los años 2010 y 2016. Finalmente, considerando las dimensiones propuestas en el capítulo anterior, se calcula un indicador agregado para cada una de ellas, con el fin de ver el comportamiento de la seguridad energética en los años últimos años. Adicionalmente, en el Capítulo 4 se analiza la relación entre la seguridad energética y el desarrollo sostenible, proponiendo indicadores adicionales para factores ambientales, sociales y económicos relacionados con la cadena del petróleo y los combustibles líquidos, incluyendo índices de contaminación del aire, demanda de recurso hídrico y de suelo en la producción de biocombustibles y retribución económica a las comunidades por la explotación de recursos energéticos.

En el Capítulo 5: Impacto de políticas para el transporte en la seguridad energética, se hace una revisión de los planes de acción indicativos y del mapa de ruta para la transición a vehículos de bajas y cero emisiones, con el fin de identificar políticas propuestas para el sector transporte que tendrán efecto en el consumo de combustibles líquidos en el país. Luego de presentar algunos modelos para la elaboración y evaluación de planes energéticos, se desarrolla un modelo dinámico que incorpora escenarios a 2050 para el sector transporte carretero en Colombia, considerado la entrada de nuevas tecnologías vehiculares, mejoras en rendimiento y aumento en la mezcla de biocombustibles. Finalmente, los resultados del modelo se comparan según las proyecciones de demanda total de combustibles disponibles en el Plan Energético Nacional, permitiendo concluir que a pesar de que las políticas permiten alcanzar disminuciones en el consumo con respecto

un escenario tendencial, el consumo de combustibles y las emisiones de dióxido de carbono siguen en aumento.

Finalmente, se concluye que la evaluación de la seguridad energética depende en gran medida del escenario temporal en que se analice y que se deben considerar de forma crítica las proyecciones obtenidas, pues dependen de supuestos necesarios para la construcción del modelo. Sin embargo, a pesar de las limitaciones, resulta evidente que las políticas energéticas en el sector transporte tendrán un impacto reducido en la seguridad energética si son analizadas de forma aislada y que para tener una idea más completa del estado futuro de la seguridad energética es necesario un enfoque integrado, que considere el efecto de otros sectores sobre el subsistema del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia.

# 1. Seguridad Energética

En este capítulo se presentan diferentes definiciones de seguridad energética y su relación con los sistemas energéticos y la evaluación de riesgos. También se mencionan algunos instrumentos de políticas energéticas que buscan mejorar el estado de la seguridad energética en diferentes sociedades y economías y junto con esto, las principales tendencias de los sistemas energéticos a nivel global, que buscan favorecer la eficiencia energética y las economías de cero emisiones.

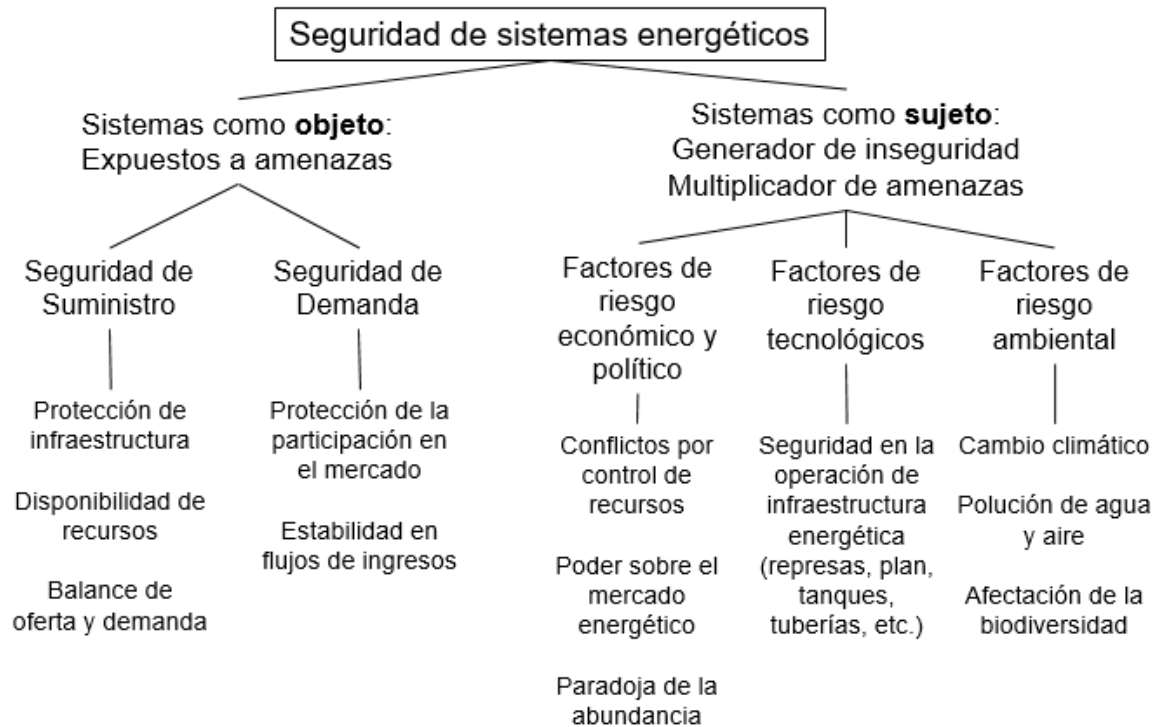
## 1.1 Seguridad de los sistemas energéticos

Un sistema energético se entiende como el conjunto de procesos que, combinados, permiten la adquisición y el uso de energía para una sociedad o economía (Keirstead, Jennings, & Sivakumar, 2012). Al hacer mención a procesos combinados, la idea de sistema energético representa una cadena de suministro, pues involucra actividades de extracción, producción, transporte, transformación, distribución y demás etapas necesarias para la prestación de servicios energéticos; además, también involucra las diferentes formas de uso, ocupándose entonces tanto de la oferta como de la demanda de energía. Por otra parte, al hacer referencia a una sociedad o economía específica, es posible concluir que la definición de un sistema energético es altamente dependiente del contexto en el que se estudie, donde se involucran aspectos económicos, políticos, tecnológicos, ambientales y sociales.

Respecto al concepto de seguridad, puede entenderse como la capacidad de mantener las funciones sociales críticas para asegurar la vida y la salud de los ciudadanos y satisfacer sus necesidades básicas. La energía es considerada una de dichas funciones críticas, y por lo tanto, sobre ella se puede aplicar la definición general de seguridad, en relación con la ausencia de cualquier tipo de amenazas (Johansson, 2013). La Figura 1-1 presenta esquemáticamente como un sistema energético puede ser estudiado como un sujeto

capaz de generar seguridad o inseguridad para sí mismo o para cualquier otro tipo de sistema, asociado a diferentes factores de riesgo, al igual que como un objeto que debe ser protegido contra amenazas externas al propio sistema.

**Figura 1-1:** Relación entre los sistemas energéticos y la seguridad (Johansson, 2013).



### 1.1.1 Sistema energético como sujeto

Al estudiarse como un sujeto, un sistema energético funciona como un multiplicador de riesgos en relación con factores económicos, políticos, tecnológicos y ambientales, tal como lo describe Johanson (2013) y se describe a continuación:

- Factores de riesgo económico y político:

El alto valor económico de la energía, debido principalmente a su importancia en los procesos de desarrollo y a la distribución desigual de los recursos energéticos a nivel global, puede ser un generador de conflictos geopolíticos debido a la manipulación que ejercen los grandes productores, inversores o consumidores sobre el mercado energético.

Por otro lado, en el ámbito interno surgen riesgos sobre la institucionalidad en las economías con abundancia de recursos energéticos y naturales, debido principalmente a



la corrupción y la distribución desigual de la riqueza, los cuales resultan en la reducción del bienestar social a causa del desarrollo de proyectos energéticos a gran escala. Además, al ser reconocido el valor económico de la energía y de la infraestructura propia de los sistemas energéticos, es posible que estos se vuelvan blanco de ataques intencionales por parte de grupos ilegales motivados por conflictos preexistentes de cualquier ámbito.

- Factores de riesgo tecnológico:

Los aspectos técnicos y físicos de los sistemas energéticos también pueden generar riesgos en relación con errores humanos, eventos naturales, acciones intencionales o fallas en la infraestructura. Las causas secundarias de dichos riesgos suelen estar relacionadas con bajos niveles de inversiones en seguridad y mantenimiento, falta de educación, deficiencia en los marcos regulatorios e inestabilidades políticas.

- Factores de riesgo ambiental:

Racionados principalmente con las emisiones GEI y de otros agentes contaminantes, los cuales incrementan los riesgos del cambio climático, la afectación de la salud humana y la degradación de los ecosistemas. También se consideran los conflictos generados por el uso del suelo y el aumento en la demanda de agua, propios de proyectos energéticos a gran escala como producción de yacimiento biocombustibles o explotación de yacimiento no convencionales de hidrocarburos.

### **1.1.2 Sistemas energéticos como objeto**

Un sistema energético puede ser analizado como un objeto cuando se encuentra expuesto a cualquier tipo de amenazas con respecto a su correcto funcionamiento. Normalmente se asocia con la seguridad de suministro, en relación con la confiabilidad en la prestación de los servicios energéticos; al igual que con la seguridad de demanda, la cual centra su atención en las formas de garantizar ingresos para el sostenimiento el sector energético. Los factores de riesgo más relevantes en cuanto a la exposición de los sistemas energéticos son:

- Disponibilidad y accesibilidad de recursos.
- Dependencia energética y diversidad de fuentes y proveedores.

- Capacidad de transporte, transformación, distribución y transmisión.
- Estabilidad del mercado energético y de flujo de ingresos.

## 1.2 Definiciones de seguridad energética

Ante la complejidad de los sistemas energéticos y la importancia de su correcto funcionamiento, el concepto de seguridad energética ha ido ganando relevancia, principalmente en relación con la elaboración de políticas energéticas (Kaygusuz, 2012). A pesar de que en la academia y las organizaciones la definición de seguridad energética sigue siendo ampliamente discutida, puede ser entendida como el estado deseable de baja vulnerabilidad o probabilidad de daño de los sistemas energéticos vitales o infraestructura crítica (Cherp & Jewell, 2014). Esta definición, al ubicar a los sistemas energéticos como protagonistas, permite diversos niveles de análisis tanto sectorial como geográficamente y en consecuencia una identificación de riesgos y amenazas puntuales para cada sistema. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la seguridad energética se trata de un concepto dinámico, debido a que los sistemas energéticos futuros pueden ser considerablemente diferentes a los actuales y dependen en gran medida del estado de desarrollo y el contexto de la sociedad o economía en estudio (Zhao & Chen, 2014).

Entre la diversidad de definiciones presentadas en la literatura académica para el concepto de seguridad energética, es posible identificar algunos elementos destacados (Ang, Choong, & Ng, 2015):

- Disponibilidad de energía: considera las diferentes fuentes de energía primaria a las cuales puede tener acceso una sociedad o economía y los riesgos asociados a su agotamiento o a la dependencia a proveedores o a rutas de transporte.
- Infraestructura: incluye todos los elementos de la cadena que permiten el suministro ininterrumpido de energía, por lo tanto, exigen seguimiento, control e inversión que permitan una operación continua y una capacidad suficiente.
- Precios de energía: presta especial atención a la volatilidad de los precios de la energía y la estabilidad del mercado energético, aspectos cruciales para los planes de

expansión de los sistemas energéticos y para garantizar la asequibilidad a servicios energéticos.

- Efectos sociales: involucra la relación entre la energía y el bienestar social y económico, al igual que la equidad en el acceso a formas modernas de energía. También considera la posible oposición de las comunidades ante proyectos energéticos que afecten negativamente su calidad de vida.
- Efectos ambientales: tiene en cuenta todos los efectos negativos sobre el ambiente a causa de la producción, la transformación, el transporte y el uso de energía. La contribución de la industria energética en las emisiones de gases de efecto invernadero suele ser uno de los asuntos más representativos en este elemento.
- Gobernanza: considera las políticas energéticas como determinantes en la configuración de los sistemas energéticos y en la consecución de un nivel deseado de seguridad energética. Reconoce a los gobiernos como agentes de toma de decisiones.
- Eficiencia energética: reconoce la importancia de los cambios tecnológicos sobre la demanda agregada de energía y la intensidad energética. También involucra el comportamiento de los usuarios con respecto a los patrones de consumo de energía.

Adicionalmente, es importante considerar que el estado deseable de seguridad energética dependerá del balance costo - beneficio que implique cuantificar y atender cualquier amenaza sobre los sistemas energéticos en el corto y el largo plazo (a nivel operacional y de suficiencia, respectivamente), involucrando así elementos absolutos, como es la disponibilidad de fuentes de energía, y elementos relativos, como la asequibilidad a los energéticos (Chester, 2010).

### **1.2.1 Seguridad de suministro**

Durante el periodo de la primera y la segunda guerra mundial la seguridad energética estaba directamente ligada con la seguridad nacional y militar, específicamente con respecto a garantizar el suministro de petróleo para el funcionamiento de las flotas de embarcaciones y tanques. Luego, tras la creciente demanda de energía a mediados del

siglo XX, la década de los 70's estuvo marcada por dos crisis del petróleo que dieron lugar a embargos de recursos de hidrocarburos y al alza en los precios de los energéticos (Energy Charter Secretariat, 2015). En respuesta a ello, varios países incorporaron medidas de seguridad energética dentro de sus políticas energéticas, reforzando el concepto clásico entendido como el suministro continuo de energéticos, principalmente petróleo, e incorporando la asequibilidad como otra de sus características. Esta definición fue adoptada por la Agencia Internacional de Energía -IEA, la cual fue establecida en 1974 en medio de la crisis energética de dicha década, y que define la seguridad energética como la disponibilidad ininterrumpida de las fuentes de energía a un precio asequible (OECD/IEA, 2018). A partir de esta última definición empezó a diferenciarse entre la seguridad energética en el corto y el largo plazo.

En el marco de coyunturas geopolíticas como la Guerra fría desde finales de la década de los 40, la Guerra del Golfo en la década de los 90 y la Guerra de Irak en el año 2003, las políticas energéticas continuaron encaminadas a garantizar la continuidad de suministro, dando lugar al término Dependencia Energética como uno de los factores a ser evaluados dentro de la seguridad energética (Energy Charter Secretariat, 2015). Más allá de los usos militares, la importancia de los servicios energéticos para el funcionamiento de las sociedades y el desarrollo industrial hizo que la independencia energética se convirtiera en una prioridad para aquellos países que no cuentan con suficientes fuentes de energía primaria, primordialmente petróleo y gas natural, para cubrir de forma autónoma su demanda interna de energía. Estados Unidos y gran parte de los países de Europa establecieron como objetivo en sus planes energéticos el aumento en su independencia energética, a través de diversificación de fuentes, control en el consumo, investigación y desarrollo, y fortalecimiento del mercado regional de energía para el caso de la Unión Europea -EU (European Commission, 2014; US Government Information, 2007).

Sin embargo, reconociendo la imposibilidad de muchos países para poder garantizar a corto y mediano plazo la completa autonomía y continuidad en el suministro de fuentes primarias de energía, también se entiende la seguridad energética como la minimización de los riesgos que afecten el suministro, estableciendo un nivel permisible de dependencia, pero conservando la asequibilidad como característica principal, estableciendo costos que puedan ser asumidos por un país para satisfacer su demanda energética (Van de Wyngard, 2006). Esta definición reconoce la importancia de abrir los sistemas energéticos

a los mercados globalizados, por lo tanto, entra a considerar también el manejo de riesgos causados por agentes externos al sistema.

De forma similar, partiendo de una visión compartida de bienestar global, es posible considerar la eliminación de la dependencia absoluta de recursos energéticos entre regiones a partir de la creación de interdependencias. De esta forma, la seguridad energética adquiere un enfoque de generación de valor sobre los sistemas energéticos que, además del suministro continuo, busca mejoras en temas de sostenibilidad y de nuevas adaptaciones (Livingston & Feldman, 2016). Esta definición se aparta de tomar medidas reactivas contra amenazas de agentes externos y enfoca sus estrategias en mantener los mercados internacionales de energía funcionales y estables, de forma que sea posible superar interrupciones a través de relaciones con otros países, cómo en el caso de los países miembros de la IEA y la EU (Månsson, 2016).

Al ir más allá de las fuentes primarias de energía, la seguridad de suministro también puede ser entendida como seguridad en la prestación de servicios energéticos, considerando el correcto funcionamiento de la infraestructura energética y la disponibilidad de diferentes formas de energía, donde quedan incluidos elementos desde la extracción de energías primarias, hasta procesos de transformación, transporte y distribución de fuentes secundarias de energía (Johansson, 2013). Así, otra de las definiciones de seguridad energética, entendida como seguridad de prestación de servicios energéticos, es la disponibilidad continua de energía en diferentes formas, cantidades suficientes y a precios razonables (United Nations Development Programme, 2000).

Por lo tanto, la seguridad de suministro implica disponibilidad de fuentes de energía, pero también la capacidad de transformarlas y distribuirlas en recursos energéticos aptos para satisfacer las necesidades de los consumidores, por lo cual se deben tener en cuenta todos los subsistemas y las facilidades incluidas en la cadena energética.

### **1.2.2 Seguridad de demanda**

Los países exportadores de petróleo tienen un alto nivel de independencia energética al poseer recursos domésticos; sin embargo, no están exentos de riesgos en relación con la prestación de servicios energéticos. La seguridad energética desde la perspectiva de la

demanda da especial atención a la dependencia económica del sector energético en los países con abundancia de recursos. Estos países manejan grandes volúmenes de exportaciones y un alto porcentaje de su renta depende de ellas. Ante el rol protagónico que toma la industria energética en dichas economías, mantener los mercados funcionando de forma estable se vuelve una prioridad para la seguridad energética, ya que la mayor parte del consumo local es financiado por la puesta en el mercado de sus excedentes de energía (Dike, 2013).

Aspectos geopolíticos externos al sector energético pueden tener efecto sobre la volatilidad de los precios del petróleo y sus derivados, como fue el caso con la inestabilidad causada por la separación de la Unión Soviética en la década de los 90's (Cherp & Jewell, 2011). Sin embargo, sobre la volatilidad de los precios también actúan fuerzas del mercado generadas por conflictos de intereses entre productores y consumidores. Ante esto, la seguridad de demanda busca proponer modelos de negocio apropiados para las economías productoras, de forma que logren garantizar una estabilidad en el mercado y permitan captar la mayor cantidad de beneficios económicos. Esto implica que los modelos de negocio deben buscar garantizar todas las condiciones económicas, legales y políticas para convertirse en proveedores atractivos en los mercados locales y regionales de energía (Jonsson et al., 2015).

De forma similar a como fue creada la IEA para velar por la seguridad de suministro, la Organización de Países Exportadores de Petróleo -OPEP, nació en 1960 y tiene como uno de sus principales objetivos garantizar la seguridad de demanda a través del control de la producción, la oferta y los precios en el mercado del petróleo. Para esta organización la seguridad de demanda puede definirse como la regularidad o estabilidad de la demanda para los países exportadores a precios competitivos en el mercado, que garanticen ganancias en toda la cadena (Dike, 2013).

En la seguridad de demanda también resulta relevante el concepto de Dependencia Energética, esta vez no en relación con proveedores, sino con los consumidores y las fuentes que satisfagan las necesidades de los mismo. Desde esta perspectiva, los consumidores son reconocidos como actores que permiten garantizar la rentabilidad económica de los sistemas a través del pago por la compra de energía (Energy Charter Secretariat, 2015), por lo tanto también se reconocen como tomadores de decisiones con

respecto a las formas de consumo y se espera que demanden una administración eficiente en los sistemas energéticos y un acceso a infraestructura óptima que garantice un servicio de calidad y sin interrupciones (Zhao & Chen, 2014).

El análisis de seguridad energética a nivel sectorial resulta fundamental para la seguridad de demanda, ya que los sectores económicos representan los principales usos finales de energía: residencial, comercial, industrial, agrícola y transporte. Entender sus tendencias de consumo es necesario para la adecuada operación de los sistemas energéticos y para garantizar un nivel satisfactorio de confiabilidad. Además, brinda información importante para la planeación de sistemas energéticos futuros y para la identificación de amenazas relacionadas con la capacidad de financiación de los sistemas energéticos existentes (Narula, Sudhakara Reddy, & Pachauri, 2017).

De acuerdo con lo anterior, la seguridad de demanda también se ocupa de estudiar el comportamiento de la demanda agregada de energía, especialmente para predecir posibles reducciones en la participación de las fuentes convencionales, en su mayoría fósiles. Dichas fuentes brindan estabilidad al sistema gracias a su capacidad instalada, pero su mantenimiento resulta altamente intensivo en capital; por lo tanto, como resultado de la reducción en la demanda, la reducción de márgenes de ingresos y de inversiones pone en riesgo la capacidad del sistema para operar de forma óptima y hacer frente a posibles cambios tecnológicos (Johansson, 2013).

### **1.2.3 Seguridad de la cadena de suministro**

Una cadena de suministro integra agentes y actividades en un proceso de actividad económica, donde fluyen recursos, productos e información, tratándose así de un sistema dinámico (Lima, Relvas, & Barbosa-Póvoa, 2016). Con el fin de obtener mayor rentabilidad y lograr articular a todos los actores en una cadena de suministro, se hacen necesarias medidas de administración que pueden ser de carácter estratégico (definen la estructura de la cadena y tienen efectos a largo plazo), táctico (modifican flujos y tienen efectos a mediano plazo) u operacional (programan actividades y tienen efectos a corto plazo). Dichas medidas también contribuyen a hacer que una cadena de suministro sea más segura y resiliente, de forma que pueda responder ante posibles interrupciones y reestablecer rápidamente su operación original.

A pesar de que tradicionalmente la seguridad energética se ha estudiado como seguridad de suministro y seguridad de demanda, al igual que en cualquier otro proceso productivo, el sector energético está conformado por diferentes eslabones, en cada uno de los cuales existen riesgos que pueden afectar el nivel deseado de seguridad energética. De acuerdo con lo anterior, entender los sistemas energéticos como una cadena de suministro permite incorporar gran cantidad de variables al análisis de la seguridad energética, lo cual, aunque representa un mayor grado de complejidad e incertidumbre, permite una mejor caracterización de las amenazas sobre los sistemas en estudio (Zhao & Chen, 2014).

La cadena del petróleo, por ejemplo, es uno de los subsistemas más importantes dentro de los sistemas energéticos alrededor del mundo. Mas allá de las complejidades propias de una cadena de gran tamaño, la cadena del petróleo también se caracteriza por la dificultad para discretizar e inventariar sus productos en unidades fijas, que además pueden ser considerados como materias primas o como bienes de intercambio y pueden ser transados varias veces antes de llegar a un consumidor final (Sun, Liu, Chen, & Li, 2017). Entender este tipo de particularidades permite caracterizar riesgos vinculados con actores o actividades propios de la cadena, como podría ser la sobrecapacidad de refinación o la disponibilidad de infraestructura de transporte, e identificar fuerzas críticas que puedan ser manejadas a través de medidas de administración de la cadena de suministro, con el fin de evitar interrupciones en etapas subsiguientes y mantener el estado deseable de seguridad energética (Pan, Liu, & Li, 2017).

### **1.3 Propósitos de la seguridad energética**

Los sistemas energéticos vitales pueden ser definidos por sus límites geográficos (nacionales, regionales, locales, etc.), por subsistemas según procesos (fuentes primarias de energía, productos de transformación de energía, etc.), o por sectores económicos (industrial, transporte, agrícola, etc.). Es posible definir sistemas energéticos vitales por las diferentes combinaciones entre límites geográficos, procesos y sectores y así analizar su seguridad energética de forma independiente (Jewell, Cherp, & Riahi, 2014). Dicho análisis suele enfocarse en buscar estrategias para minimizar riesgos en la prestación de servicios energéticos y en algunas ocasiones en generar insumos para la toma de decisiones y la formulación de políticas energéticas (Bompard et al., 2017).



### 1.3.1 Mitigación de riesgos

La vulnerabilidad de los sistemas energéticos puede ser física, en donde se compromete el flujo continuo de energía, o económica, debido a variaciones en los costos de producción de energía y en los precios de los energéticos, y en ambos casos se mide por la exposición al riesgo y por la capacidad de resiliencia (Jewell et al., 2014). La seguridad energética busca establecer medidas estratégicas, proactivas y reactivas, en un sistema energético para reducir su exposición al riesgo (probabilidad de ocurrencia de un evento) y su nivel de sensibilidad (impactos causados por la materialización de un riesgo), al igual que para aumentar su resiliencia y flexibilidad (capacidad del sistema de soportar las consecuencias de cualquier alternación, reorganizándose, pero sin cambiar su estado) (Månsson, 2016).

Un riesgo puede ser entendiendo como cualquier impacto potencialmente negativo causado por situaciones adversas (Zhao & Chen, 2014). Además, Winzer (2012) propone que en el contexto de la seguridad energética los riesgos pueden estudiarse según la fuente, el alcance y las medidas de severidad, como se presenta a continuación:

- Fuente del riesgo: puede ser técnica, si el riesgo es endógeno de la cadena energética como en el caso de fallas en infraestructura o errores no intencionales; humana, relacionada con decisiones sobre la inversión y el control de la oferta y la demanda, inestabilidades geopolíticas y acciones de sabotaje o terrorismo; o natural, en relación con agotamiento de recursos y eventos estocásticos como intermitencia de algunas fuentes o eventos naturales extremos.
- Alcance de los impactos: se especifica según la etapa de la cadena energética en la que se presente algún impacto. Puede ser en el suministro de energías primarias, en el suministro de servicios energéticos, en los usos finales (impactos económicos por alteraciones en actividades productivas o por el nivel de bienestar generado la comunidad) o aún más de los usos finales, por los efectos sobre la seguridad humana y el ambiente.
- Medidas de severidad: la severidad de un impacto depende de la rapidez de materialización del riesgo, la magnitud de los cambios efectuados, el tiempo de

persistencia de los efectos, el tamaño del área afectada y la frecuencia y el nivel de certeza sobre la ocurrencia.

### **1.3.2 Lineamiento de políticas energéticas**

La seguridad energética es uno de los factores que favorece el desarrollo estable de una sociedad o economía, teniendo en cuenta que su análisis ayuda a modelar el comportamiento de los sistemas energéticos presentes y futuros (Proskuryakova, 2018). La transición hacia sistemas más eficientes y a economías de cero emisiones exige políticas energéticas que mantengan el estado deseable de seguridad energética, aumentando la flexibilidad de los sistemas energéticos para adaptarse a los escenarios futuros (Jewell et al., 2014).

A nivel internacional son reconocidas algunas herramientas de política energética que permiten mejorar la estabilidad de los sistemas energéticos, pero deben ser adaptadas a las realidades regionales y locales de cada sociedad o economía. A continuación se describen algunas de esas herramientas según lo descrito por el Energy Charter Secretariat (2015):

- **Diversificación:** es una de las herramientas más recurrentes dentro de la seguridad energética y puede tratarse de fuentes, proveedores y/o consumidores, al igual que de cualquier otro elemento del que dependa el correcto funcionamiento de los sistemas, como por ejemplo la infraestructura de transporte y distribución de energéticos. Adicionalmente, la diversificación se relaciona con la disminución de la dependencia energética (Bompard et al., 2017).
- **Expansión de suministro:** busca aumentar la oferta de energéticos para satisfacer la demanda interna y puede hacerse con recursos domésticos o extranjeros. Algunas de las formas de lograrlo pueden ser a través de contratos de largo plazo e inversiones en el en proyectos energéticos en exterior.
- **Fortalecimiento de la seguridad militar:** la infraestructura energética puede convertirse en un blanco estratégico para acciones intencionales, por lo tanto, es posible que se haga necesario el uso de acciones militares para protegerla y evitar la interrupción en

el flujo de cualquier energético. También se consideran medidas de ciberseguridad para manejar el riesgo en los flujos de información, de los cuales también depende buena parte del funcionamiento de los sistemas energéticos.

- Almacenamiento estratégico: mantener volúmenes de energéticos como reserva para atender situaciones de desabastecimiento es una medida esencial en cualquier economía. La cantidad por almacenar normalmente se establece según el promedio del consumo o el equivalente a entre 30 y 90 días de importaciones.
- Control de la demanda: la administración del lado de la demanda se da especialmente a través de medidas de eficiencia energética y la implementación de estándares de consumo. También pueden existir políticas que permitan restringir el suministro en determinadas ocasiones, como sucede con los contratos interrumpibles, en donde los despachos de energéticos pueden ser suspendidos para mantener el suministro a otros usuarios.
- Comercialización de energía: la creación de interdependencias en el suministro de energéticos permite tanto a productores como a consumidores estabilizar sus sistemas energéticos. Según sean los términos de los acuerdos comerciales, estos pueden convertirse en herramientas poderosas para garantizar la seguridad energética, dependiendo especialmente de la vigencia y de la fórmula tarifaria que establezcan.
- Integración vertical e intercambio de activos energéticos: esta herramienta promueve el intercambio mutuo de bienes energético e inversiones, con el propósito de garantizar una seguridad energética internacional, donde existan beneficios mutuos y complementariedad entre diferentes sistemas energéticos.
- Subsidios energéticos: promueve principalmente la seguridad energética desde la perspectiva de demanda, buscando garantizar que la población con más bajos recursos pueda acceder a formas modernas de energía.

## 1.4 Dimensiones de la seguridad energética

De acuerdo con las definiciones presentadas antes, es posible afirmar que la seguridad energética es un concepto multidimensional que tiene en cuenta una gran cantidad de elementos, por lo que resulta conveniente usar modelos de análisis por dimensiones que integran diversos factores en la evaluación de la seguridad energética.

### 1.4.1 Dimensiones según componentes

Los componentes más destacados en la seguridad energética están relacionados con la disponibilidad física de recursos energéticos, la capacidad de la infraestructura, la superación de barreras geopolíticas, la existencia de precios justos y asequibles y la reducción de impactos sociales y ambientales, dando como resultado las dimensiones de disponibilidad, accesibilidad, asequibilidad y aceptabilidad, usualmente conocidas como las 4 A's de la seguridad energética, por sus iniciales en inglés (Kruyt, van Vuuren, de Vries, & Groenenberg, 2009). A partir de estas dimensiones otros autores han presentado propuestas similares, partiendo de los aspectos físicos, económicos, sociales y ambientales, pero dando mayor atención a elementos como la confiabilidad y la administración de los sistemas energéticos, la productividad de la energía, la administración de la demanda, la seguridad humana, entre otros (Narula et al., 2017).

Por ejemplo, Sovacool y Mukherjee (2011) proponen cinco dimensiones de la seguridad energética basados en la recopilación de indicadores y componentes recopilados a partir de entrevistas y grupos focales con expertos en el tema. Las dimensiones se presentan a continuación:

- **Disponibilidad:** incluye todos los aspectos relacionados con la existencia de energéticos, considerando diferentes fuentes, proveedores, tecnologías y sistemas de gestión para los recursos domésticos. Dentro de esta dimensión se consideran el autoabastecimiento, la independencia energética, la seguridad de suministro y la diversidad de fuentes y proveedores.
- **Asequibilidad:** considera mecanismos de suministro de energía que buscan minimizar costos y garantizar precios justos y razonables. También considera el acceso equitativo a los servicios energéticos, acuñando el concepto de pobreza energética. En sus

componentes se encuentran la volatilidad de los precios, el acceso justo y equitativo a formas modernas de energía y la descentralización.

- Desarrollo tecnológico y eficiencia: considera la capacidad de los sistemas, la entrada de innovaciones en tecnologías energéticas y las inversiones en infraestructura para garantizar energía segura y de calidad. Sus componentes son investigación e innovación, seguridad y confiabilidad, resiliencia, eficiencia e intensidad energética, e investigación y empleos.
- Sostenibilidad ambiental y social: se relaciona con la minimización de impactos ambientales y el uso de recursos naturales en la producción y prestación de servicios energéticos. Presta especial atención en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la mitigación y adaptación al cambio climático. Sus componentes son uso de suelo y del agua, cambio climático y contaminación.
- Regulación y gobernanza: considera las políticas energéticas y su estabilidad, la transparencia en las instituciones y la existencia de mercados competitivos. Se incluyen en esta dimensión todos los asuntos geopolíticos y la seguridad de la demanda. Sus componentes son gobernanza, comercio e interconexiones regionales, competitividad de mercados y conocimiento y acceso a información.

Posteriormente, Bambawale & Sovacool (2012) presentan cuatro dimensiones, manteniendo casi inalteradas las dimensiones de disponibilidad y asequibilidad, y redefiniendo los componentes de las otras dos dimensiones:

- Disponibilidad: incorpora en esta dimensión el componente de resiliencia, en relación con la capacidad de mantener la disponibilidad de energía frente a interrupciones en los sistemas energéticos.
- Asequibilidad: ante la dificultad para definir cuál es un precio justo y razonable para la energía, centra su atención en la volatilidad de los precios.
- Eficiencia: centra su atención en la investigación y el desarrollo con el objetivo de disminuir la intensidad energética. También considera aspectos relacionados con educación para usuarios y otras medidas de administración de lado de la demanda.

- **Administración:** incluye aspectos relacionados con la mitigación y adaptación a impactos ambientales (agua, aire, suelo, clima) y con la gobernanza y la estabilidad de las políticas energéticas.

### **1.4.2 Dimensiones según evaluación de riesgos**

Las dimensiones por componente permiten involucrar gran cantidad de elementos en el análisis de los sistemas energéticos; sin embargo, pueden estar alejadas del concepto mismo de seguridad energética, el cual está fundamentado en la identificación de riesgos. Dichas dimensiones se definen a través de la clasificación de elementos observables, que no necesariamente representan las relaciones críticas de los sistemas y dejan por fuera los riesgos aun no identificados, que, aunque no son clasificables, representan grandes amenazas debido al alto grado de incertidumbre que involucran (Jewell et al., 2014).

De acuerdo con lo anterior, otros autores proponen dimensiones a partir de la identificación de riesgos, buscando hacer análisis con un enfoque sistémico; es decir, que no requiera separar el sistema en componentes para facilitar su estudio (Keppler, 2007). Por ejemplo, Cherp y Jewell (2011) proponen tres dimensiones basadas en el origen de los riesgos y en la certeza de ocurrencia de los mismos, como se presentan a continuación:

- **Soberanía:** esta dimensión surge a partir de las ciencias políticas e incluye elementos de la seguridad de suministro, principalmente en relación con el petróleo por su importancia para usos militares y de transporte. Se basa en teorías de relaciones internacionales para hacer frente a riesgos originados por agentes externos, es decir por acciones intencionales como terrorismo, o poderes del mercado que limiten los flujos de energéticos (embargos, sabotaje, etc.). Desde esta dimensión se proponen acciones relacionadas con cambio de proveedores, aumento en producción doméstica y control militar, político y económico sobre los sistemas energéticos.
- **Robustez:** surge a partir de las ciencias naturales y la ingeniería, por la necesidad de mantener en funcionamiento sistemas cada vez más sofisticados y la creciente importancia de la energía y la electricidad. Se ocupa de aspecto como crecimiento de la demanda, escasez de recursos, deterioro de la infraestructura, fallas técnicas y

ocurrencia de eventos naturales extremos, cuyos riesgos son prevenibles a través de inversiones en mejora de infraestructura, nuevas tecnologías y administración de la demanda.

- **Resiliencia:** surge de las ciencias económicas y del estudio de sistemas complejos. Considera todos los aspectos impredecibles y la no linealidad de los sistemas energéticos, los mercados y las sociedades. Ante dichas complejidades se pueden tener en cuenta riesgos como cambios regulatorios, crisis económicas, regímenes políticos, interrupciones tecnológicas y variaciones en el clima. Esta dimensión no se centra en cuantificar o minimizar riesgos, sino que trata de mejorar características generales de los sistemas (flexibilidad, adaptabilidad y diversidad), de forma que estén en capacidad de hacer frente a amenazas asociadas a riesgos aún desconocidos.

## 1.5 Transición de los sistemas energéticos

Una transición energética se entiende como el cambio en las formas de uso de la energía, que puede darse en uno o varios de los procesos que hacen parte de un sistema energético, es decir, puede incluir cambios en las fuentes primarias de energía, en los combustibles y energéticos, en la prestación de servicios energéticos y en las tecnologías que hacen uso de la energía. Los siguientes factores se consideran determinantes para el inicio de posibles transiciones energéticas (O'Connor, 2010).

- **Limitaciones en el suministro:** relacionado con el agotamiento de un recurso que pone en riesgo satisfacer parte de la demanda energética a futuro.
- **Ventaja en costos:** la energía de bajo costo permite mayores niveles de uso, lo cual se relaciona con posibles mejoras en la calidad de vida. La relación costo beneficio normalmente depende de la participación en el mercado que tengan las fuentes, los energéticos o las tecnologías.
- **Mejoras en desempeño:** considera la adquisición de beneficios diferentes a los económicos, como pueden ser la reducción en impactos ambientales y sociales, la seguridad en el uso o la facilidad en el acceso. Normalmente se relaciona con innovaciones que ofrecen mejoras en la calidad y cantidad de la energía.

- Decisiones políticas: incluyen todas las acciones tomadas por los gobiernos, como fijación de tarifas, impuestos, subsidios, inversiones en infraestructura y cualquier otro tipo de regulaciones. Estas acciones normalmente responden a satisfacer necesidades de las poblaciones y al cumplimiento de acuerdos internacionales.

Las transiciones energéticas futuras están enmarcadas en las consideraciones del desarrollo sostenible, donde se espera reducir la participación de fuentes fósiles, sin poner en riesgo el crecimiento económico global. Dicha reducción en el uso de recursos fósiles obedece a su carácter agotable y al importante porcentaje de emisiones de gases de efecto invernadero - GEI que provienen de los procesos de transformación de carbón, petróleo y gas (IEA, 2017).

Además, también se esperan cambios en las formas de acceso a los servicios energéticos y en las tecnologías de uso de energía, teniendo en cuenta que en estas etapas los usuarios pueden tomar decisiones sobre el consumo (O'Connor, 2010). Por lo tanto, aunque el aumento en la demanda energética es natural, debido al crecimiento de la población y al desarrollo económico, se espera reducir el consumo de energía per cápita gracias a mejoras en eficiencia energética y a una mayor participación de formas modernas de energía, como es la electricidad (Narula et al., 2017).

A manera de conclusión, las transiciones energéticas desde ya están encaminadas a favorecer las políticas de mitigación de cambio climático y a garantizar el acceso universal a formas modernas de energía. Los escenarios esperados por dichas transiciones pueden caracterizarse por los siguientes aspectos (Jewell et al., 2014):

- Reducción en la demanda per cápita de energía a causa de medidas de eficiencia energética, cambios en la matriz energética y rápida transformación tecnológica.
- Restricciones en suministro por mayor participación de fuentes renovables y no contaminantes, junto con medidas de captura de carbono y otras tecnologías.



- Configuración en los sistemas de transporte por el cambio en tecnologías de flota de vehículos y en patrones de movilidad. Principalmente se basa en el aumento de la movilidad eléctrica y en medidas de automatización.



## **2.Seguridad Energética en Colombia**

Este capítulo describe a grandes rasgos el contexto energético colombiano y los principales lineamientos de política energética a nivel nacional. Se analizan los flujos de energía en el balance energético nacional -BECO, los objetivos del Ideario Energético 2050 y el marco conceptual presentado anteriormente y se identifican algunos de los elementos críticos de la seguridad energética en Colombia antes de presentar el problema de investigación sobre el que se desarrollan los capítulos siguientes.

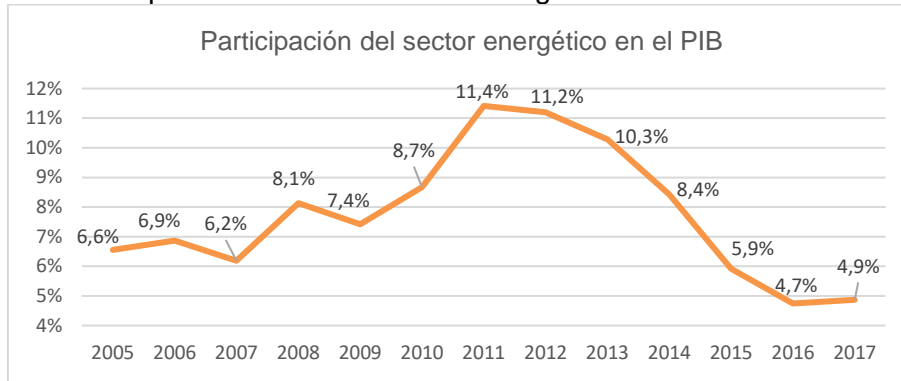
### **2.1 Contexto energético colombiano**

El sector minero-energético colombiano es un actor clave en la economía nacional, considerando que tiene una importante contribución en el Producto Interno Bruto, PIB y en la Inversión Extranjera Directa, IED, como se muestra en las Figuras 2-1 y 2-2 (Banco de la República, 2018). La mayor participación ocurrió entre 2010 y 2013 y llegó a ser el 11,4% del PIB y el 76% de la IED. A partir de 2014 esta participación se redujo de forma significativa debido a la caída de los precios del petróleo a mediados del mismo año.

Por otra parte, los combustibles y los productos energéticos de las industrias extractivas, incluyendo la electricidad, representaron cerca del 67% de las exportaciones en el 2013 y se han mantenido por encima del 50% hasta el 2017, como se observa en la Figura 2-3 (DANE, 2018). Esto implica que cerca del 69% de la producción de energía primaria en el país es destinada a exportaciones, siendo el carbón y el petróleo las dos fuentes que más contribuyen a este porcentaje (UPME, 2016).

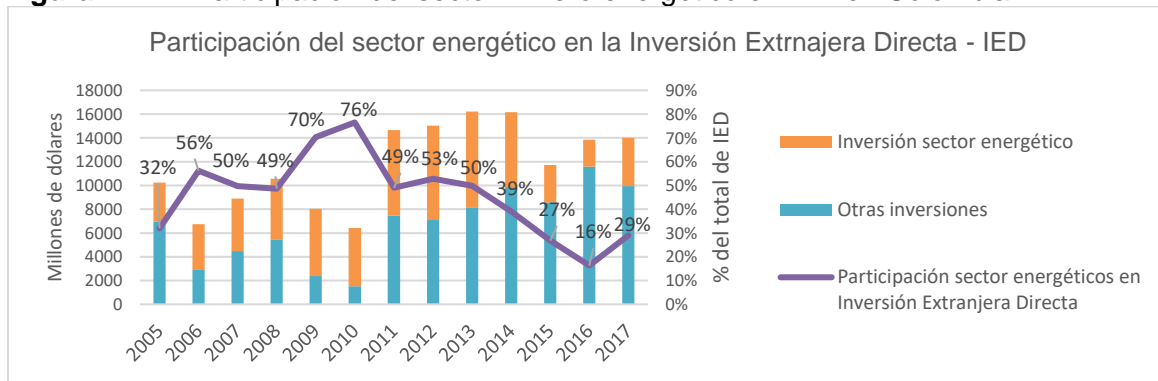
En cuanto a los ingresos corrientes del Estado, los cuales representan más del 90% del presupuesto nacional, para el 2013 cerca del 31% provinieron de dividendos, impuestos y regalías del sector energético, ratificando la importancia del sector en la economía nacional (Nieves Zárate & Hernández Vidal, 2016).

**Figura 2-1:** Participación del sector minero energético en el PIB Colombiano.



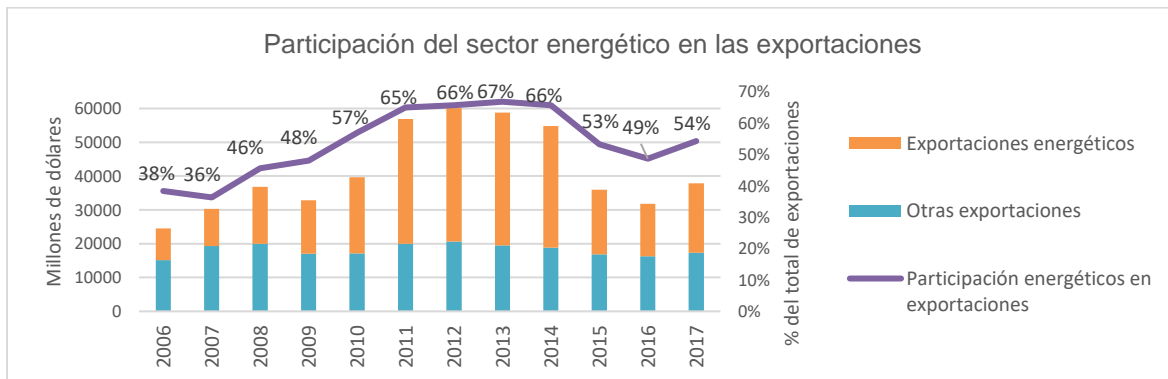
Fuente: Banco de la República (2018)

**Figura 2-2:** Participación del sector minero energético en IED en Colombia.



Fuente: Banco de la República (2018)

**Figura 2-3:** Participación del sector minero energético en las Exportaciones colombianas.



Fuente: DANE (2018)

### 2.1.1 Balance Energético Colombiano

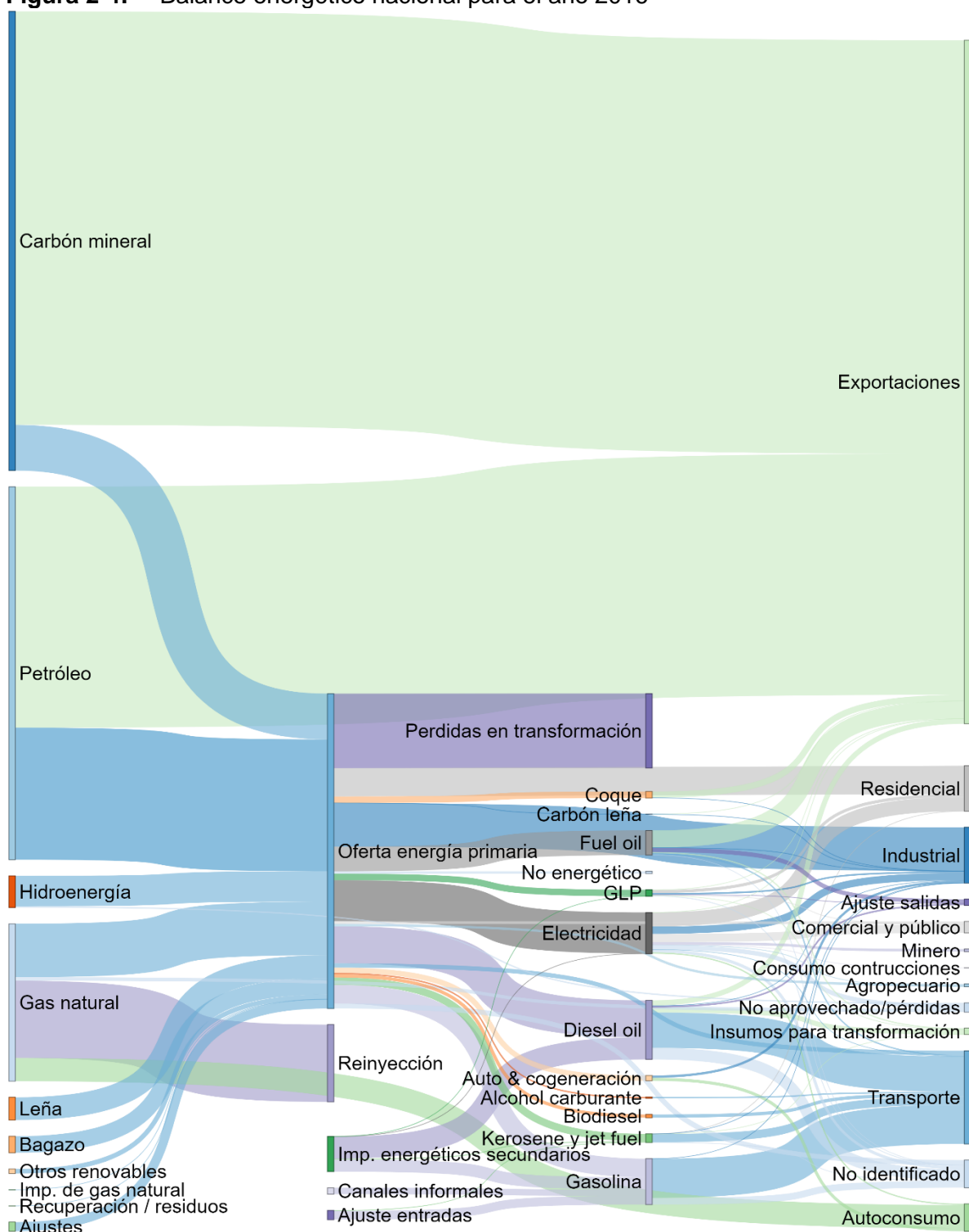
Cerca del 90% de la producción de energía primaria en Colombia proviene de carbón, petróleo y gas natural, mientras que el porcentaje restante corresponde principalmente a hidro generación, biomasa y residuos, y en proporciones mucho menores se encuentran otras fuentes renovables como energía solar y eólica, además de la producción de alcohol carburante y biodiésel. Sin embargo, teniendo en cuenta que tan solo el 31% de la producción de energía primaria en Colombia es destinada para uso doméstico, en términos de consumo, solo el 72% de la energía es de origen fósil y se destina principalmente para los sectores transporte e industria y en una menor proporción para generación de electricidad (Nieves Zárate & Hernández Vidal, 2016)

En cuanto a los energéticos secundarios, la energía eléctrica, el diésel, el fuel oil y las gasolinas son los principales productos obtenidos a partir de la transformación de energéticos primarios, con el 13%, 12%, 8% y 6%, respectivamente. A pesar de que la producción de energía primaria es muy superior a la demanda interna, Colombia debe importar gas natural y productos derivados del petróleo, estos últimos para ser mezclados con la producción nacional de combustibles y alcanzar los estándares de calidad establecidos en el país. Adicionalmente, existen importaciones de energía eléctrica en temporadas de sequía debido a la disminución del potencial hidroeléctrico (UPME, 2016).

El consumo energético en Colombia ha crecido de acuerdo con el aumento de la población y la actividad productiva. En el 2016 la demanda total de energía fue de 513.988 TJ, creciendo un 12.4% con respecto al año 2010. El diésel, la gasolina y la electricidad son los energéticos más usados, teniendo en cuenta que la mayor parte de la demanda proviene del sector transporte, con cerca del 45%, seguido por los sectores industrial y residencial con el 22% y el 19%, respectivamente.

La Figura 2- 4 presenta los flujos de energía en Colombia para el año 2016, teniendo en cuenta la producción de energía primaria, los procesos de transformación a energéticos secundarios, las importaciones, las exportaciones, las pérdidas y los diferentes usos finales según los sectores económicos, mostrando claramente que Colombia es un país exportador de energía, principalmente de origen fósil (carbón y petróleo).

**Figura 2-4:** Balance energético nacional para el año 2016

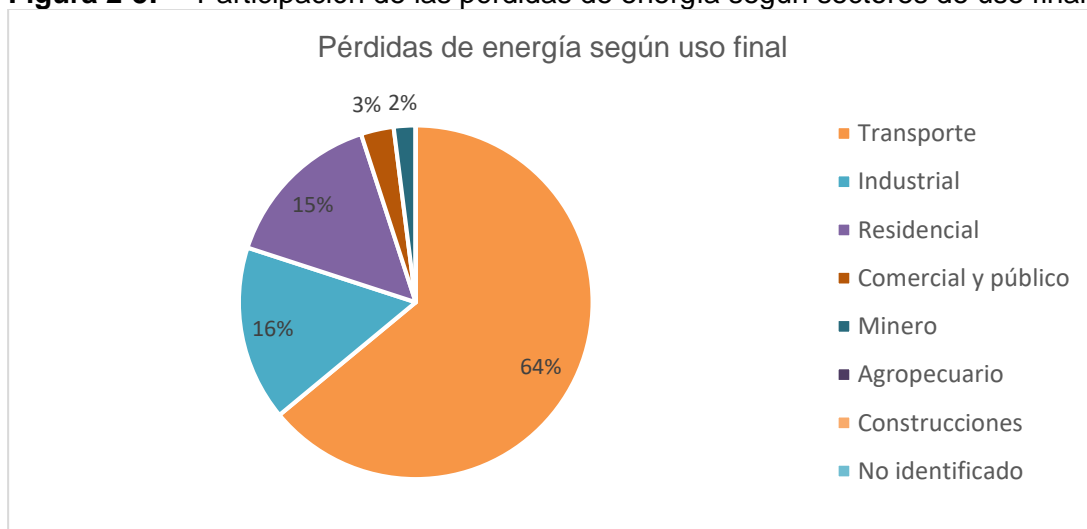


Fuente: (UPME, 2018a)

El subsector del petróleo y los combustibles líquidos, el cual representan gran parte del consumo final de energía, se presenta en la Figura 2-6, donde se evidencia un gran flujo hacia exportaciones principalmente de petróleo crudo y en menores proporciones de sus combustibles derivados. También es posible evidenciar que la demanda interna de combustibles se satisface en gran proporción a través de importaciones las cuales son cerca del 41% de la oferta interna para el caso del diésel y del 26% en la gasolina. De igual forma, también se observa que el diésel, la gasolina, el kerosene y el jet fuel son los combustibles de mayor consumo, principalmente por parte del sector transporte y en el caso del diésel y el fuel oil, también son usados como insumos de transformación para generación de electricidad en centrales térmicas.

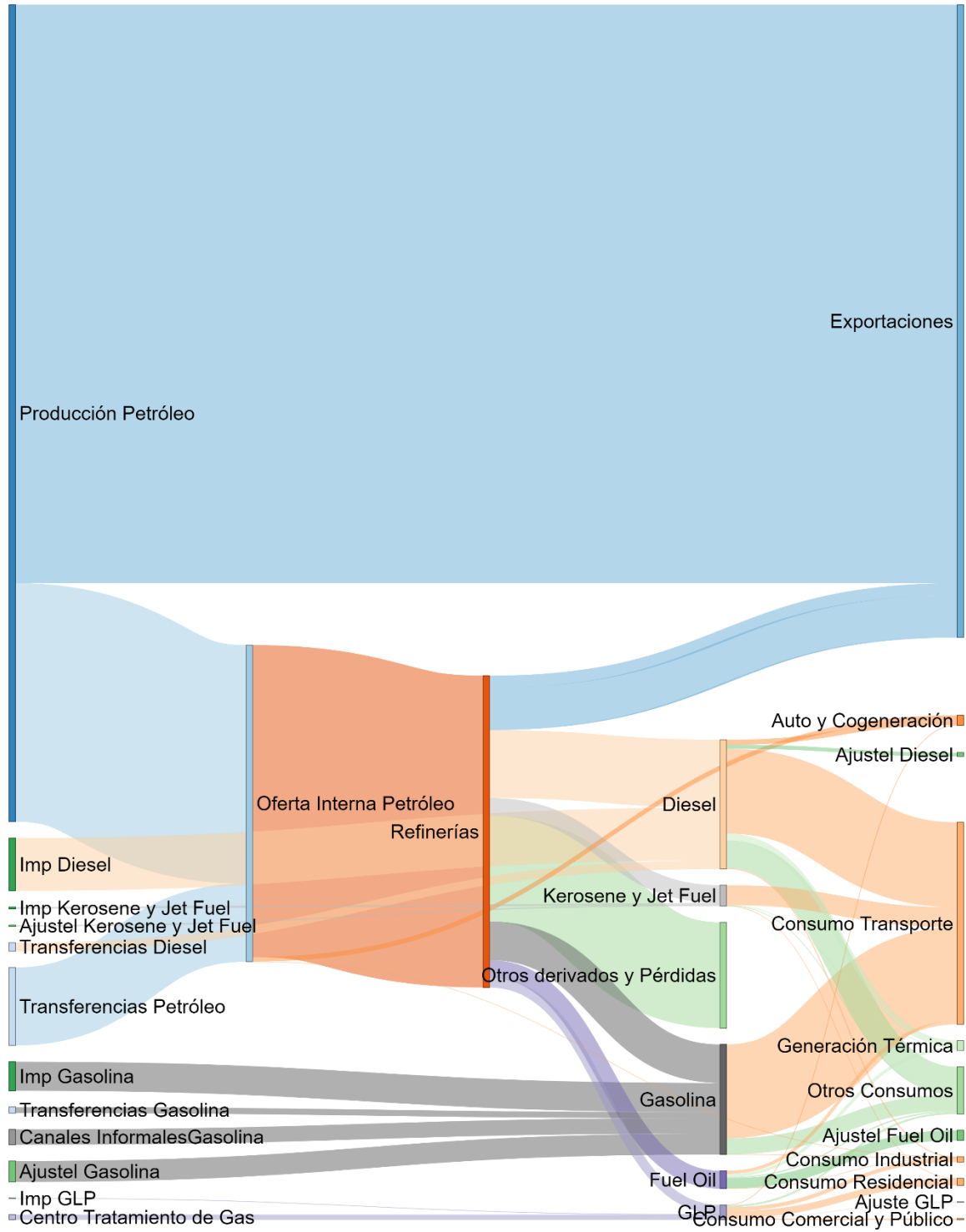
En cuanto a la eficiencia energética, se estima que tan solo el 48% del consumo nacional corresponde a energía útil, lo cual implica que las pérdidas de energía, y por lo tanto económicas, son considerablemente altas. Este hecho deja claro que existe un gran potencial respecto a mejoras en eficiencia para el sistema energético colombiano, especialmente en el sector transporte, al cual se le atribuye el 65% de las pérdidas, seguido por el sector industrial y residencial con el 16% y 15%, respectivamente, como se presentan en la Figura 2-5 (UPME, 2016).

**Figura 2-5:** Participación de las pérdidas de energía según sectores de uso final



Fuente: UPME (2016)

**Figura 2-6:** Balance del subsector del petróleo y los combustibles líquidos para el año 2016



Fuente: (UPME, 2018a)



## 2.1.2 Política Energética Colombiana

La política energética colombiana está dirigida al aprovechamiento sostenible de los recursos energéticos, al suministro de energía de forma eficiente y segura, al desarrollo de la competitividad del sector productivo y a la generación de valor para la población (UPME, 2015a).

Más allá de las expectativas de crecimiento económico nacional y el contexto energético internacional, la política energética en Colombia debe hacer frente a retos relacionados con mantener la inversión en el subsector de petróleo y gas, superando la caída de los precios de petróleo a mediados del 2014 y los riesgos relacionados con ataques a la infraestructura energética a causa de los grupos armados ilegales (Nieves Zárate & Hernández Vidal, 2016).

El Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 estableció algunos objetivos para el fortalecimiento de la industria energética los cuales incluyen: el uso responsable de los recursos de hidrocarburos, la diversificación y el fortalecimiento del mercado del gas natural, el suministro seguro de combustibles y biocombustibles y el aumento en el acceso y la calidad de la energía. Algunas de las estrategias establecidas para cada uno de los subsectores se presentan a continuación (Nieves Zárate & Hernández Vidal, 2016):

### ▪ **Hidrocarburos:**

- Aumentar las reservas probadas de petróleo y gas natural mediante el aprovechamiento del potencial costa afuera, la explotación de yacimientos no convencionales y técnicas de recobro mejorado de los campos existentes.
- Mantener inversiones, reservas y producción, adaptando los contratos de petróleo y gas a los precios bajos.
- Promover inversiones en exploración y explotación de hidrocarburos mediante incentivos fiscales.
- Mejorar las condiciones de seguridad nacional.

### ▪ **Gas natural**

- Ampliar el uso de GLP.
- Construir plantas de regasificación para importar el gas natural.

- Explotar el metano de los yacimientos de carbón.
- Explorar posibilidad de importación de gas.
- Promover la competencia en el mercado de gas natural.
  
- **Combustibles y Biocombustibles**
  - Aumentar la capacidad de las refinerías para aumentar el uso del crudo pesado y producir más combustible.
  - Mejorar la infraestructura energética para importar combustibles cuando la producción doméstica no tenga la suficiente demanda.
  - Desincentivar el consumo de diésel y gasolina.
  - Aumentar el uso de Biocombustibles.
  
- **Electricidad**
  - Aumentar el acceso y la calidad de la electricidad.
  - Fortalecer la generación de electricidad basada en energías renovables no convencionales.
  - Promover la eficiencia energética.
  - Promover interconexiones internacionales.
  
- **Carbón**
  - Aumentar la producción anual.
  - Delimitar áreas estratégicas para desarrollar proyectos de minería y energía a través de la ejecución de contratos con inversionistas.
  
- **Energías Renovables**
  - Aumentar la capacidad instalada de energías renovables no convencionales, especialmente en zonas no interconectadas.
  - Diseñar una estrategia de baja producción de carbono y reducción de emisiones de gases.

Por otra parte, la Unidad de Planeación Minero-Energética -UPME, desarrolló el Ideario Energético 2050 como Plan Energético Nacional en el largo plazo. Dicho documento establece 5 objetivos específicos y 2 transversales como lineamientos de la política energética colombiana (UPME, 2015a):

- Objetivo 1: orientado a la oferta energética, en particular a alcanzar un suministro confiable y diversificar la canasta de energéticos. Igualmente busca que la infraestructura de transporte asociada esté disponible y se integre de manera armónica en los ecosistemas y sociedades y tenga en cuenta el cambio técnico.
- Objetivo 2: busca promover la gestión eficiente de la demanda en todos los sectores e incorporar tecnologías de transporte limpio. Con este objetivo se busca reducir la intensidad energética del país, contribuyendo así al desarrollo bajo en carbono. Las medidas encaminadas a mejorar la eficiencia energética permiten simultáneamente mejorar la confiabilidad del suministro y mitigar el impacto ambiental de la explotación, generación y transporte de la energía.
- Objetivo 3: encaminado a mejorar la equidad energética del país, busca avanzar en la universalización y asequibilidad del servicio de energía, en la medida que aún hay regiones del país que no cuentan con un suministro continuo de energéticos.
- Objetivo 4: su finalidad es estimular las inversiones en interconexiones internacionales y en infraestructura para la comercialización de energéticos estratégicos, para robustecer el suministro energético interno y mejorar la competitividad del país.
- Objetivo 5: orientado a maximizar la contribución del sector energético colombiano a las exportaciones, a la estabilidad macroeconómica, a la competitividad y al desarrollo del país. Se tiene la firme convicción de que las cadenas de valor alrededor de la explotación energética son un camino mediante el cual se pueden superar los problemas de pobreza y fragmentación social de algunas regiones del país.
- Objetivo 6: encaminado a crear vínculos entre la información, el conocimiento, la innovación en el sector energético para la toma de decisiones y a disponer del capital humano necesario para su desarrollo.
- Objetivo 7: tiene como fin contar con un Estado más eficiente, actualizar y modernizar los marcos regulatorios sectoriales, así como atender los retos ambientales y sociales,

para facilitar la adopción y desarrollo de los cambios técnicos y transaccionales enunciados.

## **2.2 Índices de seguridad energética para Colombia**

El estado de la seguridad energética puede ser evaluado utilizando diferentes tipos de indicadores, además también es posible reunir varios indicadores cuantitativos para obtener un índice de seguridad energética, facilitando la comprensión de la información y la comparación de los resultados entre diferentes sistemas en estudio, o para un mismo sistema en un horizonte de tiempo. Diferentes organizaciones han desarrollado índices globales de seguridad energética y varios de ellos han incluido al sistema energético colombiano dentro de su análisis, a continuación se mencionan los más representativos.

### **2.2.1 Índice de Energía Choiseul**

Evalúa anualmente la competitividad energética en 146 países, donde para el 2016 Colombia ocupó la posición número 10, entrando dentro del grupo de los países con mejor desempeño. El índice integra 5 indicadores relacionados con fuentes de energía primaria, 4 con electricidad, 4 aspectos ambientales y 3 más que hacen referencia a interrupciones, retardos en prestación de servicios y el ambiente para la generación de negocios (Institut Choiseul & KPMG, 2016). En cuanto a Colombia, se destaca:

- Calidad de la matriz energética: ocupando la posición 2 en esta categoría, se reconoce el alto grado de independencia energética y una participación de fuentes relativamente balanceada.
- Calidad, disponibilidad y acceso de la electricidad: en la posición 70, se identifican deficiencias en infraestructura y por consiguiente un retraso en el acceso con calidad a formas modernas de energía en algunas regiones del país.
- Impacto ambiental: ocupando la posición 32, se resalta la alta participación de generación hidroeléctrica y el uso de biocombustibles; sin embargo, falta inversión en las fuentes renovables de energía y estrategias para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

### **2.2.2 Índice de Desempeño Global de Arquitectura Energética**

Considera el comportamiento y las tendencias de los sistemas energéticos en 127 países a partir de 18 indicadores en tres ejes temáticos: contribución al desarrollo y al crecimiento económico, acceso y seguridad energética y sostenibilidad ambiental. Para el 2017 Colombia se encuentra en el octavo lugar, siendo el primer país americano en la clasificación (Institut Choiseul & KPMG, 2016). Este índice reconoce que Colombia cuenta con buenos niveles de autosuficiencia y con diversidad de fuentes para el suministro; sin embargo, debe trabajar en la reducción de emisiones y en aumentar la entrada de fuentes renovables. Por otra parte, se reconoce que a pesar de ser un país exportador neto de energía el PIB per cápita sigue siendo bajo, lo cual implica que la riqueza en recursos energéticos no necesariamente está contribuyendo al desarrollo económico y social de la nación.

### **2.2.3 Índice del Trilema Energético**

Este índice monitorea la sostenibilidad de los sistemas energéticos de 123 países, buscando evaluar el balance que cada uno de ellos tiene en relación con tres dimensiones: equidad energética, seguridad energética y sostenibilidad ambiental (World Energy Council, 2017). Para este índice Colombia se encuentra en la posición 45, destacando los siguientes aspectos:

- **Equidad energética:** se requiere expandir la cobertura de servicios energéticos, principalmente a través de soluciones descentralizadas, como lo es la generación distribuida y el uso de fuentes no convencionales. Por otro lado, también se destaca la importancia de combatir la corrupción y avanzar en los procesos de paz para lograr promover la inversión, reducir la desigualdad y generar desarrollo.
- **Seguridad energética:** ante la gran participación de generación hidroeléctrica, existe factores de riesgo relacionados con la disponibilidad de agua y con cambios climáticos que pueden afectar la oferta energética.
- **Sostenibilidad ambiental:** teniendo en cuenta el potencial de energía eléctrica en el país, se considera prioritaria la electrificación de la flota de transporte con el fin de

aumentar la eficiencia energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

## 2.3 Problema de Investigación

Considerando que para varios de los objetivos del PEN existen planes de acción indicativos donde se establecen metas cuantitativas y plazos de cumplimiento, es evidente que habrá impactos sobre la seguridad energética; sin embargo, resulta difícil cuantificarlos debido a que no existe un consolidado del estado de seguridad energética en Colombia, tal y como se evidencia el resultado de la investigación del Convenio de Ciencia y Tecnología entre la Unidad de Planeación Minero Energética y el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Sector Eléctrico (UPME & CIDET, 2017), en donde se presenta un concepto homologado de la seguridad energética para el país, pero no se consideran modelos de análisis que permitan conocer su estado actual o futuro.

Existen algunas contribuciones puntuales a la seguridad energética por acciones como la entrada de energías renovables variables al país (Paredes & Ramírez, 2017), pero no hay trabajos académicos que permitan tener un panorama más amplio de cuáles serían las implicaciones de los planes y las políticas energéticas nacionales sobre la seguridad energética.

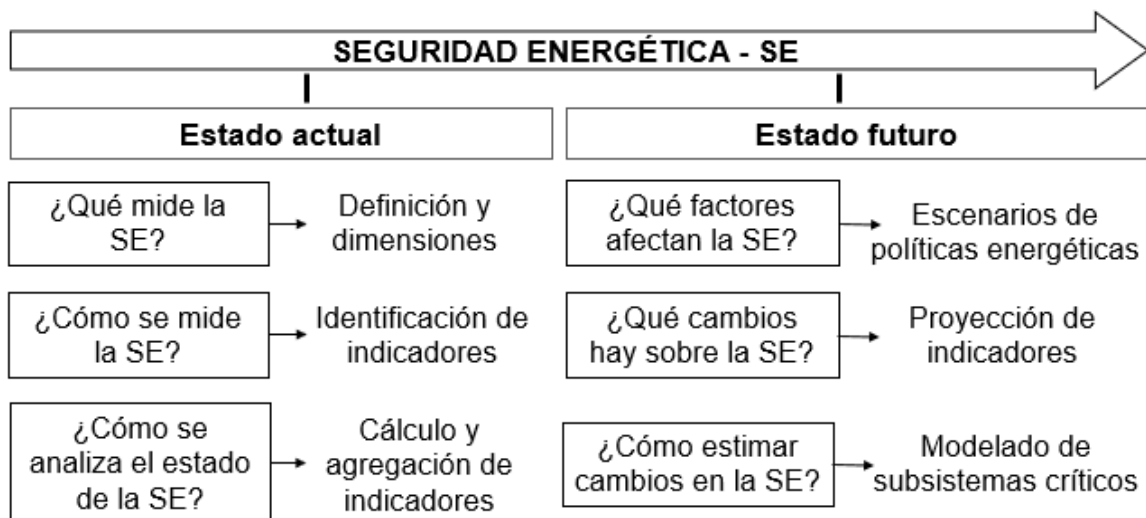
Teniendo en cuenta que el subsistema del petróleo y los combustibles líquidos es fundamental en el contexto colombiano, debido a su participación en la contribución económica del sector energético y al porcentaje de la demanda energética que satisface, es posible considerarlo como un sistema crítico que debe ser estudiado de forma independiente con el fin de avanzar en la consolidado del estado de seguridad energética en Colombia.

De acuerdo con las consideraciones anteriores y la información recopilada a través de la revisión de literatura, de las políticas energéticas nacionales y de las tendencias energéticas globales, el problema de investigación establecido en esta investigación es el análisis de la seguridad energética en la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia, considerando los efectos que tienen sobre esta las políticas energéticas en

el largo plazo como el Plan Energético Nacional y el Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética.

La Figura 2-7 presenta algunas de las preguntas de investigación que orientan el objetivo general y los objetivos específicos, estableciendo una clara diferenciación entre el análisis del estado actual de la seguridad energética y el estado futuro debido a la puesta en marcha de políticas energéticas que afecten los subsistemas críticos.

**Figura 2-7:** Preguntas de investigación en relación con estado actual y futuro de la seguridad energética.



### 2.3.1 Objetivo general

Evaluar el estado actual de la seguridad energética de la cadena de suministro del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia y el estado posible de la seguridad energética en los escenarios propuestos por el Plan Energético Nacional a 2050.

### 2.3.2 Objetivos específicos

- Comparar las diferentes aproximaciones al concepto de seguridad energética a partir de la revisión de literatura e identificar cuáles se ajustan al contexto colombiano.

- Identificar las dimensiones de la seguridad energética y los indicadores que permitan caracterizar de forma integrada el estado de la seguridad energética de la cadena de suministro del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia.
- Calcular indicadores que permitan evaluar aspectos de la sostenibilidad en la seguridad energética de la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia.
- Construir un modelo para evaluar el impacto del Plan Energético Nacional sobre la seguridad energética de la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia, especialmente por el cambio propuesto en los patrones de consumo de combustibles por parte del sector transporte.

La tabla 2-1 presenta el enfoque metodológico para el cumplimiento de los objetivos específicos, estableciendo nuevamente la diferenciación entre el estudio del estado actual y el estado futuro de la seguridad energética. La caracterización del estado actual de la seguridad energética se desarrolla en el capítulo 3, donde se estudia el subsistema del petróleo y los combustibles líquidos, además de los indicadores de la seguridad energética para dicho subsistema; la identificación de retos en la seguridad energética se aborda en el capítulo 4, en relación con la sostenibilidad en la seguridad energética; y finalmente la caracterización del estado futuro se presenta en el capítulo 5, con el análisis del impacto de políticas para el sector transporte en la seguridad energética.

**Tabla 2-1:** Enfoque metodológico para el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

Cadena de suministro del petróleo y los combustibles líquidos	Objetivos	Estado actual	Estado futuro
	Caracterización estado de seguridad energética	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cálculo de indicadores de estado.</li> <li>- Agregación de indicadores por dimensiones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelo de análisis de escenarios de políticas.</li> <li>- Proyección de indicadores en subsistemas críticos</li> </ul>
Identificación de retos en la seguridad energética	Propuesta de indicadores para aspectos sin considerar en la seguridad energética: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Factores externos a la cadena de suministro.</li> <li>- Búsqueda de fuentes de información.</li> <li>- Retos de sostenibilidad en la cadena.</li> </ul>		



## 2.4 Definición de seguridad energética para Colombia

La UPME y el CIDET presentan una definición homologada de seguridad energética para Colombia, obtenida a partir de la revisión sistemática de literatura académica y la participación de expertos en temas energéticos a través de talleres en diferentes ciudades del país (UPME & CIDET, 2017). La definición allí propuesta se centra en satisfacer las necesidades energéticas de forma confiable, accesible, asequible y aceptable social y ambientalmente, evaluando cada uno de estos aspectos a partir de la identificación multisectorial de riesgos y la definición de sistemas críticos.

Partiendo de la definición anterior y considerando las diferentes aproximaciones teóricas al concepto de seguridad energética, el contexto energético colombiano y los perfiles presentados para el país en los índices globales, la definición de seguridad energética ajustada al caso colombiano propuesta en este documento es el estado de baja vulnerabilidad o probabilidad de daño de los sistemas energéticos críticos, de forma que se garantice mantener el balance entre la oferta y la demanda de energía, tanto interna como externa, considerando:

- Disponibilidad: entendida como suficiencia en fuentes primarias y secundarias, donde se espera incluir mayor participación de fuentes renovables no convencionales para alcanzar mayor cobertura de acceso a formas modernas de energía.
- Accesibilidad: en relación con el funcionamiento de infraestructura de abastecimiento (transporte y transformación), buscando garantizar la descentralización y la flexibilidad de los sistemas energéticos críticos.
- Asequibilidad: fundamentada en mantener la competitividad del mercado energético, de forma que existan precios estables para la energía y se garanticen ganancias para toda la cadena, contribuyendo al desarrollo económico del país.
- Aceptabilidad: por un lado, dirigida al aumento en la eficiencia energética y a la electrificación, de forma que se garantice una disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero, al igual que el uso responsable de los recursos energéticos y naturales. Por otro lado, también se ocupa del fortalecimiento de la institucionalidad,

de forma que se haga frente a los riesgos relacionados con la paradoja de la abundancia de recursos y con el conflicto armado en Colombia.

Esta definición utiliza el enfoque de minimización de riesgos presentado por Cherp y Jewell (2014), pero incorpora las dimensiones de disponibilidad, aceptabilidad, asequibilidad y aceptabilidad relacionándolas con las etapas de la cadena de suministro, similar a como es propuesto por Sun, Liu, Chen y Li (2017). El enfoque hacia la seguridad de la cadena de suministro es fundamental, teniendo en cuenta que, a pesar de ser un país exportador, Colombia no puede centrar su atención exclusivamente en la seguridad de demanda, pues se enfrenta a grandes retos para garantizar el suministro continuo de energía a nivel interno, principalmente por la deficiencia en infraestructura y el aislamiento de algunas regiones del país debido a la geografía o factores relacionados con el conflicto.

## **3. Subsistema del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia**

Este capítulo describe el subsistema del petróleo y los combustibles líquidos, presentando las generalidades de cada uno de los eslabones de la cadena de suministro en el caso colombiano. Posteriormente se presentan los criterios para priorizar los indicadores a ser usados en la evaluación de la seguridad energética en el subsistema de estudio, estableciendo las fuentes de información y sus valores para el periodo entre los años 2010 y 2016.

### **3.1 Cadena del petróleo y sus derivados**

La cadena del petróleo y sus derivados tradicionalmente se ha dividido en tres grandes eslabones: *upstream*, donde se incluye la exploración, producción y transporte del petróleo crudo; *midstream*, dedicado a los procesos de transformación en refinerías y *downstream*, conformado por los procesos de transporte, almacenamiento y distribución de los productos derivados del petróleo, hasta su puesta en el mercado para el consumo final (Lima et al., 2016).

En Colombia el Gobierno Nacional se hace responsable de garantizar el abastecimiento de hidrocarburos y de que ocurran las actividades de refinación, transporte y distribución de combustibles en el país, haciendo frente a situaciones de hecho o de carácter normativo que dificulten la disponibilidad y el suministro de este tipo de energéticos (UPME, 2018c). A continuación, se presentan cada uno de los eslabones de la cadena en el contexto colombiano.

### 3.1.1 Exploración y producción

En Colombia el *upstream* se da mediante contratos de Evaluación Técnica, que buscan determinar el potencial de recursos de hidrocarburos, y contratos de Exploración y Producción, en donde el contratista es dueño de los derechos de producción de los recursos, pero debe hacer el pago de regalías y un pago adicional a la ANH si hay lugar a ganancias adicionales según los precios de referencia (ANH, 2018a).

Sin embargo, El Artículo 58 del Código de Petróleos establece que se debe garantizar el volumen de petróleo necesario para satisfacer la demanda interna de derivados (UPME, 2018c), por lo tanto, los contratistas deben ofrecer en venta las cantidades establecidas por la ANH, entidad que tiene a cargo la función del abastecimiento nacional de hidrocarburos y de establecer los precios para el petróleo destinado a refinación interna. Adicionalmente, la Ley de Uso Racional y Eficiente de la Energía (Ley 697 de 2001) establece que la totalidad del petróleo explotado en el territorio nacional y conservado para uso doméstico debe ser destinado para abastecer las refinerías.

En relación con la infraestructura de transporte de petróleo crudo, existen diferentes modos como tuberías, camiones tanque, ferrocarril y barcasas. El sistema de oleoductos se ha desarrollado principalmente a partir de la ubicación de grandes reservas de hidrocarburos, de las refinerías en funcionamiento y de los puertos de exportación (UPME, 2018c).

La caída de los precios del petróleo a mediados de 2014 redujo considerablemente la inversión en exploración y producción - E&P, impidiendo la incorporación de nuevas reservas y el sostenimiento de los niveles de producción alcanzados en los últimos años. La reducción de los presupuestos también ha afectado la expansión de la infraestructura de transporte y la competitividad de la industria petrolera, que también se ve ampliamente influenciada por los conflictos sociales y la falta de claridad y agilidad en los procesos normativos del país.

### 3.1.2 Refinación

En Colombia las refinerías de Barrancabermeja y Cartagena aportan gran parte de la producción de derivados en el país. Además de tener menores capacidades, las refinerías de Apiay, Orito y Yopal, no cuentan con la infraestructura para obtener productos

combustibles que cumplan con las características de calidad requeridas en el país (UPME, 2018c).

La refinería de Barrancabermeja es la más grande y abastece cerca del 70% de la demanda nacional de combustibles; sin embargo, tiene restricciones para el procesamiento de crudos pesados, los cuales son el grueso de la producción local (UPME, 2018c). Este hecho representa bajos rendimientos y una mínima obtención de derivados con mayor valor agregado. La inversión en modernización ha permitido que en los últimos años se obtengan combustibles con mejores condiciones de calidad y que se aumente el porcentaje de obtención de destilados medios

La refinería de Cartagena se caracteriza por contar con facilidades portuarias para la salida e ingreso de productos refinados, pero su principal ventaja es la capacidad de procesar crudos pesados con alto contenido de azufre. La entrada en funcionamiento de esta refinería ha permitido obtener compuestos livianos con menor contenido de contaminantes, cumpliendo con la regulación establecida de menos de 10 ppm de azufre en el caso del diésel y de 300 ppm para la gasolina (UPME, 2018c).

Además del petróleo crudo, las refinерías también reciben como insumo las importaciones de gasolina, diésel y jet fuel para ser mezcladas con la producción interna y mejorar la calidad de los combustibles. Por otro lado, paralelo a la refinación, en Colombia se producen biocombustibles con el fin de diversificar la canasta energética y mejorar la competitividad de los derivados en términos ambientales. El refinador entrega el diésel con una mezcla de biodiésel de entre 2% y 4%, que luego deber ser completada por los distribuidores mayoristas hasta alcanzar el 10% (B10); en el caso de la gasolina, la mezcla con etanol se realiza completamente en las planas de abastecimiento hasta alcanzar el 8% (E8) en promedio (UPME, 2018c).

### **3.1.3 Distribución y consumo de productos derivados**

Las refinерías deben mantener almacenado lo equivalente al menos a 20 días de su producción de combustibles; garantizado esto, el resto de la producción es enviada a puertos de exportación, a centros de almacenamiento ubicados en los nodos terminales de las redes de transporte, o a plantas de abastecimiento. Los distribuidores mayoristas

también deben disponer en todo momento de una capacidad almacenada correspondiente al 30% del volumen mensual de despachos, mientras que las plantas de producción de biocombustibles deben mantener un inventario suficiente para cubrir lo equivalente a 10 días de demanda (UPME, 2018c). Sin embargo, se considera necesario aumentar la capacidad de almacenamiento principalmente cerca a los centros de consumo, de forma que permita hacer frente a fallas o interrupciones en el transporte o en el funcionamiento de las refinerías.

Respecto al transporte de combustibles, la red de poliductos se encarga de distribuir simultáneamente, mediante baches, la producción de las refinerías hacia los centros de abastecimiento que se encuentran ubicados cerca de las zonas de mayor consumo. Desde ahí los productos son transportados por camiones tanque hasta los puntos de distribución minorista.

Los precios de la gasolina, el diésel, el GPL y el keroseno se encuentran sometidos a control, internalizando los costos de producción, transporte y distribución, además de los impuestos. También se encuentran influenciados por la cotización de los precios de los combustibles en el mercado de la Costa del Golfo, por lo tanto, la tasa de cambio también se convierte en un factor determinante para el precio final.

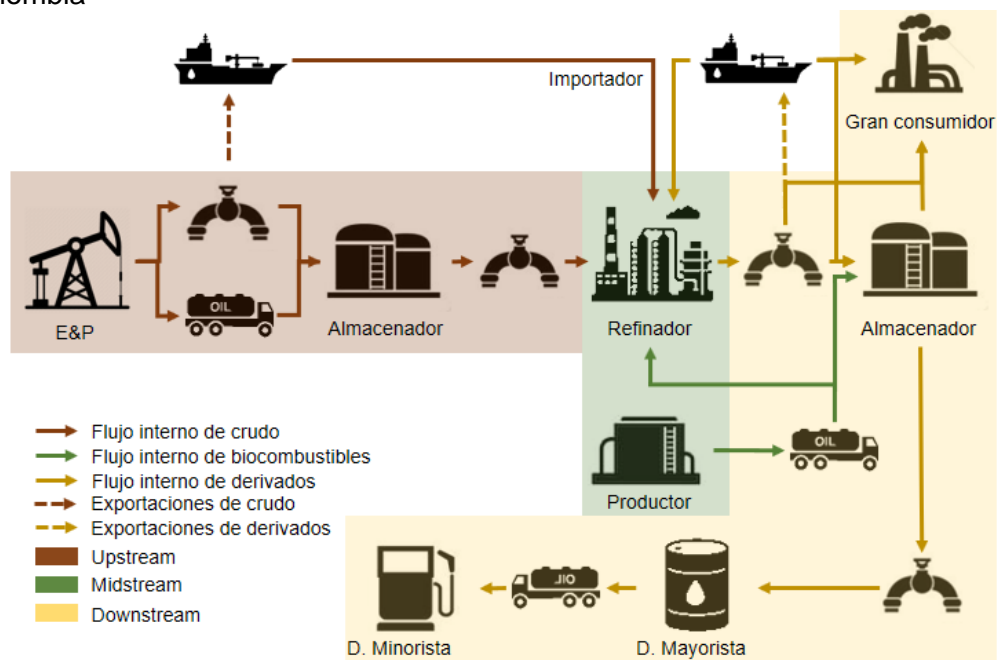
### **3.1.4 Agentes de la cadena**

En Colombia el MME reconoce los agentes de la cadena de distribución de combustibles líquidos como se describe a continuación y se representa en la Figura 3-1 (SICOM & MME, 2015):

- Productores de alcohol carburante y biodiésel: abastecen a los agentes refinador y distribuidor mayorista. Pueden exportar en la medida en que se garantice el abastecimiento interno y también pueden dedicar su infraestructura a productos alternativos (azúcar y aceite de palma), sacrificando la producción de biocombustibles.
- Refinador: abastece a los distribuidores mayoristas, grandes consumidores y distribuidores minoristas (aviación y marítima).

- Importador: abastece a los agentes refinador, distribuidor mayorista, gran consumidor y distribuidor minorista (aviación y marítima).
- Almacenador: presta servicios de arrendamiento a los agentes importador, refinador, distribuidor mayorista, gran consumidor y distribuidor minorista (aviación y marítima).
- Distribuidor mayorista: realiza el abastecimiento a los agentes distribuidor mayorista, gran consumidor y distribuidor minorista.
- Distribuidor minorista: conformado por las estaciones de servicio automotriz, fluvial y comercializador Industrial quienes se abastecen del distribuidor mayorista, y estaciones de servicio de aviación y marítima quienes se abastecen del distribuidor mayorista, importador y refinador.
- Gran consumidor: con un consumo medio mensual mayor a 20.000 galones para uso propio. Se abastece de los agentes importador, refinador y distribuidor mayorista.

**Figura 3-1:** Flujo de petróleo y combustibles líquidos en la cadena de abastecimiento en Colombia



Fuente: adaptado de SIMCOM (2015)

Finalmente, la Tabla 3-1 presenta el número de agentes autorizados por el MME y el SICOM para integrar la cadena de abastecimiento de combustibles líquidos, donde el mayor número de agentes corresponde a las estaciones de servicio (distribuidores minoristas), mientras que el número de refinadores permanece constante y los productores e importadores varían muy poco en el transcurso de un año.

**Tabla 3-1:** Agentes de la cadena de distribución de combustibles en Colombia (SICOM & MME, 2015)

Tipo de agente	Número de agentes	
	2016	2017
Importador	5	8
Refinador	7	7
Productor	12	17
Almacenador	40	42
Distribuidor mayorista	18	20
Gran consumidor	247	384
Distribuidor minorista	5167	5369
<b>Total</b>	<b>5496</b>	<b>5847</b>

### 3.2 Indicadores de seguridad energética

Para terminar de caracterizar la cadena del petróleo y sus derivados en Colombia, es necesario estimar las capacidades de cada uno de los agentes, de forma que pueda saber si responden efectivamente a las necesidades de sistema energético nacional, especialmente en términos de la demanda, para lo cual resulta útil el uso de indicadores.

Los indicadores permiten recrear una visión sistémica de la seguridad energética al cuantificar las particularidades de cada uno de los sistemas en estudio. A través de su cambio en el tiempo, los indicadores permiten ver relaciones entre componentes y modelar escenarios futuros; por lo tanto, son un insumo fundamental para la elaboración de políticas energéticas y planes de manejo del riesgo (Cherp & Jewell, 2011).

Sin embargo, los indicadores también presentan limitaciones; por un lado, no siempre permiten la comparación de resultados entre diferentes sistemas, pues no todos se evalúan con las mismas métricas; y por otro lado, pueden ser altamente intensivos en información



para ser monitoreados y para que sirvan como herramienta para la toma de decisiones, por lo tanto, un indicador es significativo en el análisis de la seguridad energética si cumple las siguientes características (Jewell et al., 2014):

- Pertinencia: debe haber una clara relación entre componentes, actores y problemáticas vigentes o históricas de los sistemas energéticos o de las políticas energéticas.
- Generalidad: deben ser aplicables a sistemas energéticos futuros, los cuales pueden ser considerablemente distintos a los actuales.
- Confiabilidad: deben ser calculados completamente con la información disponible.
- Relevancia: cada indicador debe ser aportante, es decir, cada uno debe entregar algún tipo de información adicional a la que ya han aportado otros indicadores.
- Tendencia deseable: para cada indicador debe conocerse cuál es el comportamiento deseable de forma que aporte a un mejor estado de seguridad energética.

Según el método de cálculo, los indicadores pueden clasificarse en tres categorías: simples o puntuales, los cuales normalmente cuantifican flujos; compuestos o derivados, en donde se relacionan varias métricas para dar información más precisa a nivel sectorial o geográfico; y temporales, los cuales usan medidas históricas principalmente para representar relaciones de cambio (Hughes, 2012). Las medidas puntuales y derivadas permiten hacer comparaciones entre el estado y las metas o estándares de un sistema, mientras las medidas temporales permiten alimentar modelos de escenarios futuros.

Respecto a las categorías temáticas de los indicadores, pueden relacionarse fácilmente con algunas de las dimensiones según los componentes de los sistemas energético; las más recurrentes se presentan a continuación (Sovacool & Mukherjee, 2011):

- Estimación de recursos y reservas.
- Tasas de conversión de reservas a producción.
- Porcentaje de participación de energéticos con cero emisiones.
- Dependencia de importaciones.
- Indicadores de riesgo político.
- Precios de energéticos.
- Participación de cada energético en el mercado total.
- Intensidad energética.
- Inversiones en investigación y desarrollo energético.

Respecto a la información que brindan, los indicadores pueden clasificarse de la siguiente forma (Bompard et al., 2017):

- Indicadores de estado de la seguridad energética (continuos): buscan principalmente informar sobre el estado del sistema y permitir análisis y comparaciones de escenarios futuros. Normalmente presentan cambios graduales y responden a medidas de mediano y largo plazo; por lo tanto, no requieren monitoreo tan frecuente.
- Indicadores de riesgo (estáticos): en la mayoría de estos indicadores se espera un comportamiento casi estático o cambios dentro de un rango específico, pues sirven de señales para identificar amenazas de corto plazo sobre el sistema. Al estar relacionados con interrupciones que involucran un alto grado de incertidumbre, suelen requerir monitoreo continuo en cortos periodos de tiempo.

### **3.2.1 Indicadores para el subsistema del petróleo y combustibles líquidos**

Sovacool y Mukherjee (2011) presentan un extenso listado de indicadores de seguridad energética, obtenido a partir de cerca de 68 entrevistas con expertos de importantes agencias y organizaciones relacionados con asuntos energéticos, 70 encuestas enviadas a expertos miembros de institutos de investigación en energía y de los resultados obtenidos en un taller con la participación de otros 37 expertos. Además, también incluyeron la revisión de literatura académica y el análisis de los indicadores usados en los índices de seguridad energética más reconocidos. Teniendo en cuenta la dimensión del trabajo realizado por Sovacool y Mukherjee, es posible considerar las más de 320 métricas propuestas por ellos como insumo para identificar los indicadores que mejor permitan evaluar el estado de la seguridad energética de la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia.

Como primer filtro para seleccionar los indicadores que pueden ser tenidos en cuenta para esta investigación, a pesar de que el listado mencionado antes se encuentra dividido en 5 dimensiones y 20 componentes, se propone una reclasificación relacionando cada indicador con una actividad o agente dentro de la cadena de abastecimiento de petróleo y los combustibles líquidos, de forma que se garantice su pertinencia. La Tabla 3-2 presenta

40 indicadores obtenidos del ejercicio de reclasificación, indicando a que dimensión de seguridad energética corresponden, teniendo en cuenta la propuesta del capítulo anterior para el contexto colombiano.

**Tabla 3-2:** Indicadores de seguridad energética para la cadena del petróleo y los combustibles líquidos.

Dimensión	Componente	Indicador	Relación con cadena de suministro	Dimensión contexto colombiano
Disponibilidad	Producción y seguridad de suministro	Reservas totales de petróleo	E&P	Disponibilidad
		Producción de petróleo	E&P	Disponibilidad
		Oferta interna total de petróleo	E&P	Disponibilidad
		Auto abastecimiento de petróleo	E&P	Disponibilidad
		Relación reservas/ producción de petróleo	E&P	Disponibilidad
		Promedio de capacidad de recobro de petróleo	E&P	Disponibilidad
		Perforación de pozos exploratorios	E&P	Disponibilidad
		Almacenamiento estratégico de petróleo	Almacenamiento	Accesibilidad
		Capacidad de refinación	Refinación	Accesibilidad
		Producción de combustibles y biocombustibles	Refinación/ Producción	Disponibilidad
	Dependencia	Importaciones de petróleo	Importación	Accesibilidad
		Relación importaciones /exportaciones petróleo	Importación/ Exportación	Accesibilidad
		Balanza comercial relacionada con petróleo	Importación/ Exportación	Asequibilidad
	Diversificación	Índice Shannon - Wiener para suministros de petróleo	E&P	Disponibilidad
		Participación de combustibles para en el sector transporte	Uso final	Accesibilidad
		Dispersión geográfica de facilidades de combustibles	Distribución	Accesibilidad
Vehículos con flexibilidad de combustibles		Uso final	Accesibilidad	
Asequibilidad	Estabilidad de precios	Precio de combustibles	Distribución	Asequibilidad
		Volatilidad de precios del petróleo	E&P	Asequibilidad
		Volatilidad de precios de combustibles	Distribución	Asequibilidad
		Importaciones de combustibles	Importación	Accesibilidad
Eficiencia y confiabilidad	Seguridad y confiabilidad	Accidentes operacionales en la industria	Refinación/ Transporte	Accesibilidad
		Ataques intencionales contra la infraestructura	Refinación/ Transporte	Aceptabilidad

Dimensión	Componente	Indicador	Relación con cadena de suministro	Dimensión contexto colombiano
Eficiencia e intensidad energética		Uso de reservas estratégicas	Refinación/ Distribución	Accesibilidad
		Intensidad energética	Uso final	Accesibilidad
		Rendimiento promedio de combustible en vehículos	Uso final	Accesibilidad
Sostenibilidad ambiental y social	Agua	Uso de agua para producción de petróleo	E&P	Aceptabilidad
		Uso de agua para refinación de petróleo	Refinación	Aceptabilidad
	Cambio climático	Participación de biocombustibles	Refinación/ Distribución	Aceptabilidad
		Emisiones de GEI por producción y uso de energía	Refinación/ Uso final	Aceptabilidad
	Polución y contaminación	Emisiones de material contaminante	Uso final	Aceptabilidad
		Derrames de petróleo y combustibles	Toda la cadena	Aceptabilidad
Regulación y gobernanza	Gobernanza	Ingresos gubernamentales dependientes del petróleo y los combustibles	E&P/ Exportaciones	Asequibilidad
		Cambios en la regulación relacionada con petróleo y combustibles	Toda la cadena	Aceptabilidad
	Comercio y conectividad	Exportaciones de petróleo	Exportaciones	Asequibilidad
		Exportaciones de combustibles	Exportaciones	Asequibilidad
		Ganancias por exportaciones de petróleo y combustibles	Exportaciones	Asequibilidad
		Contratos firmados en la industria del petróleo y combustibles	E&P/ Exportaciones	Asequibilidad
		Inversión extranjera en industria del petróleo y combustibles	E&P	Asequibilidad
	Competitividad y mercados	Participación de las principales productoras de petróleo	E&P	Disponibilidad

Fuente: adaptada de Sovacool y Mukherjee (2011).

### 3.2.2 Priorización de indicadores

La confiabilidad en el cálculo de indicadores está relacionada con disponibilidad de información consistente y periódica, por lo tanto, la existencia de fuentes de información de calidad sirve como otro de los criterios para priorizar el uso de algunos indicadores. En el caso del subsistema del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia, la información se encuentra distribuida en diferentes fuentes oficiales como:

- Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME: como entidad adscrita al MME es la encargada de publicar el Balance Energético Nacional, los Boletines Estadísticos de Minas y Energía, y de administra el Sistemas de Información Minero Energético Colombiano -SIMEC, dentro del cual se encuentra el Sistema de Información de Petróleo y Gas -SIPG. En sus diferentes publicaciones es posible encontrar información relacionada con reservas, producción y consumo de energéticos.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos - ANH: como encargada de garantizar el suministro de hidrocarburos tiene la información detallada de la producción fiscalizada de crudo, especificando los volúmenes obtenidos en cada uno de los campos y por las diferentes compañías operadoras.
- Ecopetrol: de carácter mixto y vinculada al MME, es la principal compañía encargada de exploración, explotación, refinación, transporte, almacenamiento, distribución de petróleo y sus derivados. CENIT, empresa encargado de logística de transporte de hidrocarburos y Bioenergy, empresa productora de etanol, son filiales de Ecopetrol. A través de sus portales de atención al ciudadano es posible obtener información relacionada con accidentes operacionales, atentados contra la infraestructura, consumo de agua, calidad de combustibles y capacidad de transporte por tuberías.
- Sistema de Información de Combustibles Líquidos - SICOM: esta entidad se encarga de coordinar los diferentes agentes de la cadena de abastecimiento de combustibles, por lo tanto, cuenta con bancos de información sobre inventarios y volúmenes despechados por cada uno de los agentes; sin embargo, la información no se encuentra pública.
- Fedebiocombustibles y Asocaña: estas dos entidades reúnen a los productores de alcohol carburante y biodiésel en Colombia, poniendo a disposición información relacionada con áreas sembradas, plantas de procesamiento y volúmenes producidos y comercializados en el mercados nacional e internacional.

- Departamento Nacional de Estadísticas - DANE: es la entidad gubernamental encargada de la información estadística, entregando reportes históricos de aspectos demográficos, comercio exterior y cuentas ambientales.
- Banco de la Republica: como banco central de Colombia, ofrece estadísticas sobre temas económicos, incluyendo la inversión extranjera en cada uno de los diferentes sectores.

Teniendo en cuenta que se pretende conocer el estado de la seguridad energética de la cadena del petróleo y los combustibles líquidos, además de evaluar el posible impacto de políticas energética en el mediano y largo plazo, los indicadores seleccionados deben ser continuos, de forma que puedan ser medidos con periodicidad anual. A partir de estos nuevos criterios y ajustando las métricas a la información disponible y al contexto colombiano, la Tabla 3-3 presenta el resultado del ejercicio de priorización de indicadores, donde se encuentran clasificados por las dimensiones propuestas para el contexto colombiano y se especifican sus unidades, fuentes de información, riesgos asociado y tendencia esperada en el aumento de la seguridad energética.

**Tabla 3-3:** Indicadores priorizados para la cadena de suministro del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia.

Dimensión	Número	Indicador	Unidad	Fuente	Riesgo	Tendencia esperada
Disponibilidad	1	Reservas totales de petróleo	Bbl	SIPG	Agotamiento de recursos	Aumento
	2	Producción doméstica de petróleo	Bbl	SIPG	Agotamiento de recursos	Aumento
	3	Oferta interna total de petróleo	Bbl	BECO	Agotamiento de recursos	Aumento
	4	Auto suministro de petróleo	%	BECO	Dependencia energética	Aumento
	5	Relación reservas/ producción de petróleo	Años	SIPG	Agotamiento de recursos	Aumento
	6	Pozos exploratorios perforados (A-3)	#	SIPG	Disminución de inversión/ Agotamiento de recursos	Aumento
	7	Sísmica exploratoria	Km	SIPG	Disminución de inversión/	Aumento

Dimensión	Número	Indicador	Unidad	Fuente	Riesgo	Tendencia esperada
					Agotamiento de recursos	
	8	Diversidad de productores de petróleo - compañías operadoras	--	ANH	Dependencia energética	Aumento
	9	Diversidad de productores de petróleo - campos	--	ANH	Dependencia energética	Aumento
	10	Diversidad de productores de petróleo - departamentos	--	ANH	Dependencia energética	Aumento
	11	Producción doméstica de combustibles	Toe	BECO	Desbalance oferta/demanda	Aumento
	12	Producción de biocombustibles	Toe	BECO	Desbalance oferta/demanda	Aumento
Accesibilidad	13	Carga a refinерías	Bbl/día	Ecopetrol SIPG	Capacidad instalada	Aumento
	14	Importaciones de petróleo	Bbl	BECO	Capacidad instalada	Disminución
	15	Importaciones de combustibles	Toe	BECO	Capacidad instalada	Disminución
	16	Importaciones de biocombustibles (etanol)	Lt	Asocaña	Capacidad instalada	Disminución
	17	Diversidad de combustibles para el sector transporte	--	BECO	Cambio tecnológico	Aumento
	18	Intensidad de combustibles y biocombustibles	Toe	BECO	Desbalance oferta/demanda	Disminución (per cápita)
Asequibilidad	19	Volatilidad precio internacional del petróleo	USD/Bbl	EIA	Estabilidad del mercado	Disminución
	20	Volatilidad precio promedio al consumidor de la gasolina	\$COP/gal	SIPG	Estabilidad del mercado	Disminución
	21	Volatilidad precio promedio al consumidor del diésel	\$COP/gal	SIPG	Estabilidad del mercado	Disminución
	22	Inversión extranjera en la industria del petróleo	USD	BanRep	Estabilidad del mercado	Aumento
	23	Contratos de asociación vigentes	#	ANH	Estabilidad del mercado	Aumento
	24	Contratos de E&P y TEA firmados	#	ANH	Estabilidad del mercado	Aumento
	25	Contratos de E&P y TEA vigentes	#	ANH	Estabilidad del mercado	Aumento
Aceptabilidad	26	Agua usada para producción de petróleo	m <sup>3</sup>	Ecopetrol	Agotamiento de recursos naturales	Disminución
	27	Agua usada para producción de combustibles en refinерías	m <sup>3</sup>	Ecopetrol	Agotamiento de recursos naturales	Disminución
	28	Volumen de hidrocarburos derramados	Bbl	Ecopetrol	Contaminación de ecosistemas	Disminución
	29	Incidentes operacionales con riesgo ambiental	#	Ecopetrol	Contaminación de ecosistemas	Disminución

Dimensión	Número	Indicador	Unidad	Fuente	Riesgo	Tendencia esperada
	30	Atentados contra infraestructura del petróleo y los combustibles	#	Ecopetrol	Disrupciones en el suministro	Disminución
	31	Participación de biocombustibles en el consumo del sector transporte	%	BECO	Emisiones de GEI	Aumento
	32	Emisiones de CO <sub>2</sub> por uso de combustibles	Ton	BECO	Emisiones de GEI	Disminución

Fuente: elaboración propia

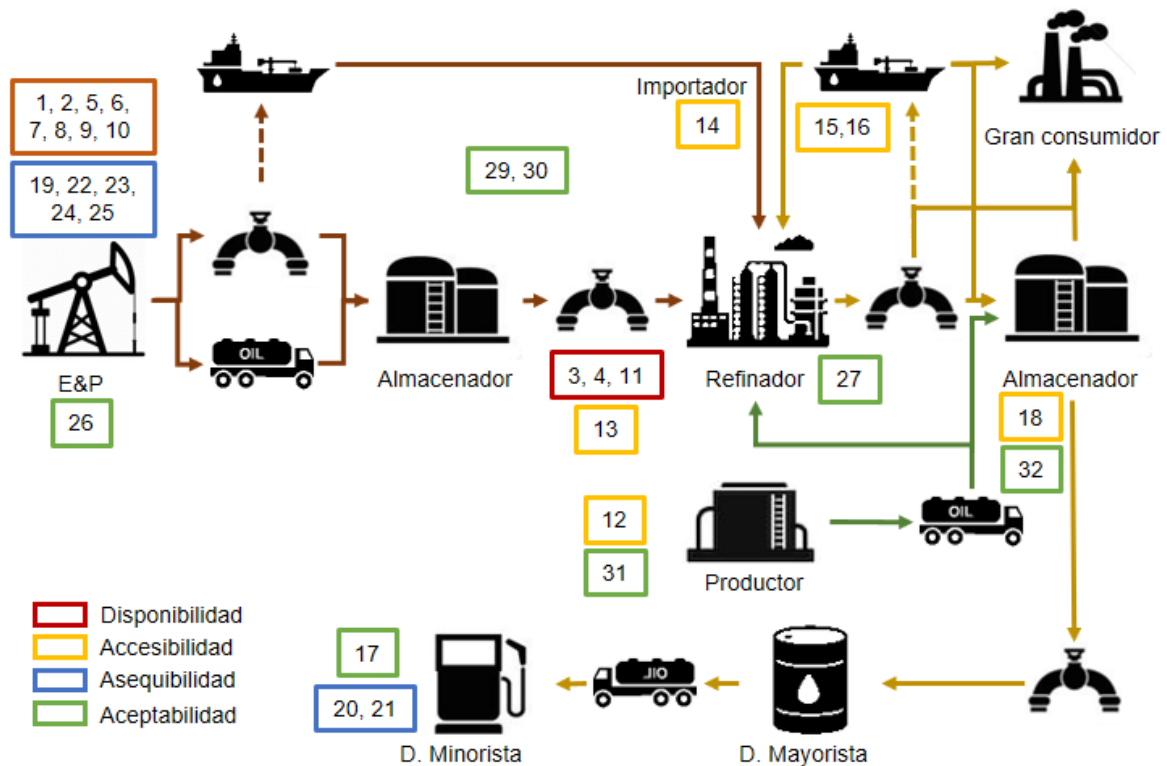
Como es de esperarse, gran parte de los indicadores están asociados a la exploración, producción y exportación de petróleo crudo, especialmente los relacionados con la seguridad de suministro de petróleo como energético primario (disponibilidad) y con la seguridad de demanda para a seguridad la estabilidad del mercado (asequibilidad). En relación con la seguridad de suministro y de demanda de energéticos secundarios, también existen algunos indicadores relacionados con los flujos de entrada y salida de refinerías y con el mercado de combustibles en los distribuidores minoristas, respectivamente.

Los indicadores de accesibilidad se relacionan en su totalidad con infraestructura de producción y demanda de combustibles y biocombustibles. Es de resaltar que los indicadores de importaciones se clasifican como de accesibilidad, teniendo en cuenta que las importaciones responden a las deficiencias en la capacidad instalada de refinación y no a la indisponibilidad de recursos domésticos. No se consideran indicadores relacionados con la infraestructura de transporte y almacenamiento debido a la dificultad en el acceso a información y a que, para el caso de almacenamiento, las capacidades se encuentran establecidas para cada uno de los agentes de la cadena de abastecimiento según el MME (UPME, 2018c).

Finalmente, los indicadores de aceptabilidad están distribuidos entre toda la cadena del petróleo y los combustibles, incluso siendo algunos de ellos aplicables a cualquier actividad o agente. La Figura 3-2 muestra la relación entre los indicadores, las dimensiones de la seguridad energética y la cadena de suministro del petróleo y los combustibles líquidos.



**Figura 3-2:** Ubicación de los indicadores de seguridad energética en el subsistema del petróleo y los combustibles líquidos



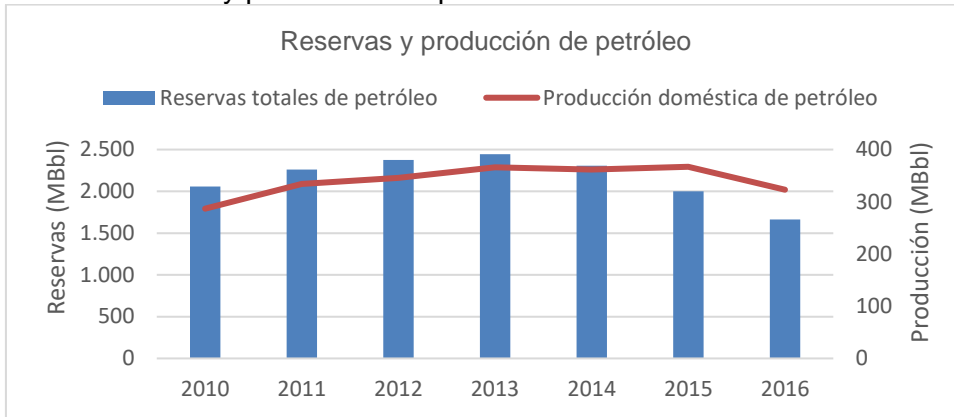
Fuente: elaboración propia

### 3.2.3 Cálculo de indicadores

La mayoría de los indicadores propuestos pueden ser obtenidos para el periodo entre 2010 y 2016, tomando la información directamente de la fuente y tan solo unos pocos requiere el uso de cálculos adicionales. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para todos los indicadores propuestos, mostrando su tendencia y el procedimiento de cálculo en caso de ser necesario.

- Reservas y producción de petróleo (indicadores 1 y 2):

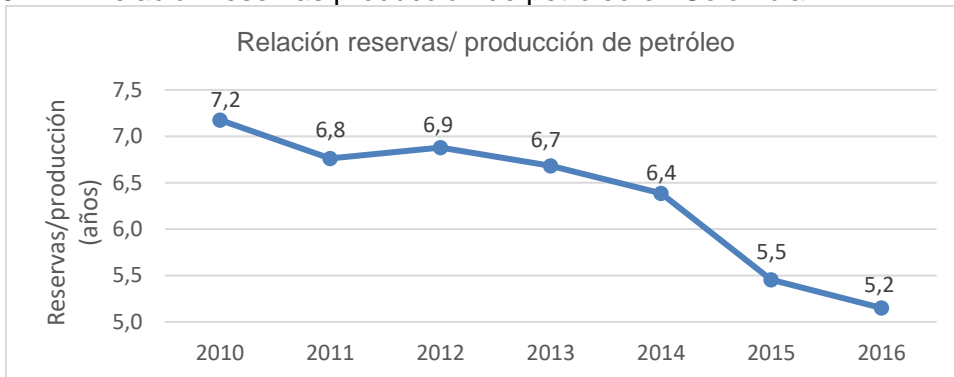
Obtenidos directamente de las estadísticas del SIPG (UPME, 2018e), se observa como ambos indicadores presentan un comportamiento similar, incrementando entre el 2010 y el 2013 y disminuyendo desde ese año hasta el 2016, contrario a la tendencia esperada en el aumento de la seguridad energética. La Figura 3-3 muestra en el eje vertical izquierdo las reservas y en el derecho la producción, ambas en millones de barriles.

**Figura 3-3:** Reservas y producción de petróleo en Colombia

Fuente: SIPG (2018).

- Relación reservas/producción de petróleo (indicador 5)

Este indicador estima el tiempo que durarían las reservas de petróleo (Figura 3-4), suponiendo que no existieran nuevos descubrimientos y que la tasa de producción permaneciera constante. Se obtiene al dividir las reservas totales de petróleo sobre la producción anual.

**Figura 3-4:** Relación reservas producción de petróleo en Colombia

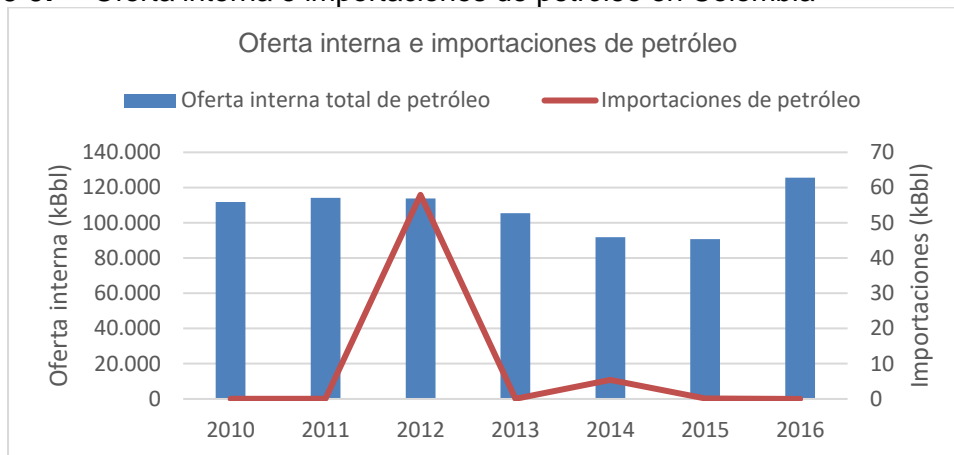
Fuente: SIPG (2018).

- Oferta interna e importaciones de petróleo (indicadores 3 y 14)

La oferta interna de petróleo es obtenida a partir de la producción doméstica, las importaciones y los ingresos por transferencias, menos las exportaciones y las pérdidas. La Figura 3-5 muestra la información obtenida del BECO (UPME, 2018a), donde la oferta interna (eje vertical izquierdo) tiene un aumento considerable en el año 2016 luego de estar disminuyendo año a año. En cuanto a las importaciones (eje vertical derecho), en el 2012

se evidencia un pico; sin embargo, en todos los años los volúmenes importados son menores en tres órdenes de magnitud que la oferta interna de petróleo.

**Figura 3-5:** Oferta interna e importaciones de petróleo en Colombia



Fuente: BECO (2018).

- Auto abastecimiento de petróleo (indicador 4)

Corresponde al porcentaje de la oferta interna de energía obtenida a partir de recursos domésticos. La Tabla 3-4 muestra que la auto suficiencia de petróleo en Colombia es casi del 100% en todo el periodo de estudio, debido a la diferencia en tres órdenes de magnitud que se mencionó antes entre los volúmenes importados y la totalidad de la oferta interna.

**Tabla 3-4:** Auto abastecimiento de petróleo en Colombia

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
% Auto abastecimiento	100	100	99,95	100	99,99	100	100

Fuente: BECO

- Perforación de pozos exploratorios y sísmica exploratoria (indicadores 6 y 7)

Estos indicadores son obtenidos de la ANH (ANH, 2018b) y dan información respecto a la inversión en actividad exploratoria de hidrocarburos. La Figura 3-6 muestra en el eje vertical izquierdo el número de pozos exploratorios perforados y en el derecho la adquisición de sísmica exploratoria, evidenciando una disminución en ambos casos a partir del 2014.

**Figura 3-6:** Pozos exploratorios y actividad sísmica exploratoria en Colombia

Fuente: ANH

- Diversificación de productores de petróleo (indicadores 8, 9 y 10)

La diversidad suele medirse a través del índice Shannon Weiner, el cual considera la participación  $p$  de un agente en  $i$  en un mercado (Kruyt et al., 2009), como se presenta en la ecuación (3.1):

$$H = -\sum_i p_i \ln p_i \quad (3.1)$$

Donde  $H$  es el índice Shannon Weiner, que toma valores de cero en adelante y entre mayor sea, mayor será la diversidad. Este indicador suele aplicarse para medir diversidad de proveedores, pero en el caso colombiano resulta útil medir la diversidad en la producción de petróleo considerando las empresas operadoras, los campos y los departamentos en donde se da la producción. Las participaciones en el mercado para cada uno de los casos son obtenidas a partir de los reportes de producción fiscalizada entregados por la ANH, disponibles entre los años 2013 y 2017.

La Figura 3-7 muestra los resultados obtenidos para el índice Shannon Weiner, evidenciando que la producción de petróleo se encuentra concentrada en pocos departamentos del país; sin embargo, está distribuida en un número mayor de campos, pero siguen siendo unos pocos los que tienen grandes participaciones de la producción total. Respecto a las compañías operadoras, el índice muestra que en los últimos años la producción de petróleo se ha concentrado aún más en pocas empresas, acorde con la tendencia de otros indicadores donde se muestra menor actividad a partir del año 2013.

**Figura 3-7:** Índice Shannon Weiner para la producción de petróleo en Colombia

Fuente: ANH (2018b).

- Producción doméstica de combustibles y biocombustibles (indicadores 11 y 12)

A partir de la información suministrada en el BECO es posible obtener la producción total de combustibles (diésel, gasolina, fuel oil, kerosene y jet fuel) y biocombustibles (etanol y biodiésel) en unidades de energía (toneladas equivalentes de petróleo). La Figura 3-8 muestra que la producción de combustibles (eje vertical izquierdo) también tuvo una disminución en el año 2014; sin embargo, no se observa una tendencia estable; mientras que en los biocombustibles (eje vertical derecho) se observa un crecimiento sostenido hasta 2015, con una pequeña disminución en el 2016.

- Carga a refinerías (indicador 13)

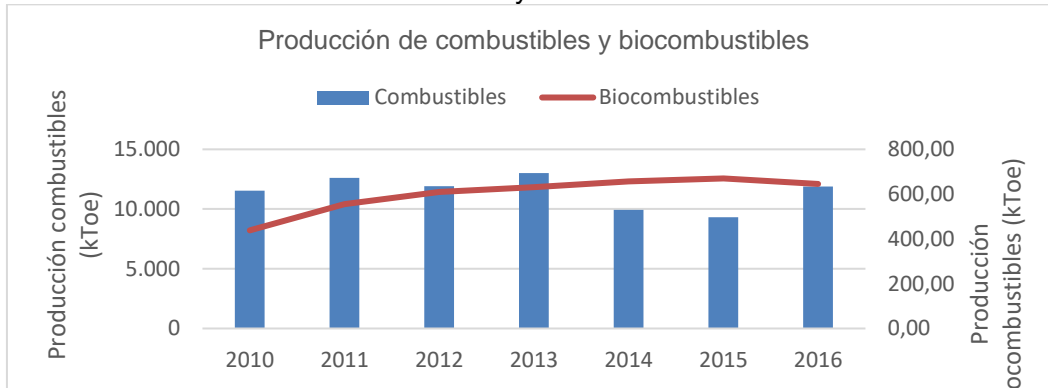
Este indicador está dado por la cantidad de petróleo que llega diariamente a las refinerías y refleja la capacidad de procesamiento de los crudos domésticos, como se muestra en la Figura 3-9, donde en 2016 hay un aumento evidente debido a la entrada en funcionamiento del total de la capacidad de la refinería de Cartagena.

- Consumo e importaciones de combustibles y biocombustibles (indicadores 15, 16 y 18)

Las importaciones de combustibles abastecen una parte importante del consumo nacional, como se evidencia en la Figura 3-10, donde aumenta el consumo y las importaciones de combustibles (eje vertical izquierdo), y las importaciones de etanol (eje vertical derecho). Por otro lado, la Figura 3-11 muestra la participación de los diferentes sectores en el consumo de combustibles, confirmando que el sector transporte es quien más demanda este tipo de energéticos y que hay un crecimiento en la participación del uso para

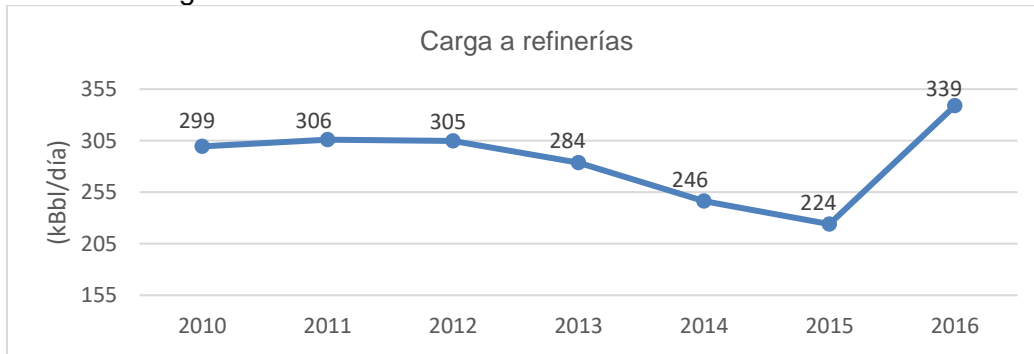
generación eléctrica (eje vertical izquierdo). También se muestra el aumento sostenido en de consumo per cápita (eje vertical derecho).

**Figura 3-8:** Producción de combustibles y biocombustibles en Colombia



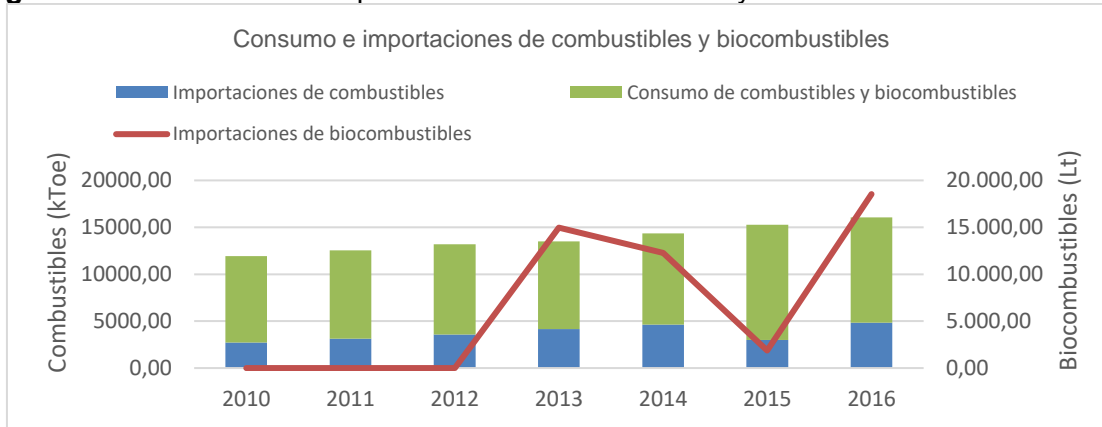
Fuente: BECO (2018).

**Figura 3-9:** Carga a refinerías en Colombia

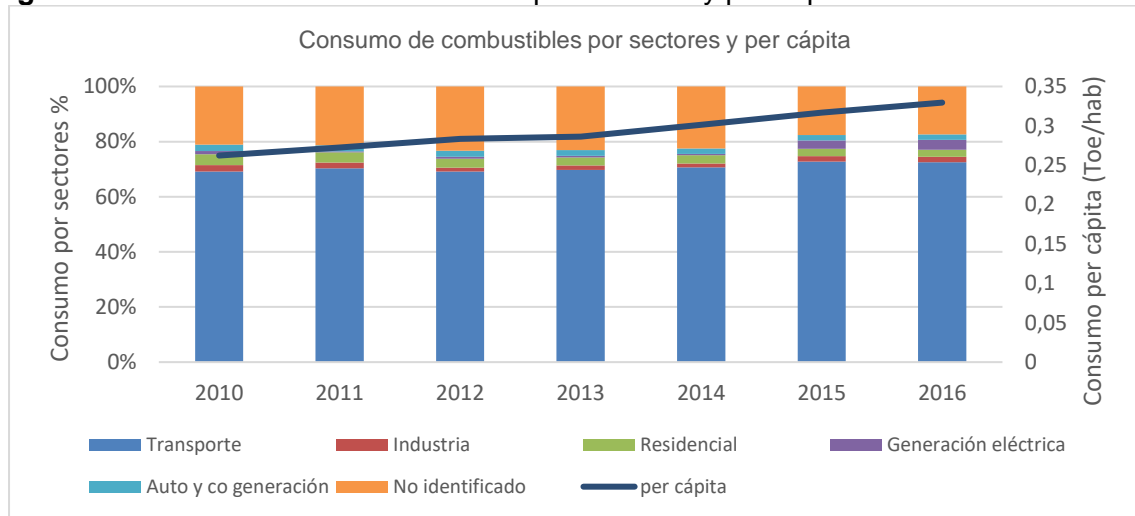


Fuente: SIPG (2018).

**Figura 3-10:** Consumo e importaciones de combustibles y biocombustibles en Colombia



Fuente: BECO (2018).

**Figura 3-11:** Consumo de combustibles por sectores y per cápita en Colombia

Fuente: BECO (2018).

- Diversidad de combustibles en el sector transporte (indicador 17)

Usando nuevamente el índice Shannon Weiner, este indicador se obtiene a partir de la participación de cada uno de los combustibles en el sector transporte. La Figura 3-12 evidencia que a pesar de que son muy pocos los combustibles disponibles, en los últimos años la participación del diésel y la gasolina ha disminuido, especialmente por el aumento en el uso de Jet Fuel por el incremento de viajes aéreos y por el uso de fuel oil para generación eléctrica.

**Figura 3-12:** Diversidad en uso de combustibles para el sector transporte en Colombia

Fuente: BECO (2018).

- Volatilidad en los precios del petróleo y los combustibles (indicadores 19, 20 y 21)

La volatilidad anual se calcula a partir de la información de todos los cambios de precios ocurridos en el año, utilizando la ecuación (3.2) para calcular su varianza:

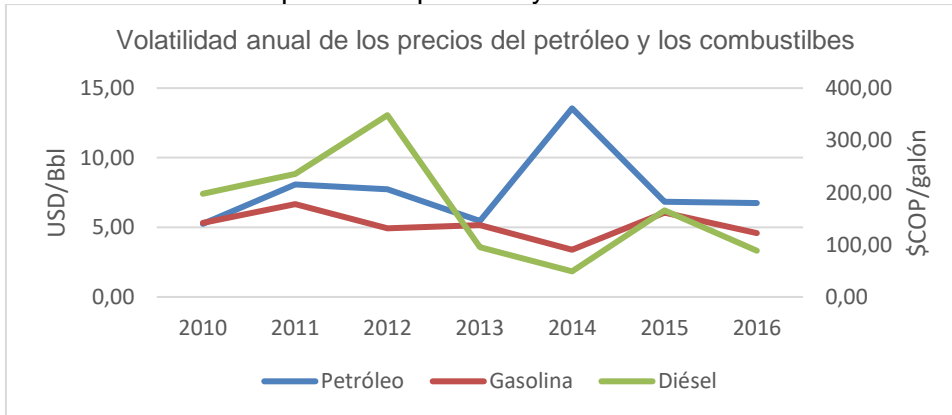
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (R_t - \mu)^2} \quad (3.2)$$

Donde  $\sigma$  representa la volatilidad,  $N$  es el número de precios registrados en el año,  $R$  es el precio y  $\mu$  es la media de todos los precios registrados. Para el caso del petróleo es posible usar el precio internacional de referencia WTI (EIA, 2018) y para los combustibles el precio promedio mensual al consumidor de la gasolina y el diésel, obtenidos en el SIPG. La Figura 3-13 presenta en el eje vertical izquierdo la volatilidad anual del precio del petróleo en dólares por barril y en el eje vertical derecho la volatilidad de la gasolina y el diésel en pesos colombianos por galón. En ninguno de los tres casos existe una tendencia clara; sin embargo, se ve que para el 2014 hubo una gran volatilidad en el precio del petróleo, sugiriendo la inestabilidad en el mercado petrolero; mientras que en los combustibles, principalmente en la gasolina, la volatilidad es más estable, teniendo en cuenta que los precios se encuentran controlados por formulas tarifarias.

- EID y contratos en la industria del petróleo (indicadores 22, 23, 24 y 25)

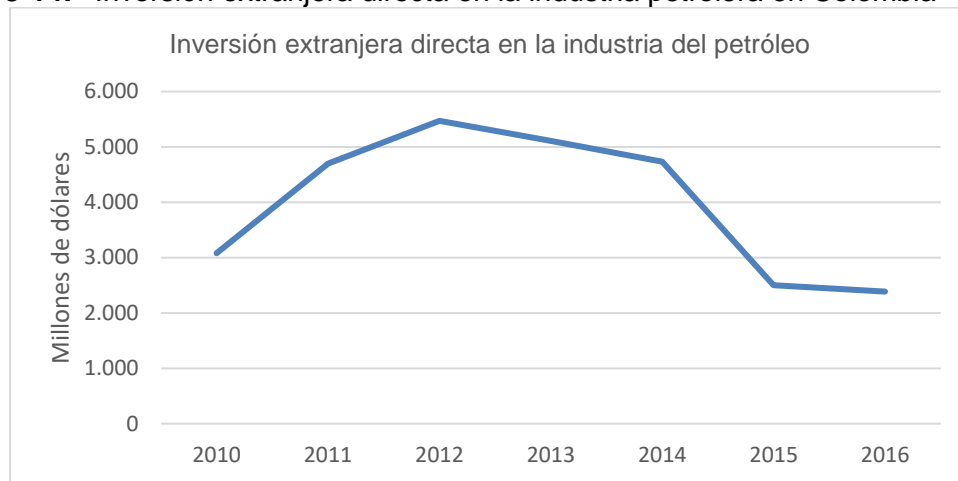
Estos indicadores reflejan la atraktividad y estabilidad de la industria petrolera en Colombia. La Figura 3-14 muestra la Inversión Extranjera Directa en el sector, donde nuevamente se evidencia una disminución a partir de 2013, consistente con la disminución en la firma de nuevos contratos y de los contratos vigentes en la industria en el mismo año, presentado en el Figura 3-15.

**Figura 3-13:** Volatilidad del precio del petróleo y los combustibles en Colombia



Fuente: EIA, SIPG (2018).



**Figura 3-14:** Inversión extranjera directa en la industria petrolera en Colombia

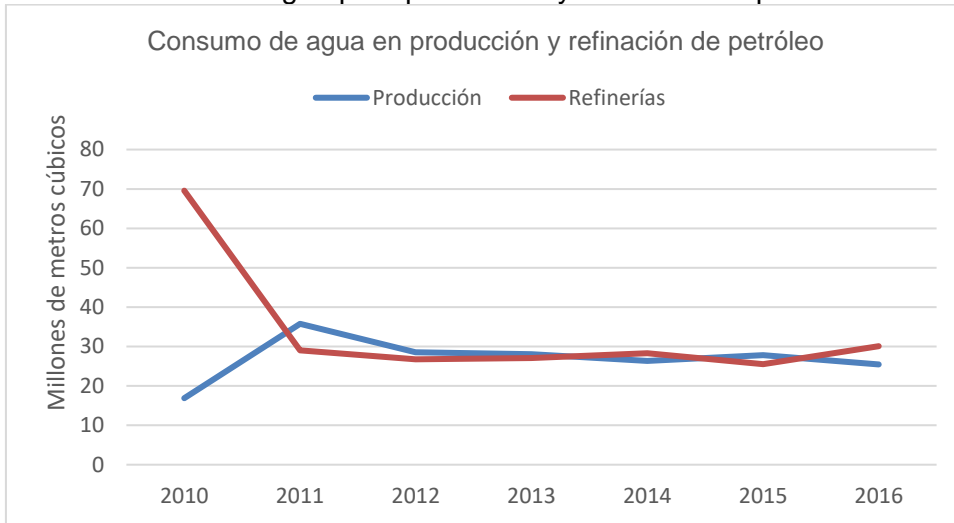
Fuente: Banco de la República (2018).

**Figura 3-15:** Contratos vigentes y firmados en la industria petrolera en Colombia

Fuente: ANH (2018).

- Agua usada para producción y refinación de petróleo (indicadores 26 y 27)

En este indicador (Figura 3-16) se observa una leve disminución de consumo de agua usada en la producción de petróleo, probablemente debido a la disminución en los volúmenes de producción. Respecto al uso de agua en refinerías, para 2016 se observa un incremento, comportamiento esperado debido nuevamente a la entrada en funcionamiento de la refinería de Cartagena.

**Figura 3-16:** Consumo de agua para producción y refinación de petróleo en Colombia

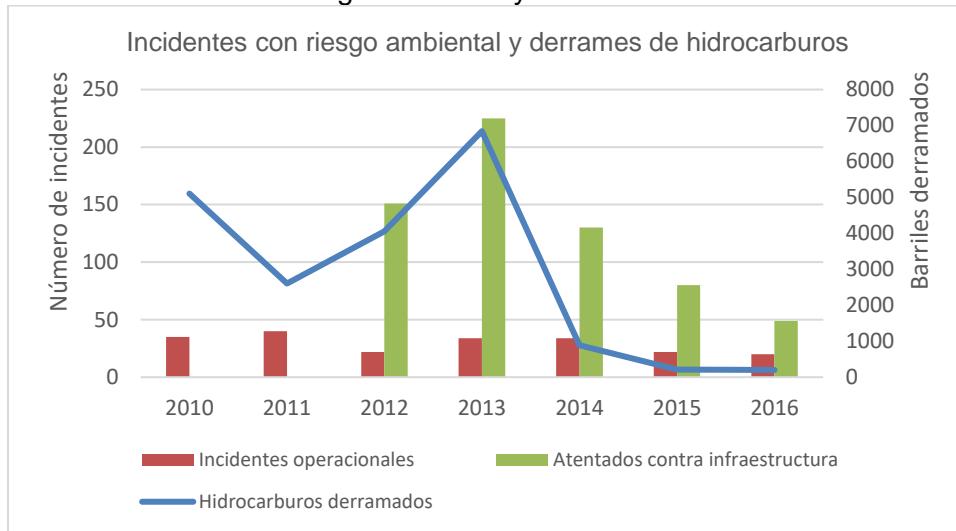
Fuente: Ecopetrol (2018).

- Incidentes operacionales, atentados contra la infraestructura y derrames de hidrocarburos (indicadores 28, 29 y 30)

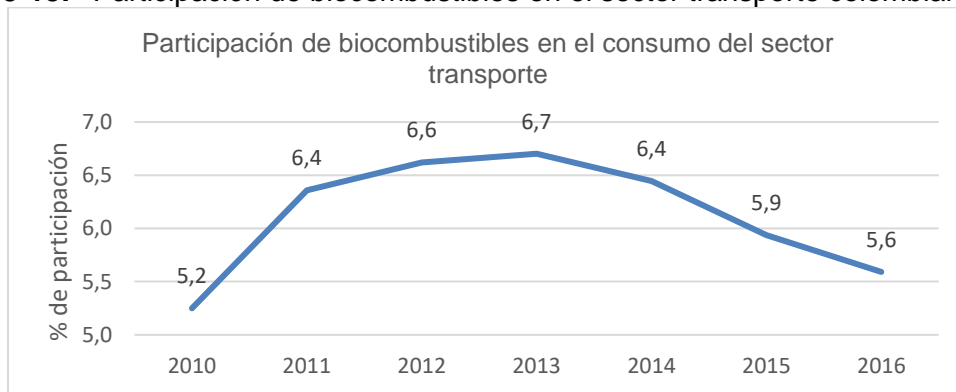
Este indicador evidencia que el número de ataques intencionales contra la infraestructura de la industria del petróleo y los combustibles es considerablemente mayor que los incidentes operacionales, como se muestra en el eje vertical izquierdo de la Figura 3-17; sin embargo, se evidencia una disminución en incidentes (operacionales e intencionales) al igual que en los derrames de hidrocarburos (eje vertical derecho), sugiriendo por un lado la disminución en tensiones ocasionadas por el conflicto armado en Colombia y la mejora en procesos operacionales.

- Participación de biocombustibles en consumo del sector transporte (indicador 31)

Teniendo en cuenta el consumo de biocombustibles y la demanda de combustibles del sector transporte, la Figura 3-18 evidencia que el porcentaje de participación de los biocombustibles ha disminuido, seguramente debido a que la producción local de estos no siempre logra cubrir la demanda para alcanzar las mezclas establecidas por el MME, y que también ha aumentado la participación de otros combustibles dedicados a transporte no carretero y que no tienen mezcla de biocombustibles.

**Figura 3-17:** Incidentes con riesgo ambiental y derrames de hidrocarburos en Colombia

Fuente: Ecopetrol (2018).

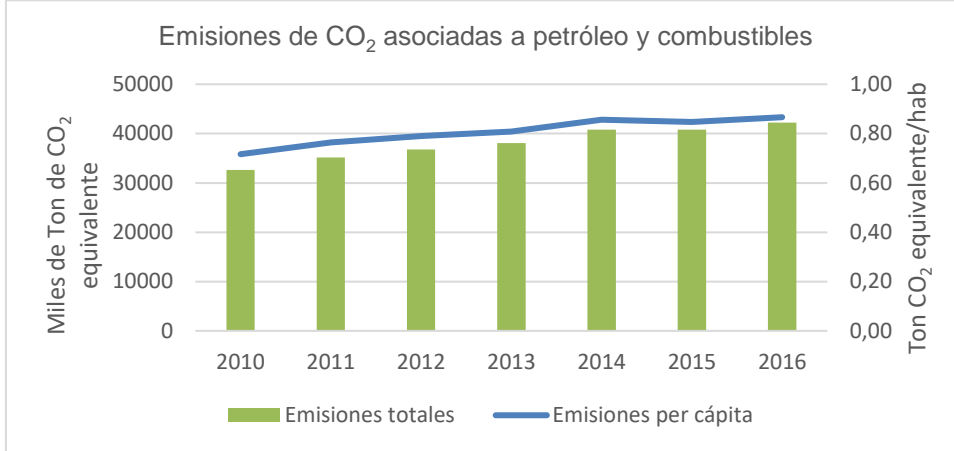
**Figura 3-18:** Participación de biocombustibles en el sector transporte colombiano

Fuente: BECO (2018).

- Emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al uso de petróleo y combustibles (indicador 32)

A partir de los factores de emisión para el petróleo y los combustibles líquidos, en el BECO se encuentran las toneladas equivalentes de dióxido de carbono que corresponden a las emisiones generadas por la combustión de los energéticos. Teniendo en cuenta que las emisiones son obtenidas a partir del consumo para usos finales y como suministro de transformación para obtención de energéticos secundarios, es de esperarse el comportamiento en la Figura 3-19, donde además de presentarse un aumento sostenido en las emisiones totales de CO<sub>2</sub> (eje vertical izquierdo), también se presenta aumento en las emisiones per cápita (eje vertical derecho).

**Figura 3-19:** Emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al uso de petróleo y combustibles en Colombia



Fuente: BECO (2018).

### 3.2.4 Indicadores agregados

Como se mencionó en el capítulo anterior en relación a los índices de seguridad energética, los indicadores pueden ser agregados con el fin de facilitar la presentación de los resultados obtenidos, además de permitir calificar un sistema en términos de seguridad energética según las dimensiones que estén siendo consideradas (Martchamadol & Kumar, 2013). Normalmente, la agregación se logra usando estructuras jerárquicas en las cuales se incorporan métricas objetivas (valor de los indicadores) y subjetivas, donde estas últimas representan la importancia relativa asignada a cada uno de los indicadores y se obtienen a partir del criterio de expertos, aunque para efectos prácticos es posible asignar el mismo peso a todos los indicadores (Narula et al., 2017).

La integración de la información exige que los datos sean normalizados, eliminando las unidades y estableciendo una escala homogénea para todos los indicadores, siendo el método de re-escalado uno de los más usados (Nardo et al., 2005), a partir de los valores mínimo y máximo para cada indicador en el periodo de estudio, de acuerdo con la ecuación (3.3), entregando valores en la escala entre 0 y 1. Es importante tener en cuenta que para los indicadores en los que el comportamiento deseable es decreciente, se invierte la escala de normalización, restándole a la unidad el valor obtenido en la ecuación (3.3).

$$I_m = \frac{x_m - \min(x_m)}{\max(x_m) - \min(x_m)} \quad (3.3)$$

El cálculo de indicadores en la sección anterior evidenció que varios de ellos están relacionados y tienen un comportamiento similar en el periodo de estudio, como es el caso de la IED y los contratos de TEA y E&P; por lo tanto, la Tabla 3-5 presenta la selección de indicadores que mejor representan las posibles variaciones dentro de cada una de las dimensiones, especificando sus valores iniciales y normalizados.

**Tabla 3-5:** Cálculo de indicadores y su valor normalizados para la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia

Dimensión	Indicador	Unidad	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Disponibilidad	Relación reservas producción	Años	7,2	6,8	6,9	6,7	6,4	5,5	5,2	
		--	1,0	0,8	0,9	0,8	0,6	0,2	0,0	
	Oferta interna de petróleo	MBbl	111,87	114,12	113,78	105,38	91,74	90,76	125,64	
		--	0,6	0,7	0,7	0,4	0,0	0,0	1,0	
	Auto suministro de petróleo	%	100,00	100,00	99,95	100,00	99,99	100,00	100,00	
		--	1,0	1,0	0,0	1,0	0,9	1,0	1,0	
	Producción de combustibles	KToe	11546	12621	11907	13002	9938	9320	11891	
		--	0,6	0,9	0,7	1,0	0,2	0,0	0,7	
	Producción de biocombustibles	KToe	438,21	555,40	610,34	631,50	656,81	670,03	645,35	
		--	0,0	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	0,9	
	Accesibilidad	Carga a refinерías	Kbbl/día	299	306	305	284	246	224	339
			--	0,7	0,7	0,7	0,5	0,2	0,0	1,0
Importación de combustibles		KToe	2738,45	3137,64	3568,74	4156,48	4637,56	2979,03	4850,33	
		--	1,0	0,8	0,6	0,3	0,1	0,9	0,0	
Importación de biocombustibles		Lt	0	0	0	14961	12275	1865	18537	
		--	1,0	1,0	1,0	0,2	0,3	0,9	0,0	
Intensidad de consumo de combustibles		Toe/hab	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,32	0,33	
		--	1,0	0,9	0,7	0,6	0,4	0,2	0,0	
Asequibilidad	Volatilidad precio del petróleo	USD/Bbl	5,25	8,08	7,73	5,46	13,55	6,83	6,74	
		--	1,0	0,7	0,7	0,0	0,0	0,8	0,8	
		\$COP/gal	141,60	177,77	131,17	137,68	90,40	161,28	122,47	

Dimensión	Indicador	Unidad	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
	Volatilidad precio al consumidor – gasolina	--	0,4	0,0	0,5	0,5	1,0	0,2	0,6
	Volatilidad precio al consumidor – diésel	\$COP/gal	197,84	235,74	348,15	95,25	49,05	165,96	88,36
		--	0,5	0,4	0,0	0,8	1,0	0,6	0,9
	Inversión extranjera directa en el sector petrolero	M USD	3080	4700	5471	5112	4732	2502	2386
--		0,2	0,8	1,0	0,9	0,8	0,0	0,0	
Aceptabilidad	Consumo de agua en producción y refinación de petróleo	Mm <sup>3</sup>	86,45	64,78	55,32	55,11	54,7	53,34	55,5
		--	0,0	0,7	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9
	Hidrocarburos derramados	Bbl	5108	2609	4059	6843	885	208	202
		--	0,3	0,6	0,4	0,0	0,9	1,0	1,0
	Atentados contra la infraestructura del petróleo y los combustibles	#	--	--	151	225	130	80	49
		--	--	--	0,4	0,0	0,5	0,8	1,0
	Incidentes operacionales con riesgo ambiental en industria del petróleo y los combustibles	#	35	40	22	34	34	22	20
		--	0,2	0,0	0,9	0,3	0,3	0,8	1,0
	Emisiones de CO <sub>2</sub> asociadas al uso del petróleo y los combustibles	kTon	32607	35159	36783	38064	40804	40822	42240
		--	1,0	0,7	0,6	0,4	0,1	0,1	0,0

Fuente: elaboración propia

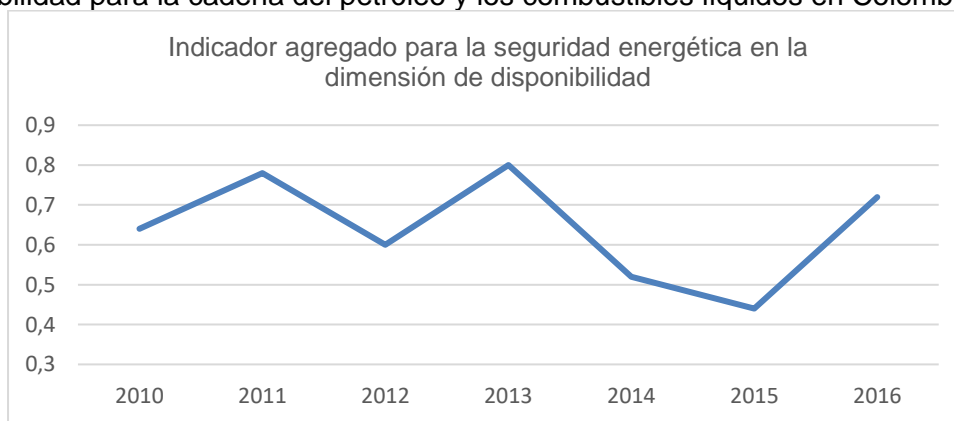
Finalmente, al ponderar con el mismo peso los valores normalizados de los indicadores en cada dimensión, se obtiene un indicador agregado que permite analizar más fácilmente la sensibilidad del estado de seguridad energética a los cambios ocurridos en el subsistema, tal como se presenta en la Tabla 3-6.

**Tabla 3-6:** Indicador agregado según dimensiones para la seguridad energética de la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia.

Dimensión	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Disponibilidad	0,64	0,78	0,6	0,8	0,52	0,44	0,72
Accesibilidad	0,93	0,85	0,75	0,40	0,25	0,50	0,25
Asequibilidad	0,53	0,48	0,55	0,55	0,70	0,40	0,58
Aceptabilidad	0,30	0,40	0,64	0,32	0,56	0,74	0,78

Fuente: elaboración propia

Los valores más altos para el indicador agregado están en la dimensión de disponibilidad, tendencia esperada teniendo en cuenta que el país es exportador de petróleo y cuenta con suministro confiable de energéticos primarios y secundarios. Sin embargo, la caída del precio internacional del petróleo en 2014 tuvo efecto a nivel interno como se observa en la Figura 3-20, año en que se redujo la actividad exploratoria y la oferta interna de petróleo y combustibles, desmejorando el estado de la seguridad energética.

**Figura 3-20:** Indicador agregado de seguridad energética en la dimensión de disponibilidad para la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia

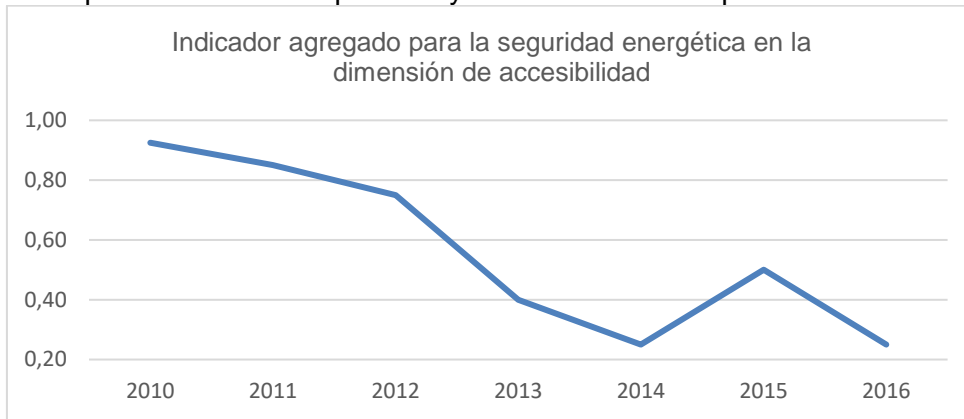
Fuente: elaboración propia

En cuanto a la accesibilidad, el indicador agregado sugiere que la seguridad energética ha disminuido en el subsistema del petróleo y los combustibles líquidos, tal como se ve en la Figura 3-21. Este comportamiento es debido a las condiciones de infraestructura de refinación en el país, en relación con la capacidad para procesar crudos pesados, lo cual influyó la disminución en la carga a refinerías y el aumento en las importaciones de

combustibles y biocombustibles. Sin embargo, se evidencia el efecto de la entrada en funcionamiento de la refinería de Cartagena, mostrando una mejora en la seguridad energética en la dimensión de accesibilidad para el 2016.

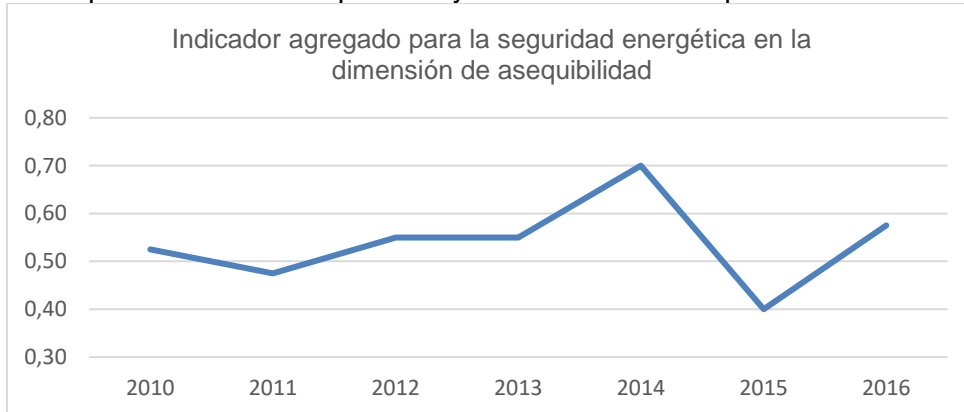
La Figura 3-22 nuevamente evidencia el efecto de la caída del precio internacional del petróleo en 2014, afectando el mercado del petróleo en el país, principalmente al reducirse la inversión extranjera directa, afectando de esta forma la seguridad energética en la dimensión de asequibilidad.

**Figura 3-21:** Indicador agregado de seguridad energética en la dimensión de accesibilidad para la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia



Fuente: elaboración propia

**Figura 3-22:** Indicador agregado de seguridad energética en la dimensión de asequibilidad para la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia

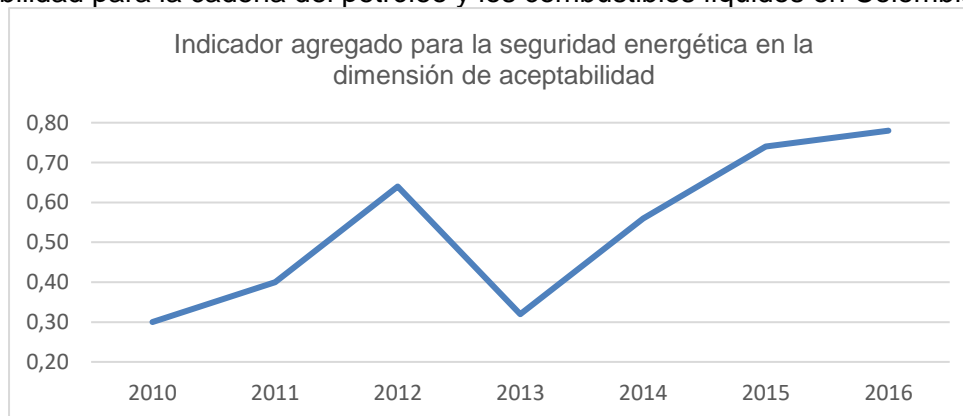


Fuente: elaboración propia



Finalmente, la dimensión de aceptabilidad reúne principalmente tres aspectos: el uso de otros recursos naturales, los impactos ambientales en términos de contaminación y emisiones causadas en todas las etapas de la cadena, y las tensiones del conflicto armado colombiano manifestadas a través de acciones intencionales contra la infraestructura del petróleo y los combustibles líquidos. La Figura 3-23 muestra como el aumento en los ataques a la infraestructura en el 2013 tiene un importante impacto negativo sobre la seguridad energética, pues además de efectos de interrupciones y costos de reparación, ese tipo de acciones normalmente resulta en derrames de hidrocarburos, que como se mencionó antes, también son considerados dentro del indicador agregado. Por otro lado, la disminución en atentados y en incidentes operacionales hace que la tendencia en la seguridad energética en términos de aceptabilidad sea positiva en los últimos 3 años de estudio.

**Figura 3-23:** Indicador agregado de seguridad energética en la dimensión de aceptabilidad para la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia



Fuente: elaboración propia.

De este modo, los indicadores agregados presentan una visión del estado actual de la seguridad energética en el subsistema del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia; sin embargo, existen algunos retos relacionados con aspectos de sostenibilidad que quedan por fuera de los indicadores ya calculados, esto debido a que se relacionan con factores externos a la cadena y no se cuenta con la información necesaria para hacer un cálculo confiable de indicadores, por lo que se discuten de forma independiente en el siguiente capítulo.



## **4. Sostenibilidad en la seguridad energética**

Este capítulo relaciona el concepto de desarrollo sostenible con los sistemas energéticos y establece algunos retos económicos, sociales y ambientales que pueden incidir en la seguridad energética en la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia, a pesar no ser necesariamente originados al interior de la cadena y que exigen la búsqueda de información que vaya más allá de la presentada anteriormente en la dimensión de aceptabilidad. Finalmente se proponen y calculan indicadores para evaluar aspectos de sostenibilidad en la seguridad energética en el sistema de estudio.

### **4.1 Sistemas energéticos y desarrollo sostenible**

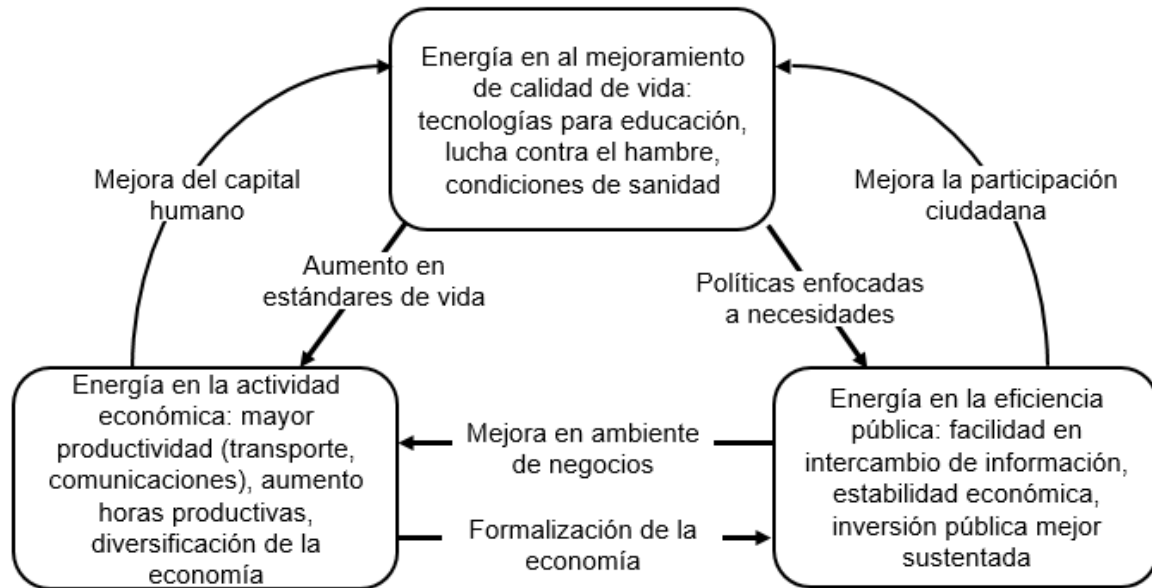
El desarrollo sostenible sugiere el equilibrio entre beneficios económicos, sociales y ambientales, por lo cual la relación entre este concepto y los sistemas energéticos es muy amplia y compleja. Por un lado, la energía satisface necesidades de la población (iluminación, transporte, calefacción, refrigeración, etc.) y dinamiza actividades económicas (industria y comercio), mejorando así las condiciones de vida de las comunidades y contribuyendo al desarrollo sostenible, tal como se ilustra en la Figura 4-1. Sin embargo, la explotación, la producción, la transformación y el consumo de energía, pueden afectar negativamente los ecosistemas y la salud humana, aumentando la brecha de desigualdades y generando conflictos por la falta de recursos; todo esto contrario a lo planteado en el enfoque del desarrollo sostenible (Kaygusuz, 2012).

### **4.2 Indicadores de sostenibilidad en la seguridad energética**

A pesar del enfoque multidimensional de la seguridad energética, a nivel gubernamental se da mayor importancia a los aspectos relacionados con suministro de energía y con infraestructura, por ser asuntos más inmediatos y localizados, y se dejan de lado algunos

retos en seguridad energética ligados a la sostenibilidad ambiental y social (Ang et al., 2015).

**Figura 4-1:** Relación entre la energía y el desarrollo sostenible



Fuente: adaptado de Kaygusuz (2012)

La dimensión de aceptabilidad propuesta en la definición de seguridad energética para Colombia en la sección 2.4 considera los principales factores de riesgo ambiental y social. Por lo tanto, los indicadores propuestos para dicha dimensión permiten evaluar algunos aspectos de sostenibilidad en la seguridad energética. Sin embargo, es posible evaluar más a fondo la sostenibilidad en la cadena del petróleo y los combustibles líquidos, incluyendo nuevas problemáticas que también inciden sobre la seguridad energética en el contexto colombiano, como se presenta a continuación:

#### 4.2.1 Contaminación del aire

Además de las emisiones de CO<sub>2</sub>, el uso de combustibles también genera otro tipo de contaminantes que afectan la calidad del aire y que tienen efectos sobre la salud humana: el material particulado con tamaño inferior a 2.5 micrómetros (PM2.5), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), los óxidos de nitrógeno (NOX) y el monóxido de carbono (CO) (IDEAM, 2016).

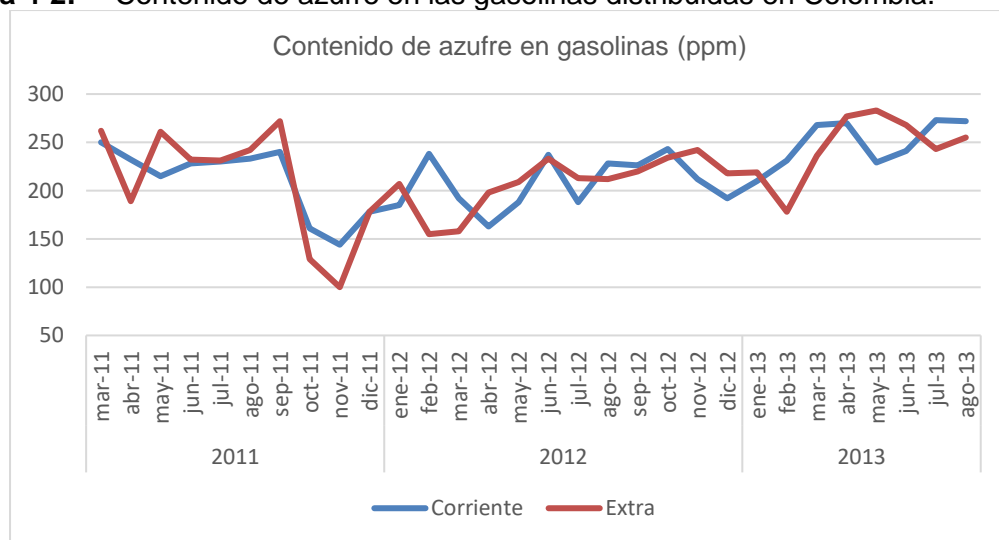
Esta situación adversa puede medirse con el fin de incorporarse en la evaluación de la seguridad energética. Para ello se proponen dos indicadores, el primero relacionado con la fuente del impacto y el segundo con el efecto.

- Calidad de combustibles:

El contenido de azufre en los combustibles determina en gran medida el factor de emisión de  $\text{SO}_2$ , por lo tanto, se considera un indicador importante. Ecopetrol, como agente refinador en Colombia, monitorea el contenido de azufre en las gasolinas (Figura 4-2) y el diésel (Figura 4-3 para las ciudades de Bogotá y Medellín Figura 4-4 para el resto del país), con el fin de dar cumplimiento a la normatividad colombiana (Ley 1205 de 2008 y Resolución 182087 de 2007), que exige menos de 300 ppm para la gasolina y 50 ppm para el diésel, este último solo a partir del 2013 en todo el país (Ecopetrol, 2014).

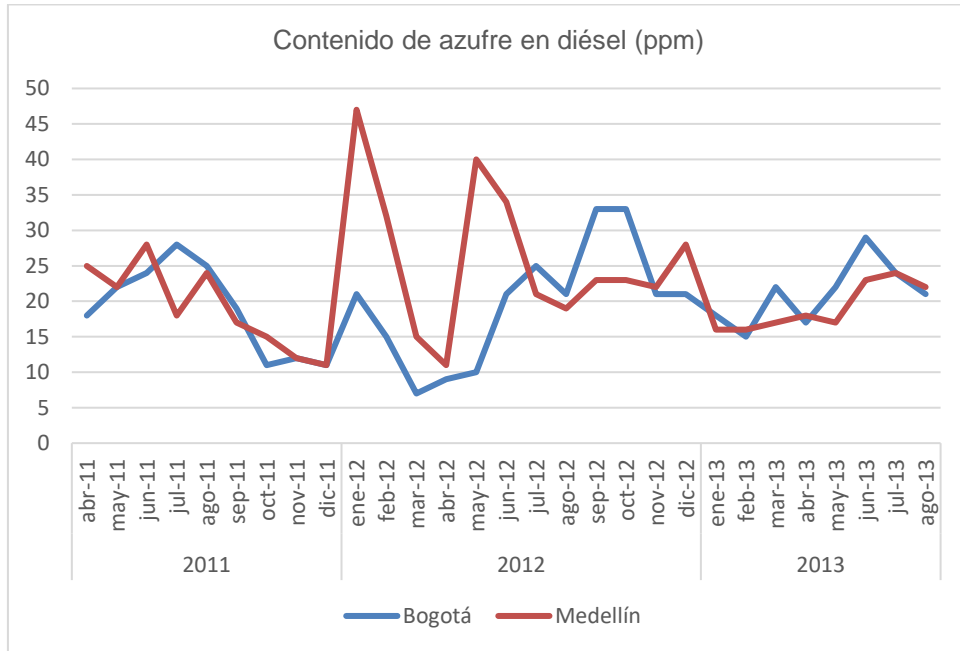
A pesar de que la información de calidad de combustibles no se encuentra disponible para el periodo entre finales de 2013 y el 2016, es de esperar una mayor disminución en el contenido de azufre en ambos tipos de combustibles, teniendo en cuenta que el diésel distribuido en Bogotá y Medellín ha logrado valores cercanos a las 10 ppm y en el resto del país cerca 20 ppm, esto gracias a las actualizaciones en las refinerías de Barrancabermeja y Cartagena con el fin de tener una producción local de combustibles de mayor calidad.

**Figura 4-2:** Contenido de azufre en las gasolinas distribuidas en Colombia.



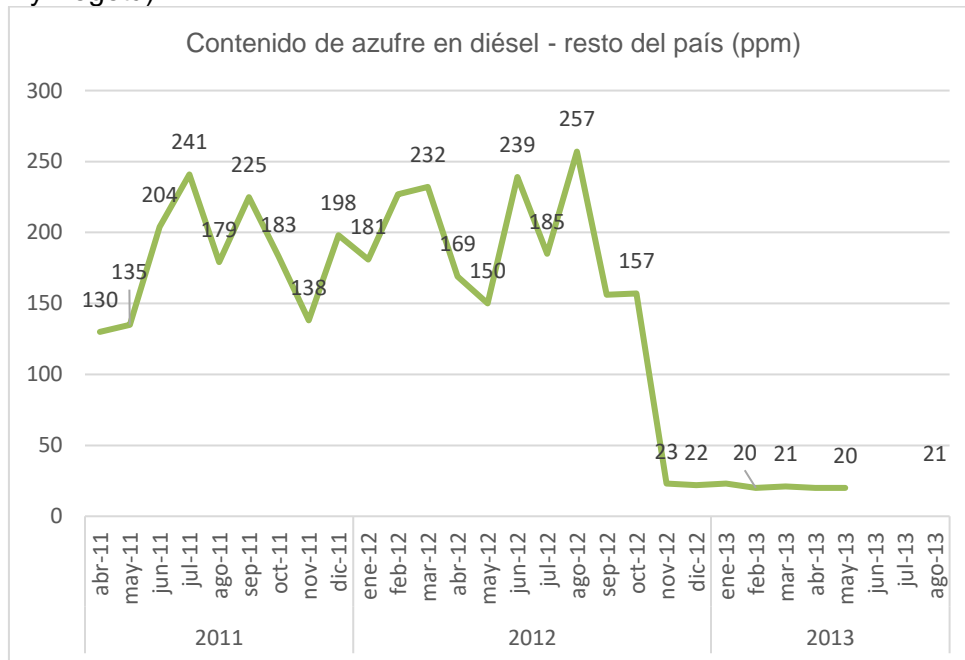
Fuente: Ecopetrol (2014)

**Figura 4-3:** Contenido de azufre en el diésel distribuido en las ciudades de Bogotá y Medellín.



Fuente: Ecopetrol (2014)

**Figura 4-4:** Contenido de azufre en el diésel distribuido en Colombia (a excepción de Medellín y Bogotá)



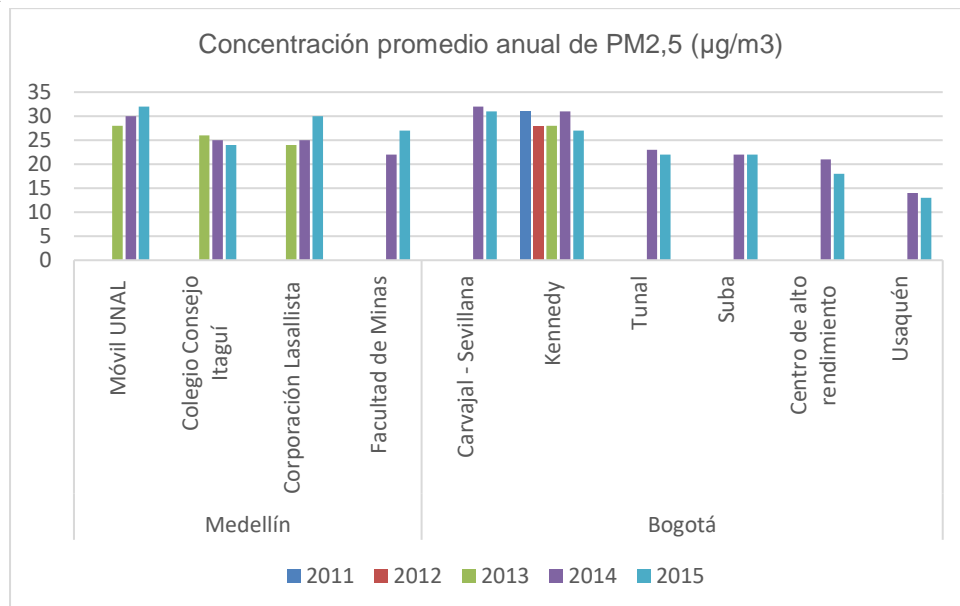
Fuente: Ecopetrol (2014)

- **Concentración promedio anual de contaminantes:**

Aunque los combustibles líquidos no son la única fuente de emisiones de PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y CO, si son la principal razón para el aumento de su concentración en el aire de las áreas urbanas. Por lo tanto, la medida de su concentración promedio anual es un indicador importante en relación con la sostenibilidad en la cadena de los combustibles líquidos. Sin embargo, este indicador presenta limitaciones en relación con la disponibilidad de información, debido a los cambios en la configuración en el Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire. Aun así, es posible presentar las tendencias de concentración para tres de estas sustancias según las estaciones de monitoreo en Bogotá y Medellín, como los dos principales centros urbanos del país (IDEAM, 2016)

En la Figura 4-5 se muestra la concentración promedio anual de PM<sub>2.5</sub> de las estaciones de monitoreo que tienen representatividad temporal de más de 75% para este indicador. Es posible observar que entre el 2014 y el 2015 en Medellín hay un aumento en la concentración de PM<sub>2.5</sub>, mientras que en Bogotá se observa la tendencia opuesta.

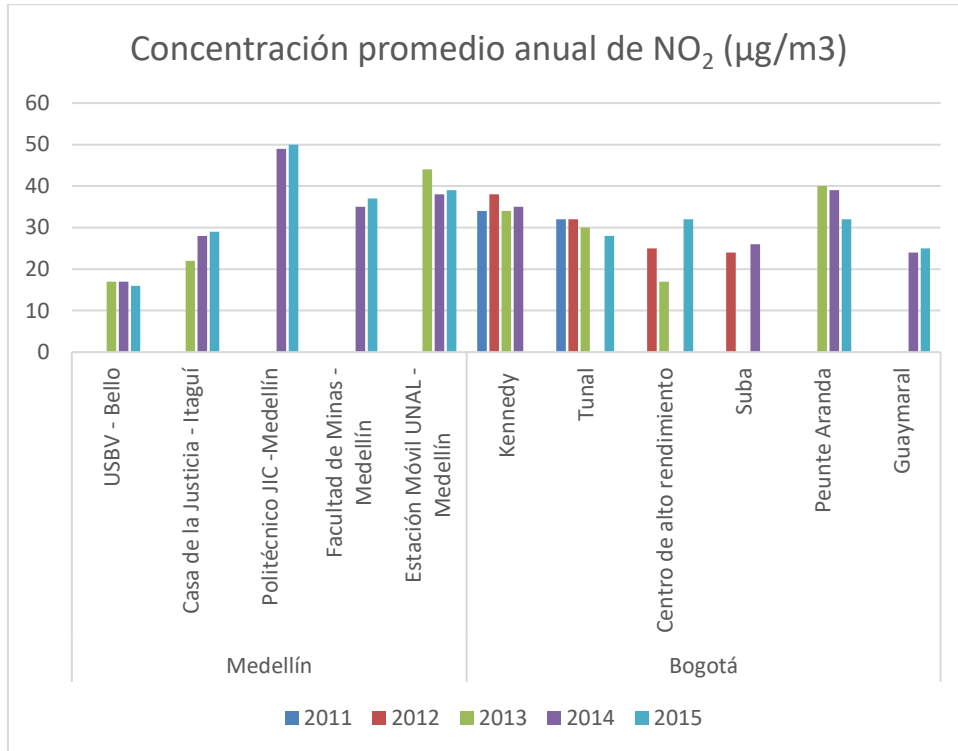
**Figura 4-5:** Concentración de PM<sub>2.5</sub> en las estaciones del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire con representatividad temporal igual o mayor a 75% en Medellín y Bogotá



Fuente: IDEAM (2016)

Respeto al NO<sub>2</sub>, la Figura 4-6 muestra nuevamente un aumento en la concentración promedio en la ciudad de Medellín entre 2014 y 2015, mientras que para el caso de Bogotá no se observa una tendencia clara, principalmente por la falta información disponible en años consecutivos para todas las estaciones.

**Figura 4-6:** Concentración de NO<sub>2</sub> en las estaciones del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire con representatividad temporal igual o mayor a 75% en Medellín y Bogotá

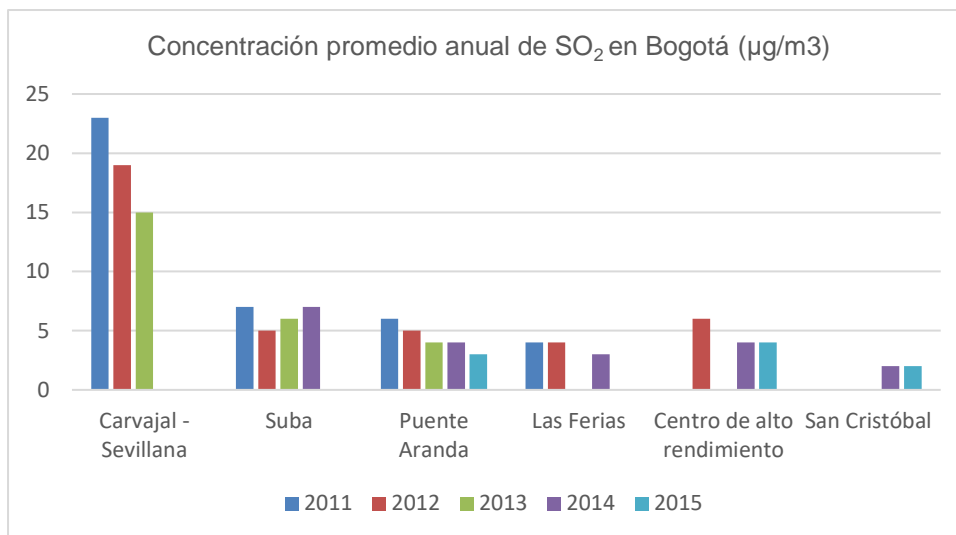


Fuente: IDEAM (2016)

Finalmente, la concentración promedio anual de SO<sub>2</sub> solo se encuentra disponible para Bogotá y es mostrada en la Figura 4-7, donde para la mayoría de las estaciones se observa una disminución luego del 2012, consistente con la disminución del contenido de azufre en el diésel para todo el país, combustible usado por gran cantidad de vehículos que ingresan a la capital.



**Figura 4-7:** Concentración de SO<sub>2</sub> en las estaciones del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire con representatividad temporal igual o mayor a 75% en Medellín y Bogotá



Fuente: IDEAM (2016)

#### 4.2.2 Uso de agua y suelo para producción de biocombustibles

A pesar de que los biocombustibles generan ventajas ambientales por su menor contenido de carbono y por considerarse recursos renovables al ser de origen vegetal, también se reconocen algunas desventajas en relación con el consumo de agua y el uso del suelo, con posibles afectaciones sobre la seguridad alimentaria (Rulli, Bellomi, Cazzoli, De Carolis, & D'Odorico, 2016).

La Tabla 4-1 presenta el consumo de agua y el área cultivada de caña de azúcar y de palma de aceite por unidad de energía producida de etanol y biodiésel, respectivamente, obtenidos para el caso colombiano a partir de literatura académica (Rulli et al., 2016).

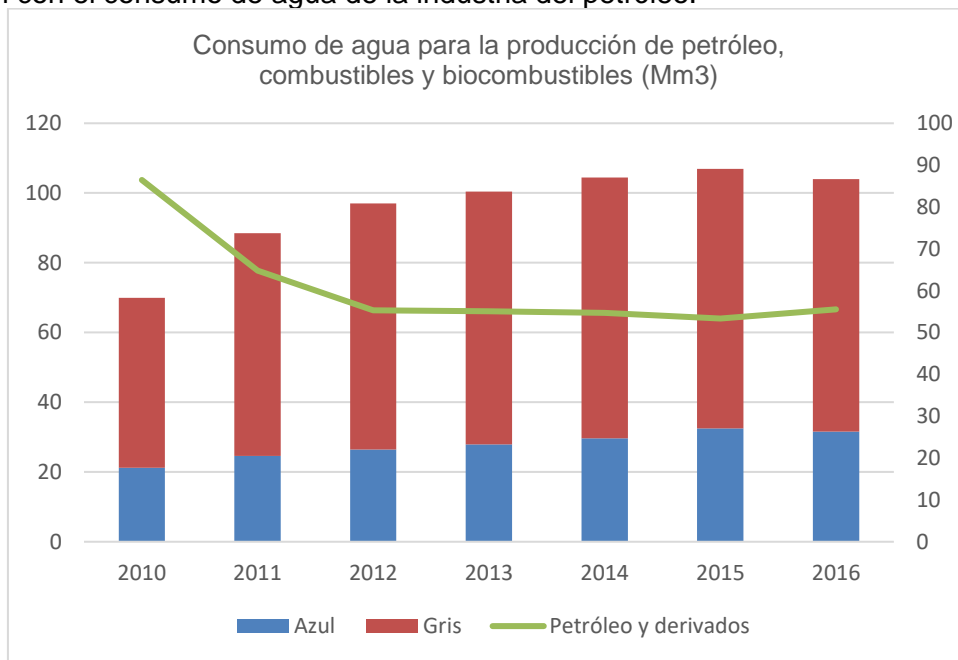
**Tabla 4-1:** Requerimientos de agua y suelo por unidad de energía de biocombustible producido en Colombia

Biocombustible	Consumo de agua (km <sup>3</sup> /TJ)			Área sembrada (Ha/TJ)
	Verde	Azul	Gris	
Etanol	54,5	3,9	0,4	19
Biodiésel	76,67	0,02	3,64	14

Fuente: adaptada de Rulli et al (2016)

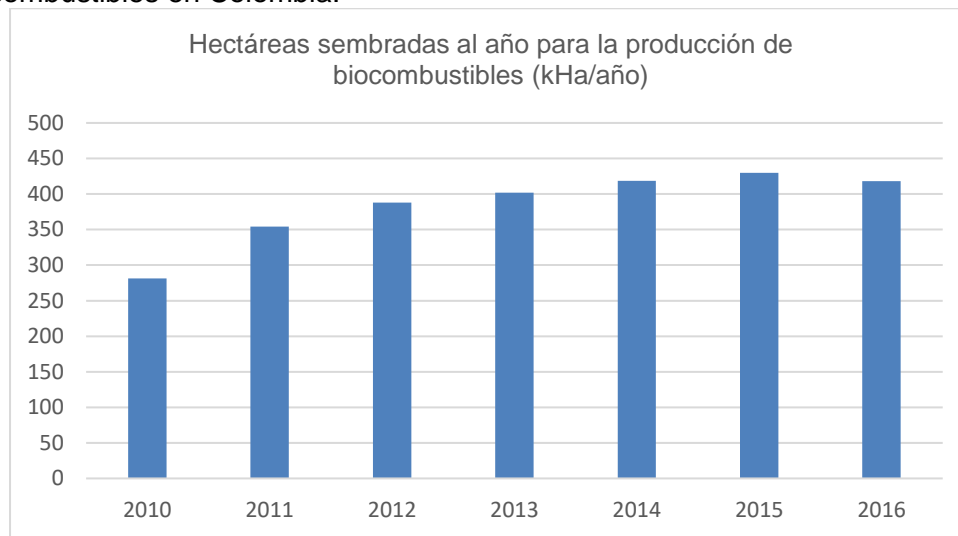
La Figura 4.8 presenta en el eje vertical izquierdo el consumo anual de agua proveniente de fuentes superficiales o subterráneas (agua azul) y de agua dulce requerida para diluir la carga de contaminación generada (agua gris), en comparación con el agua total usada para producción y refinación de petróleo. De acuerdo con el balance energético presentado en el Capítulo 2, es evidente que en el país la producción de biocombustibles es mucho menor que la de combustibles líquidos derivados del petróleo (que en términos de energía alcanza en promedio tan solo el 5% de la producción total de combustibles líquidos); sin embargo, el consumo de agua en la producción de biocombustibles es mayor, siendo mucho más intensivos en el uso del recurso hídrico. En cuanto al uso del suelo, la Figura 4-9 presentan el número de hectáreas sembradas al año para la producción de biocombustibles.

**Figura 4-8:** Consumo de agua para la producción de biocombustibles en Colombia en relación con el consumo de agua de la industria del petróleo.



Fuente: elaboración propia a partir de Rulli et al (2016), Ecopetrol y BECO

**Figura 4-9:** Área sembrada de palma de aceite y de caña de azúcar para la producción de biocombustibles en Colombia.



Fuente: elaboración propia a partir de Rulli et al (2016) y BECO

### 4.2.3 Generación de valor para las comunidades

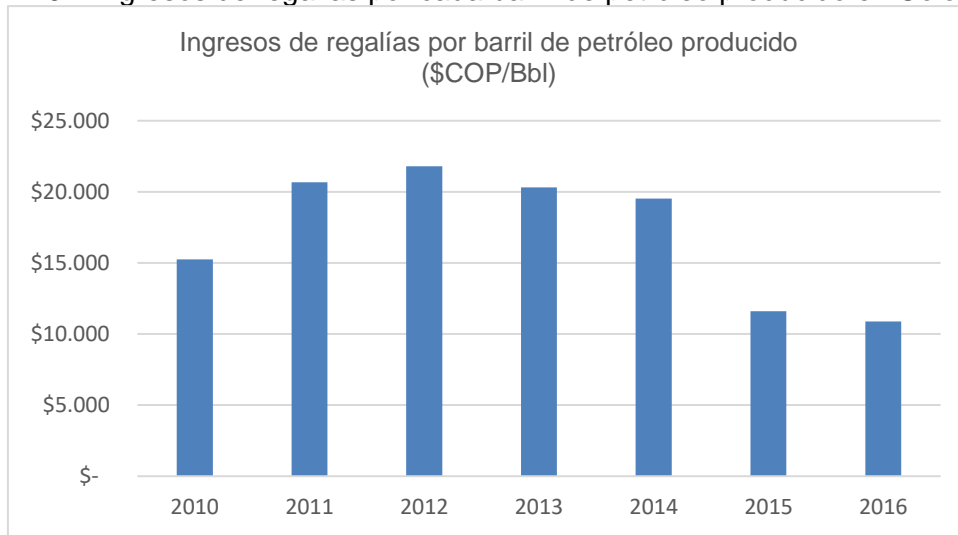
Como se mencionó dentro de los factores de riesgo económico y político en el Capítulo 1, la abundancia de recursos naturales y energéticos no siempre tiene impacto positivo sobre el desarrollo económico y social de las comunidades, especialmente de aquellas que habitan cerca de las áreas de influencia de proyectos a gran escala energéticos.

Como indicador para estimar la retribución que reciben las comunidades por la explotación de hidrocarburos líquidos en Colombia, es posible usar los ingresos anuales de regalías liquidadas por la producción de petróleo sobre el volumen anual de producción, estimando el aporte económico para las comunidades que genera de cada barril de petróleo producido, dinero que debería ser invertido para promover el desarrollo y la competitividad regional, además de restaurar económica y socialmente los territorios donde se realizan las actividades de exploración y explotación de recursos, según lo establece el Sistema General de Regalías (2012).

La Figura 4-10 presenta los ingresos por barril de petróleo producido en Colombia, mostrando una reducción continua a partir del 2013, posiblemente relacionado con la reforma al régimen de regalías en el año 2011. En sentido estricto, este indicador se traduce en menores beneficios y percepción de valor por parte de las comunidades en

relación con la extracción de recursos energético e impacta negativamente la seguridad energética vista desde la contribución al desarrollo sostenible de las regiones más vulnerables; sin embargo, es de destacar que el análisis al Sistema General de Regalías es mucho más complejo y existen trabajos académicos dedicados a evaluar su efectividad. Por ejemplo, Rojas Fuentes (2015) identifica falencias y aciertos en relación con la asignación de recursos y la ejecución de proyectos, vinculados con aspectos institucionales y de capacidad técnica y de gestión de los beneficiarios en la asignación de recursos.

**Figura 4-10:** Ingresos de regalías por cada barril de petróleo producido en Colombia.



Fuente: ANH (ANH, 2018b)

## 5. Impacto de políticas para el transporte en la seguridad energética

Este capítulo identifica algunas de las políticas energéticas propuestas para el sector transporte en Colombia y estima sus posibles impactos sobre el consumo de combustibles líquidos y la seguridad energética. Según el Plan Energético Nacional y los planes indicativos de acción para el abastecimiento de combustibles, la entrada de nuevas tecnologías vehiculares, la mejora en eficiencia y el aumento en la mezcla de biocombustibles, son factores determinantes en la configuración del sector transporte y definirán cambios significativos en la demanda de energía sobre el subsistema del petróleo y los combustibles líquidos. Considerando las limitaciones en la disponibilidad de información, se propone un modelo dinámico para evaluar distintos escenarios de política energética y se presentan las proyecciones de consumo de combustibles hasta el año 2050, de forma que, al ser comparadas con las proyecciones de un escenario tendencial, permitan estimar cambios en el estado de la seguridad energética.

### 5.1 Políticas energéticas en el sector transporte

Dentro de los lineamientos del PEN presentados en el capítulo 2, está la diversificación de la canasta de combustibles para el sector transporte. Más del 95% de la demanda del sector transporte se abastece a partir de derivados del petróleo, por lo que incentivar el uso de otras fuentes permitiría disminuir la dependencia de combustibles fósiles y reducir las emisiones de GEI y otros gases contaminantes. Las alternativas presentadas por el PEN en términos de combustibles para el sector transporte son (UPME, 2015a):

- **Biocombustibles:** en Colombia el Reglamento Técnico del Programa de Oxigenación de Gasolinas (Resolución MME 181069 de 2005), la Ley 939 de 2004 y el Decreto 2629 de 2007 reglamentan la mezcla con biocombustibles para la gasolina y el diésel,

estableciendo para este último una proporción de 90% de diésel y 10% de Biodiésel (UPME, 2018c). No obstante, en 2017 no se logró garantizar el abastecimiento de la mezcla en las proporciones establecidas por el MME en todo el territorio nacional, haciendo necesario bajar el porcentaje de mezcla de etanol a 6% (UPME, 2018c) A futuro se espera la desregularización del mercado de biocombustibles de forma que se puedan ofrecer mezclas con mayor porcentaje de etano y biodiésel, además de promover la producción de biocombustibles de segunda y tercera generación, que no entren en conflicto con la seguridad alimentaria.

- **Gases combustibles:** el gas natural vehicular (GNV) resulta atractivo por su menor costo e impacto ambiental en relación con los combustibles líquidos; sin embargo, existe gran incertidumbre respecto a la capacidad de abastecimiento de GNV en el país en los próximos años. Ante este hecho se presentan como alternativas la importación y regasificación de gas natural licuado y el uso de gas licuado de petróleo (GLP) en el sector transporte. Respecto al GLP existen muy buenas perspectivas teniendo en cuenta que la oferta interna de este combustible es suficiente para satisfacer la demanda, los costos de infraestructura son razonables y el desempeño de los vehículos es adecuado; sin embargo, aún no existe un marco regulatorio claro que permita su implementación en el sector transporte.
- **Electricidad:** debido al importante desarrollo de tecnologías de movilidad eléctrica a nivel mundial es posible considerar la electrificación de un importe porcentaje del parque automotor en los próximos años. Sin embargo, aún se requiere el aumento de infraestructura que permita mayor flexibilidad a los usuarios de este tipo de vehículos. Además, otra de las grandes barreras es la diferencia de precios entre los vehículos de combustión interna y los vehículos eléctricos, por tanto, lo incentivos tributarios pueden ser un factor determinante para acelerar el cambio de la flota.

Por otro lado, el segundo objetivo del PEN presenta como lineamiento promover la eficiencia energética en toda la cadena de demanda, considerando la adopción de nuevas tecnologías y la mejora en los hábitos de consumo. Para tal fin fue creada la Comisión Intersectorial para el Uso Racional de Energía y Fuentes no Convencionales de Energía (CIURE) y el Plan de Acción Indicativo de Eficiencia energética 2017-2022, donde se identifican potenciales de ahorro de energía para cada uno de los sectores de demanda,

incluyendo el sector transporte. Con las medidas propuestas para el sector se busca incorporar tecnologías más eficientes y limpias con la reconversión del parque automotor, el mejoramiento en los sistemas de transporte masivo y la promoción de buenas prácticas de conducción y mantenimiento de vehículos.

Las herramientas de política energética en relación con el sector transporte se presentan a continuación:

### **5.1.1 Plan Indicativo de Abastecimiento de Combustibles Líquidos**

Este plan incluye la protección de demanda de combustibles para el sector transporte, la cual ha sido actualizada regularmente por la UPME, entregando las últimas versiones en los años 2014, 2015 y 2016. Dichas actualizaciones buscan incorporar cambios en el comportamiento en algunas categorías vehiculares, como en el caso de las motocicletas, que debido al aumento en la congestión de las ciudades, las facilidades para acceder a este tipo de vehículo y los bajos costos de operación, se han convertido en un sustituto del transporte público colectivo y de automóviles particulares (UPME, 2014).

La proyección de la demanda usa como insumo el crecimiento esperado del parque automotor y presenta tasas de crecimiento geométrico para cada categoría vehicular (UPME, 2018b). También se considera la proyección del número de viajes y el rendimiento de combustible por categoría vehicular en las principales ciudades del país, que, junto con los reportes oficiales de consumo de combustible, permiten establecer sobrestimaciones del comportamiento real de la flota de vehículos (UPME, 2015b).

Dentro del plan se evalúan diferentes escenarios considerando cambios en la tasa de motorización e involucrando las metas presentadas en el Plan Nacional de Desarrollo 2014- 2018 en relación con la entrada de vehículos eléctricos, híbridos, a GLP y a GNL (UPME, 2014). Además, también considera el cambio modal en los sistemas de transporte masivo para las tres principales ciudades del país (Bogotá, Medellín y Cali) con un aumento en la cantidad de buses articulados y el funcionamiento del metro en la ciudad de Bogotá (UPME, 2015b).

### 5.1.2 Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética

El PAI-PROURE 2017-2021 da especial atención al sector transporte considerando que es el mayor consumidor de energía en el país y en el que además se representa las mayores pérdidas por ineficiencia en las tecnologías predominantes. Este sector se divide en los subsectores de transporte aéreo, marítimo, fluvial, ferroviario y carretero, siendo este último el que tiene mayor participación en la demanda, principalmente para el segmento del transporte privado de pasajeros. Las medidas propuestas por el plan para el sector transporte son (UPME, 2016):

- **Medidas relacionadas con GNV:** Incluye medidas en el segmento de transporte público de pasajeros con las que se busca aumentar el uso de GNV.
- **Medidas relacionadas con el uso de electricidad:** contempla la entrada de vehículos nuevos y la reposición de vehículos en algunas categorías, con el objetivo de reemplazar el 0,15% de la flota total que se movilizaría en el país en 2021, comenzando en 2017.
- **Establecimiento de los estándares de eficiencia energética y etiquetado para vehículos:** estándares de eficiencia energética para los vehículos del parque automotor nacional, como complemento al reglamento de etiquetado (RETIQ), adoptado por el MME.

### 5.1.3 Mapa de ruta para la transición hacia vehículos de bajas y cero emisiones

En busca de obtener claridad respecto a los pasos a seguir en la transición del sector transporte, especialmente en cuanto a la articulación de las políticas en todos los niveles territoriales, la UPME contrató un estudio para la elaboración del mapa de ruta para la transición hacia los vehículos de bajas y cero emisiones en Colombia. Como uno de los resultados se presenta una visión de futuro para el transporte en Colombia en miras de alcanzar una movilidad inteligente y sostenible, teniendo en cuenta las tendencias de localización y el desplazamiento de la población, las preferencias de compra y uso compartido, los cambios en la economía global y las cadenas de distribución y la



priorización de políticas de mitigación del cambio climático. La tabla 5-1 presenta las metas propuestas a 2050 en el mapa de ruta según los segmentos de transporte en Colombia.

**Tabla 5-1:** Metas a 2050 del mapa de ruta de transición a vehículos de bajas y cero emisiones

Segmento de transporte	Meta
Transporte de carga	Interurbano: parque automotor a GLP e híbrido. Urbano: servicio nocturno con parque automotor eléctrico.
Transporte público urbano	Sistemas de transporte integrados entre buses articulados a gas natural y buses padrones eléctricos.
Transporte particular	Carros en su mayoría eléctricos e híbridos y motos eléctricas; sin embargo, se espera desincentivar este segmento aumentando el transporte público y el no motorizado.
Taxis	Flota eléctrica en las principales ciudades del país
Transporte no motorizado	Se espera posicionar como el segundo medio de transporte más usado, promoviendo recorridos a pie y en bicicleta.

Fuente: adaptada de Ernst & Young (2017)

## 5.2 Modelos de planeación y evaluación de políticas

Los modelos permiten evaluar sistemas energéticos críticos, entender el efecto de las acciones de adaptación de los sistemas energéticos y recrear escenarios futuros (Jewell et al., 2014). Para la planeación energética a largo plazo existen herramientas robustas que permiten modelar los sistemas energéticos de forma completa. Un ejemplo de ello es LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning), herramienta para el análisis de políticas energéticas y evaluación de mitigación del cambio climático desarrollada por el Instituto de Ambiente de Estocolmo y usada por organizaciones de distinto índole alrededor del mundo (Stockholm Environment Institute, 2018). En Colombia se ha usado en algunos estudios académicos en para el sector transporte en la ciudad de Medellín, primero por Toro & Quiceno (2015) en relación con la demanda de energía y las emisiones del sector transporte entre los años 2000 y 2010, y posteriormente por Martínez, Arango, Álvarez & Jaramillo (2017) en donde se evalúan las políticas del plan de movilidad implementado en la ciudad de Medellín, especialmente en relación con la integración de modos de

transporte, la inclusión del sistemas de bicicletas públicas y la puesta en marcha de estrategias de teletrabajo.

Otra conocida herramienta es el módulo BALANCE del modelo ENPEP, que consiste en un modelo analítico de equilibrio no lineal entre demanda de energía y recursos energéticos y tecnológicos disponibles, el cual permite estimar la respuesta de varios segmentos de los sistemas energéticos ante cambios en los precios de la energía y en los niveles de demanda. Este modelo, desarrollado por el Argonne National Laboratory, ha sido usado en más de 50 países para analizar proyecciones de mercado, emisiones de GEI y de otros contaminantes y estudiar políticas de mitigación de cambio climático (CEEESA, 2018). En Colombia es usado en la proyección de demanda de combustibles líquidos realizada por la UPME (2018b).

Respeto a la evaluación de políticas, los modelos dinámicos han sido ampliamente usados en el sector transporte, fundamentados en la elaboración de diagramas causales y el planteamiento de una hipótesis dinámica que puede ser cuantificada a través de flujos (Shepherd, 2014). Los modelos dinámicos permiten considerar la complejidad propia del sector transporte, especialmente en cuanto a la incorporación de diferentes agentes y de los retardos en los efectos de las acciones hechas sobre el sistema. Según la revisión realizada por Shepherd (2014) existen gran cantidad de modelos dinámicos que buscan predecir las implicaciones de políticas de respaldo a mejoras en eficiencia de vehículos, al igual que modelos del parque automotor donde se estudia la difusión de tecnologías alternativas, haciendo uso un modelo de elección discreta a partir de atributos. Ejemplo de ello son los trabajos académicos de Baena (2011) y de Morales (2014), los cuales presentan modelos de masificación de vehículos con combustibles alternativos en el país, y el de Bedoya (2017) que evalúa los efectos de la entrada de vehículos eléctricos sobre el sistema interconectado nacional.

Considerando la clasificación de modelos de energía propuesta por Van Beekc (1999), es posible determinar que el modelo para la evaluación de las políticas energética en el sector transporte debe tener una cobertura sectorial y estar diseñado para cumplir un propósito específico, el cual sería la proyección de la demanda de combustibles en el largo plazo. Por lo tanto, el modelo debe simplificarse incluyendo solo los factores que sean determinantes y evitando una alta dependencia de datos, haciendo las suposiciones que sean necesarias, pero garantizando que no se altere su validez.

De acuerdo con lo anterior, un modelo dinámico resulta ser apropiado para el análisis que se quiere hacer en este trabajo, al permitir modelar tan solo una parte del sistema sin demandar información en relación con precios y otras variables de mercado, pero garantizando el análisis de políticas, el modelado acumulaciones y flujos propias del parque automotor para el sector transporte, la incorporación de envejecimientos y cambios tecnológicos y la adaptabilidad para analizar diferentes indicadores.

### **5.3 Modelo dinámico del sector transporte carretero en Colombia**

En la elaboración de los modelos dinámicos se utilizan diagramas de niveles, en los que ocurren acumulaciones, y flujos que incorporan ecuaciones diferenciales. Al conectar diferentes niveles y flujos es posible obtener la estructura del sistema, vinculando así una serie de ecuaciones diferenciales no lineales las cuales definen el comportamiento del modelo en función del tiempo. Para la elaboración de un modelo dinámico se sugiere la siguiente metodología (Sterman, 2002):

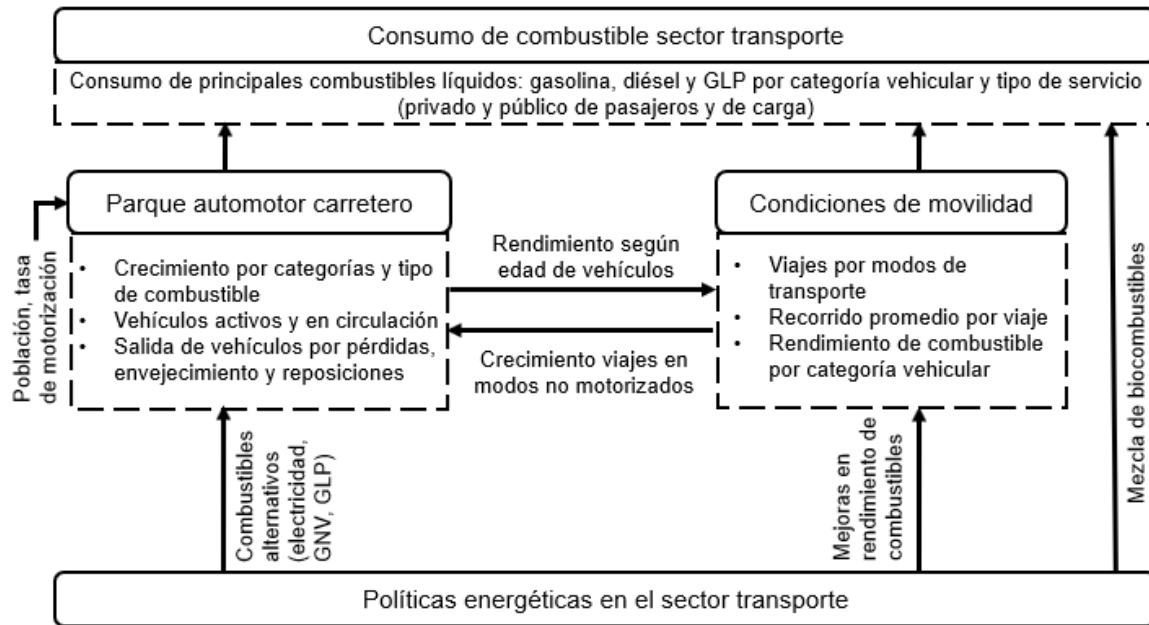
- Identificación del problema estableciendo conceptos, variables y horizonte de tiempo.
- Desarrollo de una hipótesis dinámica a partir de los diagramas casuales, niveles y flujos.
- Formulación de un modelo de simulación, el cual debe incluir ecuaciones, parámetros y condiciones iniciales.
- Validación del modelo comparando los resultados obtenidos y el comportamiento real del sistema, además de diferentes pruebas.
- Diseño y evaluación de políticas incorporando estrategias al modelo de forma que pueda analizarse su comportamiento bajo diferentes condiciones. presentan como una serie de aspectos que se podrían realizar en un futuro para emprender investigaciones similares o fortalecer la investigación realizada.

#### **5.3.1 Descripción del modelo**

Se trata de un modelo agregado a nivel nacional con horizonte de tiempo hasta el año 2050, el cual busca estimar el consumo de combustibles líquidos en Colombia por parte del sector transporte en el segmento carretero, teniendo en cuenta el tamaño y las categorías del parque automotor, las condiciones de movilidad en relación con las

distancias recorridas y el rendimiento de combustible en los vehículos. La figura 5-1 muestra esquemáticamente los subsistemas y las relaciones consideradas en el modelo, incluyendo las políticas energéticas relacionadas con la entrada de vehículos de combustibles alternativos, la mejora en el rendimiento de combustibles y el aumento de la mezcla de biocombustibles a nivel nacional.

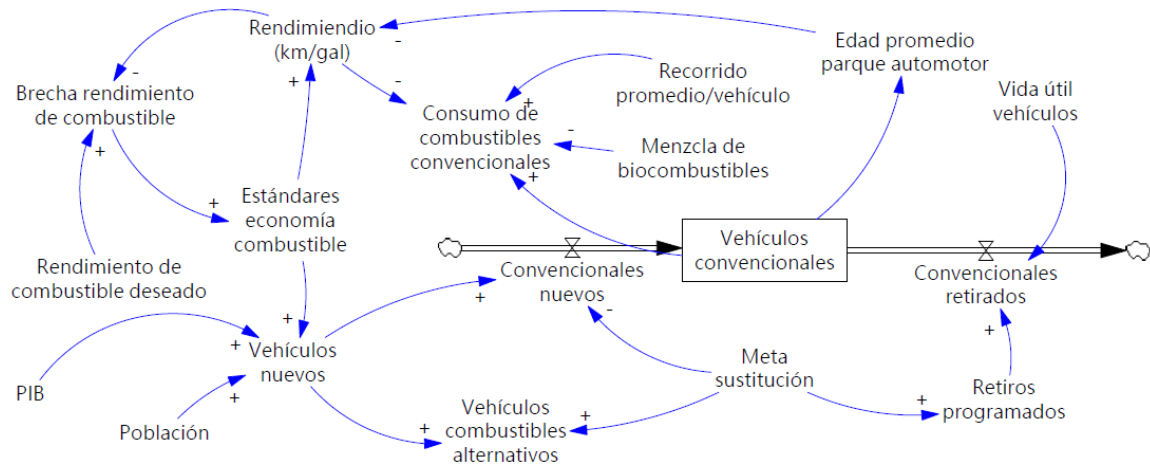
**Figura 5-1:** Subsistemas del modelo para el sector transporte carretero en Colombia



Fuente: elaboración propia.

La figura 5-2 muestra el diagrama casual con la hipótesis dinámica del modelo para cada una de las categorías vehiculares. La entrada de vehículos al sistema se da por el crecimiento del parque automotor, que a su vez depende de factores externos como la población y el PIB, los cuales se incluyen a través de las tasas de crecimiento geométrico estimadas por la UPME (UPME, 2014). Los vehículos nuevos se dan a causa de salidas por pérdidas o por reposiciones para el cumplimiento de meta de sustitución de tecnologías, aumentando así la participación de vehículos con combustibles alternativos (eléctricos, GLP, GNV). Los vehículos con tecnologías convencionales también tienen efecto en el consumo de combustible al aumentar el rendimiento según nuevos estándares. Por otro lado, el aumento del parque automotor supone una disminución en el recorrido promedio en los vehículos de uso privado y taxis, que dependen de la proyección de viajes diarios en las principales ciudades.

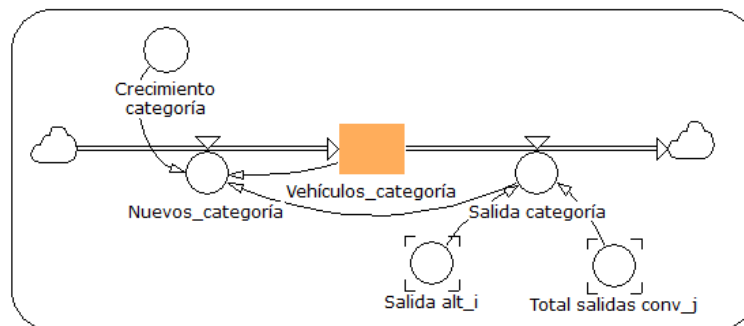
**Figura 5-2:** Diagrama causal del modelo para el sector transporte carretero en Colombia



Fuente: elaboración propia.

El modelo considera diez categorías vehiculares usando los datos iniciales del parque automotor reportados en las Estadísticas 2016 Transporte en Cifras (Mintransporte, 2016). El diagrama de niveles y flujos en la figura 5-3 muestra como en cada categoría el crecimiento de la flota depende de las tasas de crecimiento geométrico similares a las presentadas en la proyección de demanda de combustibles de la UPME (UPME, 2015c), limitando el crecimiento de automóviles particulares y motocicletas según el número de hogares esperados a 2050 en Colombia de acuerdo con la proyección poblacional (CEPAL, 2017).

**Figura 5-3:** Diagrama de flujos y niveles por categoría vehicular

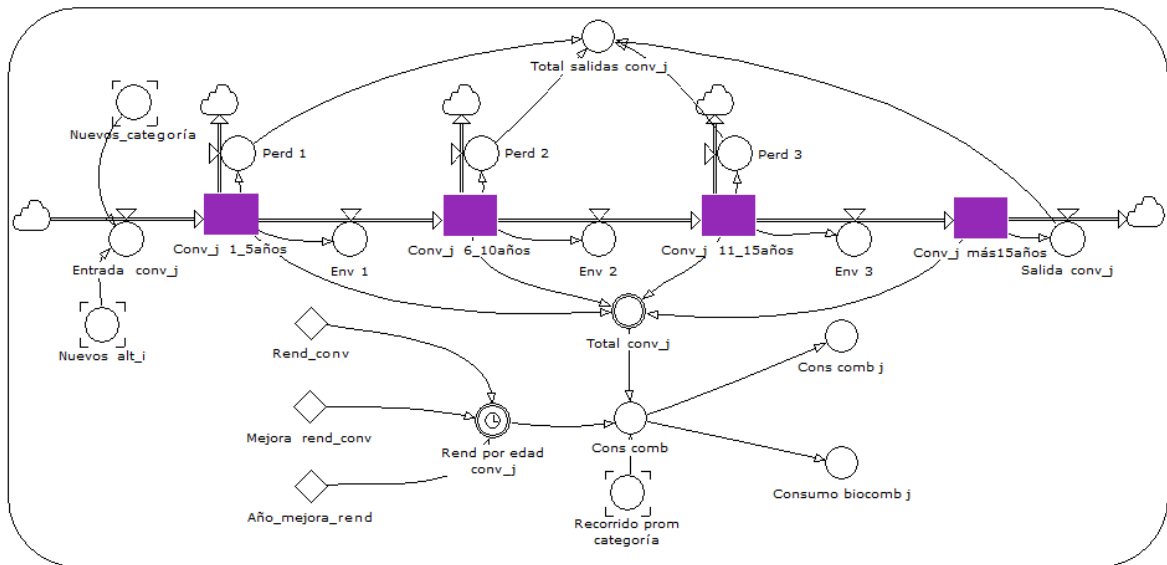


Fuente: elaboración propia.

La flota en cada categoría está subdividida en diferentes niveles según el combustible con el que operan los vehículos. En las categorías de automóviles particulares, camperos y camionetas, para los combustibles gasolina y el diésel, se diferencian cuatro grupos de edad con el fin de incorporar los cambios en el rendimiento de combustibles, aumentando aproximadamente 0,1% anualmente para los vehículos nuevos y disminuyendo 0,1% por cada año de circulación del vehículo (UPME, 2014), como se muestra en la figura 5-4, donde además es posible incorporar políticas de eficiencia en el rendimiento de combustible para el caso de la gasolina, estableciendo el año de entrada en rigor de dicha medida.

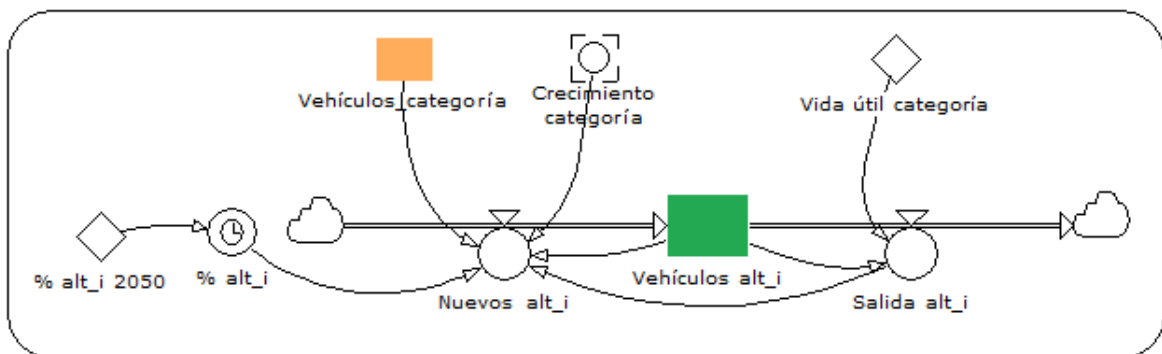
La figura 5-5 ilustra como la entrada de vehículos nuevos para cada tipo de combustible alternativo depende de total de vehículos nuevos en la categoría y del porcentaje esperado de penetración de cada tecnología a 2050; en el caso de vehículos a gasolina en las categorías de automóviles, camperos, camionetas, motos, taxis y camiones, y de vehículos a diésel en las demás categorías, las entradas dependen de los vehículos nuevos que operan con combustibles alternativos, como se ve en la figura 5-4. Respecto a las salidas, estas se dan de acuerdo con los años de vida útil de los automotores en cada categoría. Adicionalmente, a partir de la acumulación de vehículos a gasolina, diésel y GLP en todas las categorías, es posible estimar el consumo de combustible a partir del recorrido promedio, el rendimiento de combustible y el porcentaje de vehículos activos, teniendo en cuenta que no todo el parque automotor registrado cumple los requisitos para estar en circulación (UPME, 2015b), al igual que el consumo de biocombustibles de acuerdo al porcentaje de mezcla establecido.

**Figura 5-4:** Diagrama de flujos y niveles por edad para categorías de automóviles, camperos y camionetas.



Fuente: elaboración propia.

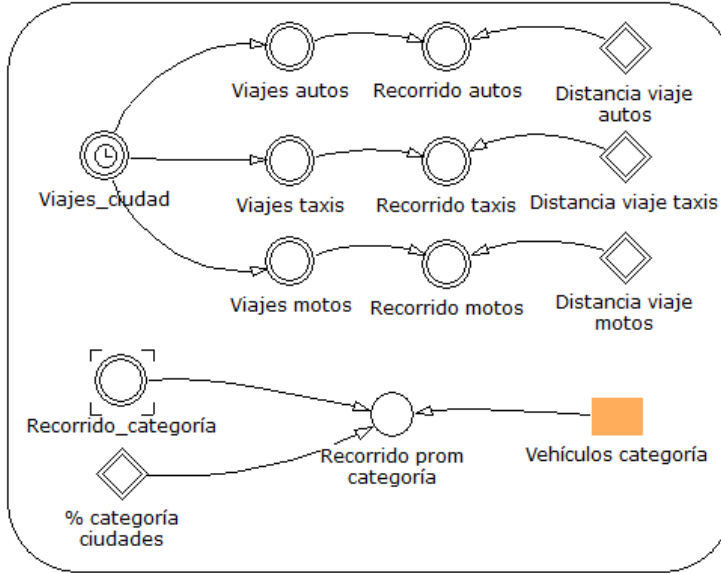
**Figura 5-5:** Diagrama de flujos y niveles para vehículos con combustibles alternativos



Fuente: elaboración propia.

Finalmente, el recorrido promedio para los automóviles particulares, camperos, camionetas, motos y taxis es obtenido a partir de la proyección de viajes en las principales ciudades del país, calculando la distancia total diaria recorrida en cada categoría y dividiéndola por el número de vehículos, como se presenta en la figura 5-6.

**Figura 5-6:** Diagrama de relación entre proyección de viajes, número de vehículos y distancia recorrida.



Fuente: elaboración propia.

La tabla 5-2 presenta los parámetros y las ecuaciones más importantes usadas en todas las categorías y para diferentes opciones de combustibles, especificando algunas de las fuentes de información.

**Tabla 5-2:** Parámetros y ecuaciones del modelo dinámico para el sector transporte carretero en Colombia

Nombre	Dimensión	Unidad	Definición y comentarios
% alt_i	1:1	%	Porcentaje de vehículos en la categoría que operan con el combustible alternativo j. El crecimiento se da siguiendo la forma de la función logística.  $\%inicial + (\% alt_i 2050^2 / (1 + E^{(-0.3 * (TIME - STARTTIME - 33))}))$
% alt_i 2050	1:1	%	Parámetro - Porcentaje de vehículos en la categoría que se espera operen con el combustible alternativo j a 2050. Condiciones iniciales escenario optimista de entrada de tecnologías (UPME, 2015b).
% categoría ciudades	1:4	años	Parámetro - Porcentaje de vehículos por categoría en las principales ciudades del país (Bogotá, Medellín, Barranquilla y Cali) (UPME, 2015b).
Año_mejora_r_end	1:1	años	Parámetro - Año de entrada en rigor de políticas de mejora en rendimiento de combustible en vehículos.
Cons comb	1:1	barril/día	Consumo de combustible (gasolina o diésel) para las categorías de automóviles, camperos y camionetas.  $ARRSUM(('Total conv_j' / 'Rend por edad conv_j') * 'Recorrido prom categoría')$
Cons comb j	1:1	barril/día	Consumo de gasolina o diésel según el porcentaje de mezcla de biocombustibles



Nombre	Dimensión	Unidad	Definición y comentarios
			$'Cons\ comb^{**}\%mezcla\_comb$
Consumo biocomb j	1:1	barril/día	Consumo de etanol o biodiésel según el porcentaje de mezcla de biocombustibles $'Cons\ comb^{**}\%mezcla\_biocomb$
Conv_j Xaños	1:1	vehículos	Parámetro - Número de vehículos por rango de edad para automóviles, camperos y camionetas (Mintransporte, 2016)
Crecimiento categoría	1:1	%	Parámetro - Tasa geométrica de crecimiento del parque automotor por categoría (UPME, 2015c)
Distancia viaje categoría	1:4	km/viajes	Parámetro - Distancia recorrida por cada viaje en las principales ciudades (UPME, 2015c)
Entrada conv_j	1:1	vehículos	Entrada vehículos nuevos de gasolina o diésel para cada categoría, depende de vehículos nuevos que usan otro combustible. $Nuevos\_categoría-'Nuevos\ alt\_i'$
Env 1, 2, 3	1:1	vehículos	Salida de vehículos entre los grupos de edad para categorías automóviles, camperos y camionetas, pasando cada año una quinta parte de los vehículos $Conv\_j\ Xaños^{*}0.2$
Mejora rend_conv	1:1	km/galón	Parámetro - Aumento en el rendimiento de combustible según políticas de eficiencia
Nuevos alt_i	1:1	vehículos	Vehículos nuevos que usan combustibles diferentes a gasolina o diésel en cada categoría $((Vehículos\_categoría*(1+'Crecimiento\ categoría'))^{**}\%alt\_i)-'Vehículos\ alt\_i'+'Salida\ alt\_i'$
Nuevos_categoría	1:1	vehículos	Vehículos nuevos en cada categoría $(Vehículos\_categoría*'Crecimiento\ categoría')+'Salida\ categoría'$
Perd 1, 2, 3	1:1	vehículos	Salidas por pérdidas en las categorías automóviles, camperos y camionetas. Parametro estimado a partir de Mintransporte (2016). $Conv\_j\ Xaños^{**}fracción\ de\ pérdidas$
Recorrido prom categoría	1:1	km/(día*v ehículos)	Distancia promedio recorrida por vehículo en cada categoría $ARRAVERAGE(Recorrido\_categoría/('Vehículos\ categoría^{**}\%categoría\ ciudades'))$
Recorrido_categoria	1:4	km/día	Distancia recorrida en los viajes diarios por cada categoría en las principales ciudades. $Distancia\ viaje\ categoría^{**}Viajes\ categoría'$
Rend por edad conv_j	1:4	km/galón	Rendimiento promedio de combustible para las categorías de automóviles, camperos y camionetas según rango de edad, condicionado a la entrada de políticas de mejora en el rendimiento y a los cambios normales de rendimiento según la edad del vehículo (UPME, 2015b) $\{(IF('Mejora\ rend\_conv'=0<<km/galón>>,Rend\_conv+(Rend\_conv*0.001*(TIME-STARTTIME)),Rend\_conv+STEP('Mejora\ rend\_conv',STARTTIME+Año\_mejora\_rend))), (IF('Mejora\ rend\_conv'=0<<km/galón>>,Rend\_conv+(Rend\_conv*0.001*(TIME-STARTTIME)))-(Rend\_conv*0.005),Rend\_conv-$

Nombre	Dimensión	Unidad	Definición y comentarios
			$(Rend\_conv*0.005)+STEP('Mejora\ rend\_conv',STARTTIME+Año\_mejora\_rend+5))$ , ..., ...}
Rend_conv	1:1	km/galón	Parámetro - Rendimiento de gasolina o diésel para cada categoría (UPME, 2015b)
Salida alt_i	1:1	vehículos	Salidas de circulación según combustible alternativo con el que se opera  <i>'Vehículos alt_i'/'Vida útil categoría'</i>
Salida categoría	1:1	vehículos	Salidas de circulación por categoría  <i>'Salida alt_i'+'Total salidas conv_j'</i>
Salida conv_j	1:1	vehículos	Salidas de circulación de vehículos a gasolina o diésel por cumplimiento de vida útil para automóviles, camperos y camionetas (Mintransporte, 2016).  <i>'Conv_j más15años'*0.1</i>
Total conv_j	1:4	vehículos	Vehículos a gasolina o diésel en las categorías de automóviles, camperos y camionetas, considerando porcentaje de vehículos inactivos.  <i>{'Conv_j 1_5años','Conv_j 6_10años','Conv_j 11_15años','Conv_j más15años'*%inactivos}</i>
Total salidas conv_j	1:1	vehículos	Salidas de vehículos a gasolina o diésel por pérdidas y cumplimiento de vida útil para automóviles, camperos y camionetas  <i>'Perd 1'+ 'Perd 2'+ 'Perd 3'+ 'Salida conv_j'</i>
Vehículos alt_i	1:1	vehículos	Parámetro - Vehículos según tipo de combustible de operación para cada categoría. Parámetros a partir de la flota de 2014 (UPME, 2015b)
Vehículos categoría	1:1	vehículos	Parámetro - Vehículos por categoría (Mintransporte, 2016)
Viajes categoría	1:4	viajes/día	Porcentaje de viajes diarios en cada ciudad según categoría (UPME, 2015c).  <i>Viajes_ciudad*{0.19,0.2,0.12,0.13}</i>
Vida útil categoría	1:1	años	Parámetro - Vida útil de vehículos según categoría (Ernst & Young, 2017)  Autos, camperos, camionetas, buses, busetas, microbuses: 20 años Motos: 12 años Taxis: 5 años Camiones, tractocamiones: 10 años
Viajes_ciudad	1:4	viajes/día	Proyección de número de viajes diarios en cada una de las principales ciudades (UPME, 2015b).  $\{14.28e6<<viajes/da>>*((1+0.014)^(TIME-STARTTIME)),$ $6.06e6<<viajes/da>>*((1+0.02)^(TIME-STARTTIME)),$ $2.26e6<<viajes/da>>*((1+0.007)^(TIME-STARTTIME)),$ $3.70e6<<viajes/da>>*((1+0.014)^(TIME-STARTTIME))\}$

Fuente: elaboración propia.

### 5.3.2 Validación del modelo

Existen diferentes procedimientos que permiten la validación formal de un modelo dinámico primero evaluando su estructura y posteriormente su comportamiento en relación con el

mundo real (Barlas, 1996). A continuación, se presentan algunas pruebas de validación consideradas para el modelo:

- **Confirmación de parámetros:** al ser los datos que alimentan el modelo, se debe asegurar que la información ingresada al modelo tenga un significado claro y provenga de fuente confiables. Como se mencionó en la sección anterior, el modelo se construyó usando información disponible en fuentes oficiales y usada en otras proyecciones realizadas por la UPME.
- **Consistencia dimensional:** las relaciones entre parámetros, niveles y variables deben formularse teniendo en cuenta la consistencia entre las diferentes unidades. El modelo fue formulado en la versión académica del software PowerSim Studio 10, el cual verifica que cada una de las ecuaciones ingresadas al modelo este correctamente formulada en relación con las dimensiones.
- **Comportamiento histórico:** es posible usar la información disponible en el BECO relacionada con la demanda de transporte carretero y compararla con los resultados del modelo para el primer año de simulación. Para ello, las categorías de automóviles, camperos, camionetas y motos se encuentran agrupadas en el segmento de transporte privado de pasajeros; buses, busetas, microbuses y taxis en transporte público de pasajeros; y camiones y tractocamiones en transporte de carga. La tabla 5-3 muestra los porcentajes de error entre los datos reales de consumo reportados en el BECO y los obtenidos en el modelo para la gasolina y el diésel, mostrando que la estructura refleja de forma adecuada el comportamiento del sistema. Para el caso del diésel, que el porcentaje de error sea más alto puede deberse a gran parte de los vehículos que funcionan con este combustible y están en el segmento privado son de uso comercial y por lo tanto recorren mayores distancias que los vehículos del mismo segmento pero que funcionan a gasolina.

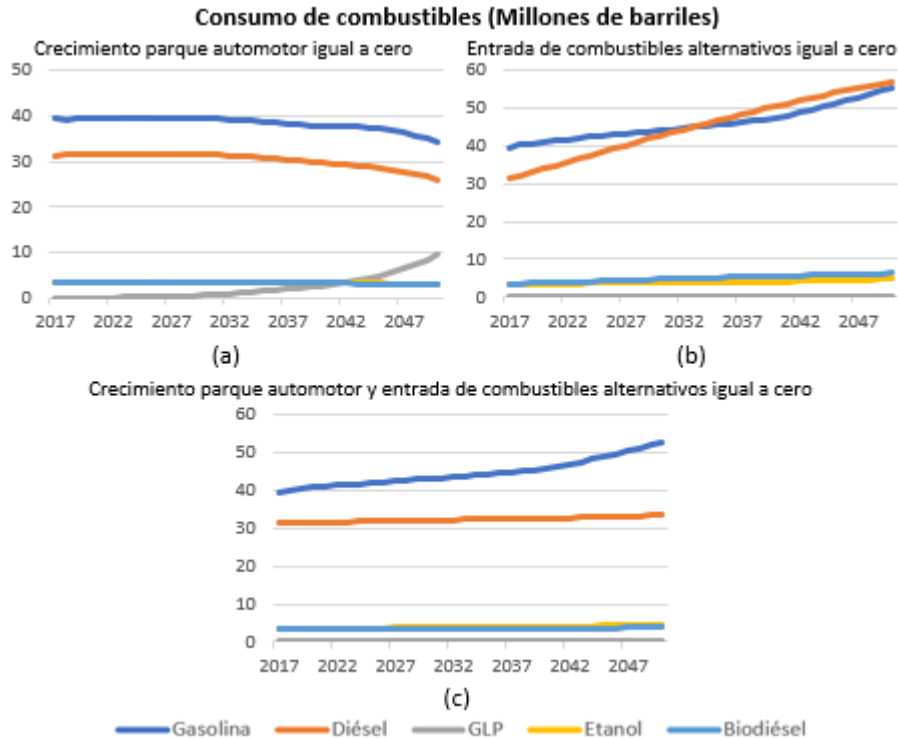
**Tabla 5-3:** Comparación del consumo real de combustibles en el 2016 con datos del modelo.

Segmento	Diésel (Bbl/año)		Gasolina (Bbl/año)	
	BECO	Modelo	BECO	Modelo
Privado	4.159	3.330	35.298	35.343
Público	11.662	11.998	5.130	5.266
Carga	19.515	19.473	2.016	2.116
<b>Total</b>	35.336	34.802	42.444	42.726
<b>%error</b>	1.51%		0.66%	

Fuente: elaboración propia a partir de información del BECO (UPME, 2018a)

- Valores extremos: para conocer el comportamiento del modelo ante situaciones extremas se propone igualar algunos parámetros a cero o a valores máximos para comparar los resultados con el sistema en la vida real. Al igualar las tasas de crecimiento del parque automotor y la entrada de vehículos con combustibles alternativos a cero, es posible analizar el comportamiento del consumo de gasolina, diésel y biocombustibles, como se muestra en la figura 5-7 (a) para crecimiento cero del parque automotor y los vehículos nuevos solo entran debido a sustitución por envejecimiento, permitiendo la entrada de pocos vehículos con tecnologías no convencionales como el GLP y disminuyendo la demanda de combustibles convencionales con el tiempo; 5-7 (b) donde se mantiene el crecimiento usando solo tecnologías convencionales, aumentando así el consumo de diésel y gasolina; y finalmente 5-7 (c), donde se analizan ambas situaciones en simultaneo, presentando un leve crecimiento en el consumo de gasolina y diésel a causa de la disminución en la economía de combustible por el envejecimiento del parque automotor.

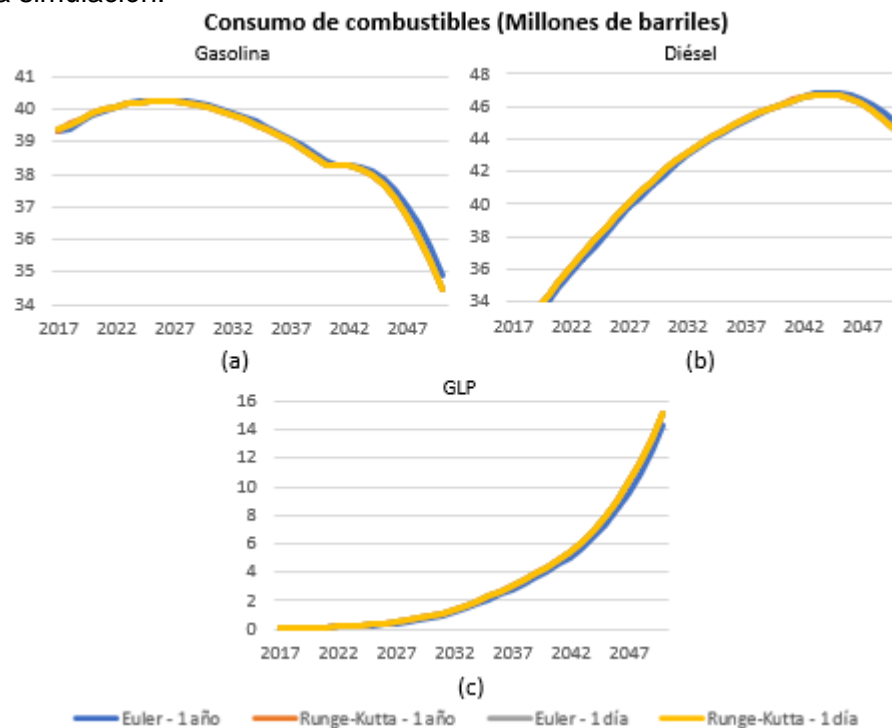
**Figura 5-7:** Resultados de simulación con valores extremos en el modelo.



Fuente: elaboración propia

- Errores de integración: El método de integración y el tamaño del paso de tiempo en la simulación pueden afectar los resultados obtenidos en el modelo, por lo tanto, es necesario probar su sensibilidad respecto a dichos factores. Al variar el método de integración entre Euler y Runge-Kutta y el paso de tiempo en cada simulación entre un día y un año, los resultados no muestran variaciones significativas, tal como se evidencia en la figura 5-8.

**Figura 5-8:** Resultados de simulación variando método de integración y tamaño de paso de la simulación.

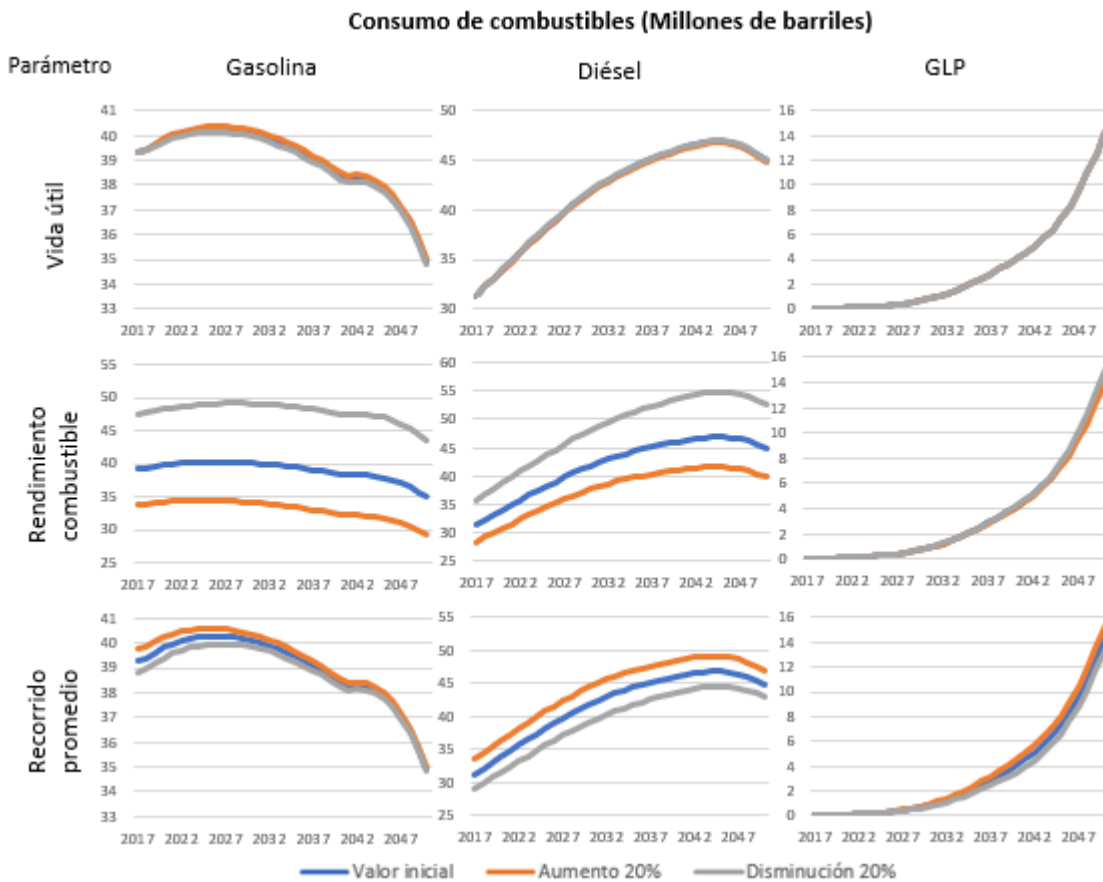


Fuente: elaboración propia

- Sensibilidad del modelo: Con el fin de conocer si variaciones en algunos de los parámetros iniciales del modelo pueden tener efectos significativos en los resultados, es posible hacer una prueba de sensibilidad al correr varias simulaciones cambiando los parámetros. Para esta prueba se modificó en un 20% (aumentando y disminuyendo) el valor inicial de la vida útil de los vehículos; el rendimiento de gasolina para vehículos de uso privado y de diésel para vehículos de carga; y el recorrido promedio de la flota de transporte público de pasajeros (exceptuando taxis). La figura 5-9 presenta los resultados de la prueba, mostrando que el modelo es muy sensible al rendimiento de

combustible, confirmando la necesidad de incluir el rendimiento de combustible como una variable controlada que representa políticas de mejoras en los estándares de eficiencia de vehículos, especialmente para el segmento de transporte privado, al ser uno de los de mayor crecimiento. En relación con el recorrido promedio, se evidencia que la mayor sensibilidad se da en el consumo de diésel, teniendo en cuenta que es uno de los principales combustibles en el segmento de transporte público de pasajeros. Sin embargo, en los tres casos de análisis el modelo conserva la tendencia de comportamiento.

**Figura 5-9:** Resultados de simulación en las pruebas de sensibilidad del modelo.



Fuente: elaboración propia

### 5.3.3 Evaluación de políticas

El PEN plantea un escenario tendencial, un primer escenario tecnológicos en el que considera la entrada de vehículos que operan con electricidad, GLP y GNV, y un segundo escenario tecnológico que da aun mayor relevancia a electricidad en detrimento del gas

natural; sin embargo, es el escenario Mundo Eléctrico el que considera a la electricidad como el energético predominante en todos los sectores y el último escenario establece aumentos en las metas de eficiencia energética (UPME, 2015a).

Teniendo en cuenta los escenarios del PEN, la tabla 5-4 presenta los escenarios a ser considerados en el modelo a partir de 5 variables: porcentaje de vehículos eléctricos y a GLP a 2050, aumento en el rendimiento de combustible en las categorías de automóviles, camionetas y camperos, y porcentaje de mezcla de biocombustibles para la gasolina y el diésel.

**Tabla 5-4:** Descripción de escenarios para la evaluación de políticas en el modelo.

Escenario		% Eléctricos	% GLP	% GNV	Rendimiento	% Biocombus.
ID	Nombre					
EB	Base	Bajo	Bajo	Medio	Medio	Medio
CA	Combustibles alternativos	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
PE	Trasporte público eléctrico	Alto	Medio	Bajo	Medio	Medio
ME	Motos eléctricas	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio
E1	Transporte privado eficiente (2022)	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Medio
E2	Transporte privado eficiente (2034)	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Medio
TE	Tecnológico (CA+E1)	Medio	Medio	Medio	Alto	Medio
TB	Tecnológico + Biocombustibles	Medio	Medio	Medio	Alto	Alto

Fuente: elaboración propia

La escala numérica correspondiente a las variables en cada uno de los escenarios y para cada categoría vehicular se presentan en la tabla 5-5. El escenario de combustibles alternativos se construyó basado en las metas a 2030 incluidas en el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018, las cuales se consideran inalcanzables en los plazos establecidos debido al comportamiento del mercado automotriz en Colombia (UPME, 2015b), por lo que es razonable extender su cumplimiento hasta el año 2050, buscando además que el cambio ocurra por el reemplazo natural del envejecimiento de la flota.

La línea de tiempo de adopción de estándares internacionales para el sector transporte muestra que en Colombia se exige el cumplimiento de la norma Euro 4 para vehículos livianos, a pesar de que a nivel internacional ya existen estándares más exigentes (UPME,

2015c), lo cual permite suponer que la eficiencia energética en el sector transporte puede aumentar con la entrada de tecnologías más recientes. Para la definición de los escenarios de transporte privado eficiente, el ejercicio del Semillero en Prospectiva Energética en Colombia sugiere en el mediano plazo un aumento del 35% de la eficiencia actual a un 45% debido a la reconversión tecnológica (Díaz, Acevedo, & López, 2017). Finalmente, respecto a los biocombustibles el último escenario contempla las mezclas de 20% de etanol y biodiésel (E20 y B20) de acuerdo tanto con las perspectivas de producción de biocombustibles en el país (Delgado, Salgado, Perez, & Eduardo, 2015), como con las condiciones de funcionamiento del parque automotor (Ríos, Quirama, Gaviria, & Ospina, 2012).

**Tabla 5-5:** Valores tomados por las variables en cada uno de los escenarios.

Variable	Categoría	Escenarios							
		EB	CA	PE	ME	E1	E2	TE	TB
% Eléctricos	Automóviles	0,01	13	13	13	0,01	0,01	13	13
	Camperos	0	11	11	11	0	0	11	11
	Camionetas	0	3	3	3	0	0	3	3
	Taxis	0,01	50	100	50	0,01	0,01	50	50
	Motos	0,01	55	55	100	0,01	0,01	55	55
	Buses	0	5	92	5	0	0	5	5
	Busetas	0	8	97	8	0	0	8	8
	Microbuses	0	4	93	4	0	0	4	4
% GLP	Automóviles	0	5	5	5	0	0	5	5
	Camperos	0	3	3	3	0	0	3	3
	Camionetas	0	5.5	5.5	5.5	0	0	5.5	5.5
	Motos	0	2	2	0	0	0	2	2
	Buses	0	8	8	8	0	0	8	8
	Busetas	0	3	3	3	0	0	3	3
	Microbuses	0	7	7	7	0	0	7	7
	Camiones	0	4	4	4	0	0	4	4
	Tractocamiones	0	25	25	25	0	0	25	25
%GNV	Taxis	50	50	0	50	50	50	50	50
	Buses	8	41	0	41	8	8	41	41
	Busetas	8	41	0	41	8	8	41	41
	Microbuses	10	47	0	47	10	10	47	47



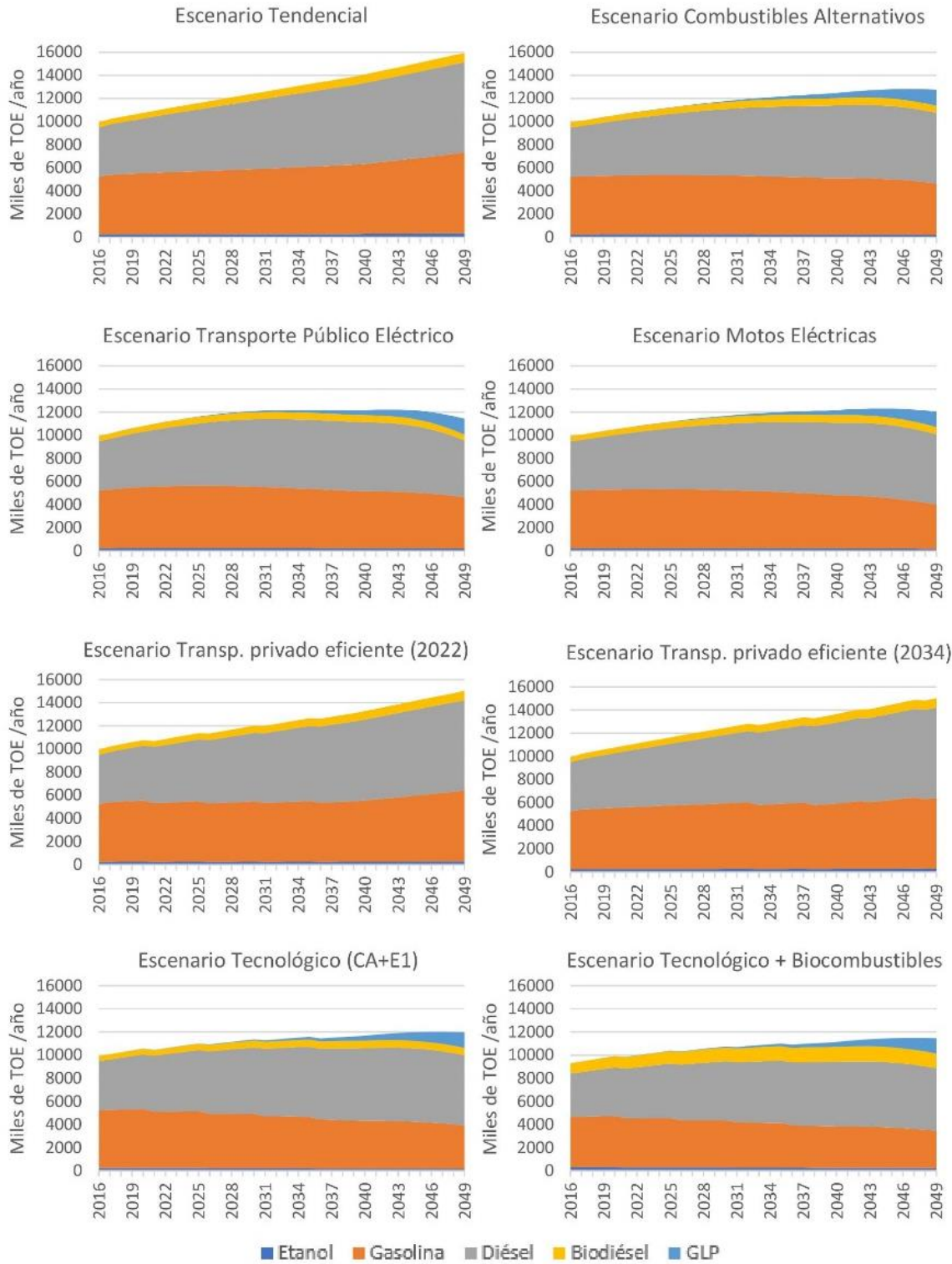
Variable	Categoría	Escenarios							
		EB	CA	PE	ME	E1	E2	TE	TB
<b>Rendimiento (km/galón)</b>	Privados (sin motos)	31	31	31	31	40	40	40	40
%	Etanol	E8	E8	E8	E8	E8	E8	E8	E20
<b>Biocombustible</b>	Biodiésel	B10	B10	B10	B10	B10	B10	B10	E20

Fuente: elaboración propia

Finalmente, al correr la simulación para cada uno de los escenarios, el modelo permite obtener el consumo de combustibles líquidos del parque automotor hasta el año 2050. La figura 5-10 presenta las gráficas de consumo de gasolina, diésel, GLP, etanol y biodiésel en función del tiempo. El ingreso de vehículos con tecnologías de combustibles alternativos resulta ser una medida eficiente especialmente en el caso de la gasolina, mostrando una disminución en el consumo luego de aproximadamente 6 años, reportando para 2050 un 36,4% menos de consumo en relación con el escenario tendencial y 11,2% menos que el consumo en el 2017. Respecto al diésel, la tendencia creciente de consumo se extiende por cerca de 20 años más; sin embargo, durante los últimos años se da una disminución alcanzado un 22% menos de consumo con respecto al escenario tendencial para el 2050, pero sigue siendo mayor que el consumo para el primer año de estudio.

La transición del total de la flota de transporte público a combustibles alternativos, principalmente a electricidad, hace que el consumo de diésel tenga un crecimiento moderado y en los últimos 10 años de simulación disminuya casi hasta igualar el consumo de gasolina, siendo 37,4% menos que en el escenario tendencial. En el caso de la electrificación del total de la flota de motos, el consumo de gasolina disminuya en 45,2% en relación con el escenario tendencial, mostrando que este tipo de vehículos representa gran parte del consumo de gasolina en el país, teniendo en cuenta que es un sustituto tanto del transporte público como de automóviles de transporte privado; por lo tanto, es una medida que puede resultar bastante exitosa en términos de reducción en el consumo de combustibles líquidos.

**Figura 5-10:** Consumo de combustibles líquidos del sector transporte carretero para cada uno de los escenarios.



Fuente: elaboración propia

En cuanto a la medida de mejora en eficiencia para autos particulares, camperos y camionetas, resulta ser efectiva para mantener un poco más estable el consumo de gasolina, disminuyendo la tasa de crecimiento en el consumo; sin embargo, en el largo plazo el consumo continuaría siendo mayor con respecto al año inicial y tan solo 12% menor en relación con el escenario tendencial. Además, el año de entrada en rigor de las mejoras en rendimiento tan solo tiene efecto en el corto plazo, obteniendo los mismos consumos para el 2050 en los dos escenarios de eficiencia.

Al combinar la entrada de combustibles alternativos con la mejora en el rendimiento de combustibles, el consumo de gasolina se ve disminuido en el 46,8% con respecto al escenario tendencial y en 53,7% para el escenario que considera también el aumento en la mezcla de biocombustibles. En ambos escenarios el consumo de gasolina en el 2050 llegue a ser menor que el consumo en el primer año de simulación, a pesar de que el parque automotor continúa creciendo en todas las categorías vehiculares. Finalmente, para el diésel en ninguno de los escenarios el consumo decrece durante las primeras dos décadas de análisis, mostrando que hacen falta medidas para los segmentos de transporte de carga y transporte público de pasajeros, los cuales son los principales consumidores de diésel.

### **5.3.4 Impactos sobre la seguridad energética**

De acuerdo con la definición presentada para la seguridad energética y sus dimensiones en el contexto colombiano, los cambios en factores tecnológicos de un sistema energético tienen efecto principalmente sobre la accesibilidad, al considerar la infraestructura disponible para su operación, y en la aceptabilidad, al modificar algunas formas de uso final. Para el subsistema del petróleo y los combustibles líquidos, las políticas energéticas analizadas en el sector transporte están dirigidas a cambios tecnológicos; por lo tanto, sobre la dimensión de disponibilidad no se consideran impactos significativos, pues no se intervienen las fuentes de energía primaria y los cambios en la oferta interna pueden ser balanceados con las exportaciones de petróleo crudo y de combustibles.

En cuanto a la asequibilidad, los cambios en la demanda energética probablemente tendrán impacto sobre los precios de los combustibles; sin embargo, teniendo en cuenta que los cambios se dan esencialmente en la gasolina y el diésel donde los precios son

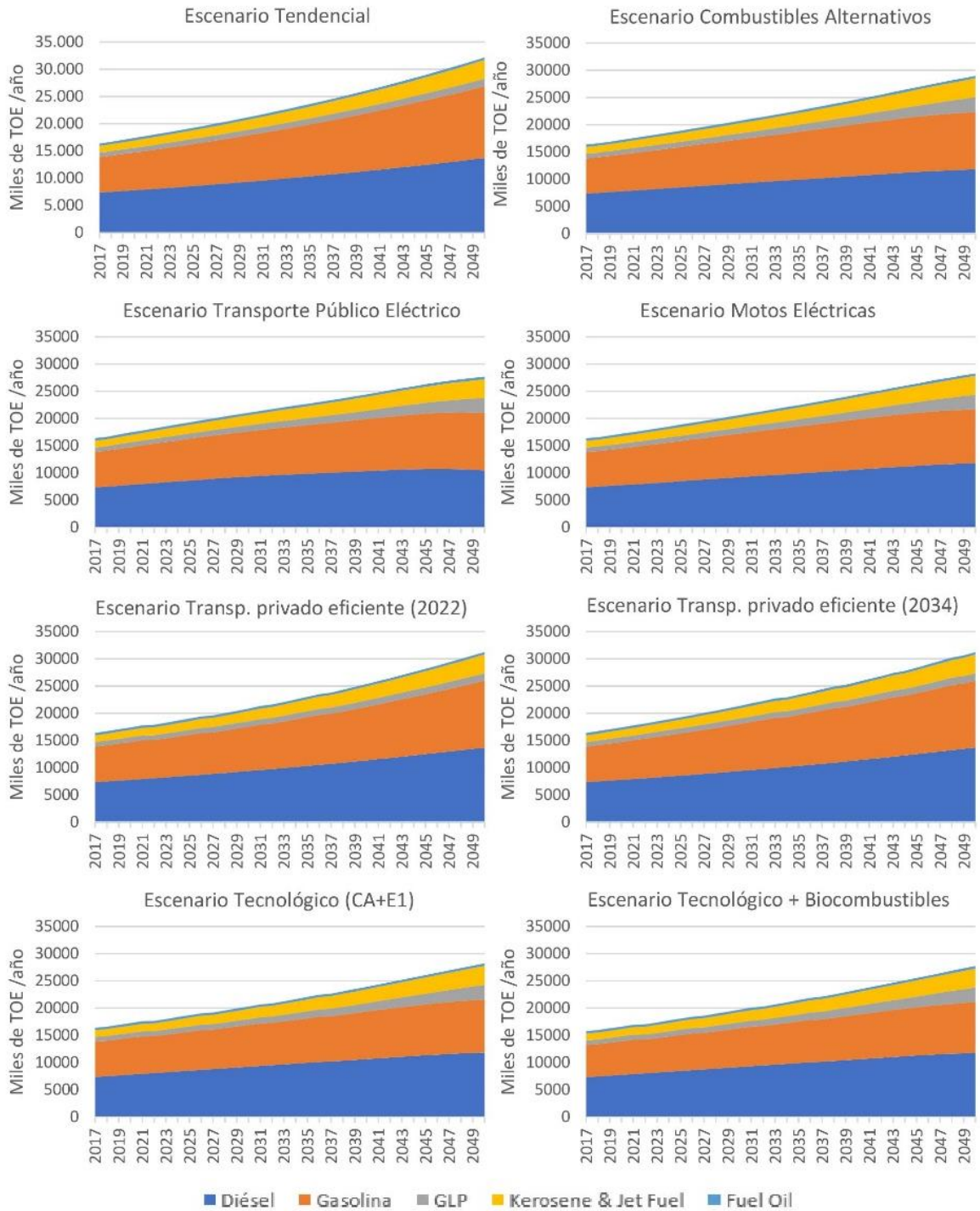
regulados y existe una fuerte dependencia de los precios internacionales del petróleo, los impactos en esta dimensión no pueden ser analizados con la información suministrada por el modelo dinámico.

Los impactos sobre las dimensiones de accesibilidad y aceptabilidad pueden estimarse mediante la proyección de los indicadores propuestos para la seguridad energética que presentan cambios debido a las políticas modeladas, que serían la intensidad de consumo de combustibles (consumo per cápita) y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al uso de petróleo y combustibles líquidos. Para comparar los diferentes escenarios evaluados en el modelo, la proyección de demanda al año 2050 se construyó a partir del escenario tendencial del Plan Energético Nacional y las diferentes publicaciones de la UPME (UPME, 2015a).

El Plan Indicativo de Abastecimiento de Gas Licuado del Petróleo proyecta la demanda nacional de GLP para el año 2030 alrededor de los 25.000 barriles por día, estableciendo una tasa de crecimiento del 1,5% promedio anual a partir del 2018, considerando solo los sectores residencial, comercial e industria, sin entrada de vehículos que funcionen con GLP (UPME, 2018d). Respecto a los demás combustibles, el Plan de Abastecimiento de Combustibles Líquidos en el escenario tendencial no considera la entrada de nuevas tecnologías vehiculares ni mejoras en eficiencia, mostrando una tasa de crecimiento promedio anual del 2,17% para la gasolina, 1,9% para el diésel y 3,16% para el Jet Fuel debido a la expectativa de crecimiento de viajes en transporte aéreo, mientras que para el Fuel Oil se considera un comportamiento constante, pues su uso es principalmente para generación eléctrica e industria y no existe una tendencia clara de crecimiento (UPME, 2018c).

La figura 5-11 muestra la proyección del consumo total de combustibles líquidos para cada uno de los escenarios modelados e incluyendo todos los sectores, en donde existe una tendencia continua de crecimiento en la demanda, alcanzando un máximo para el escenario tendencial de 32.181 kToe en el año 2050, con una predominancia contundente del diésel y la gasolina.

**Figura 5-11:** Proyección de la demanda de combustibles líquidos en Colombia.



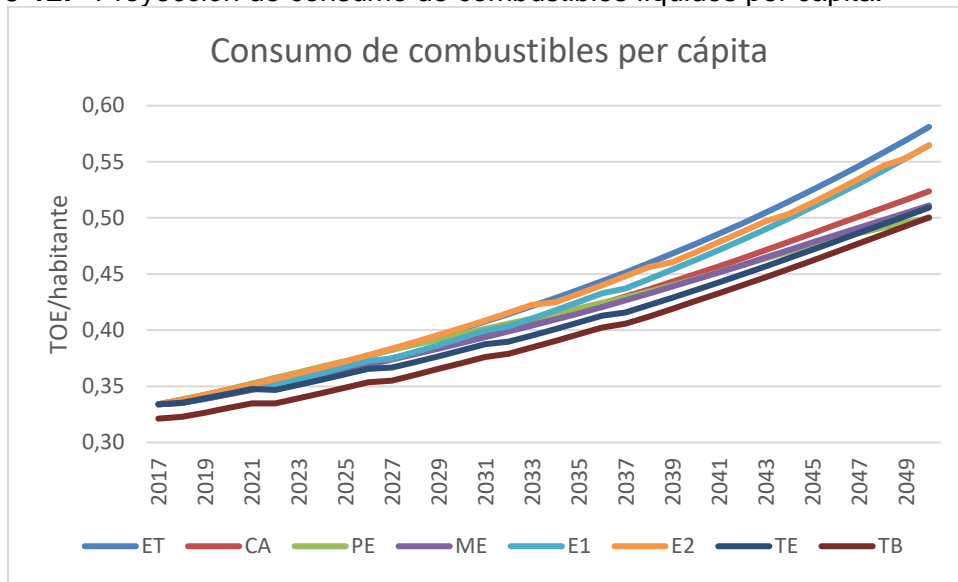
Fuente: elaboración propia, (UPME, 2018c).

En comparación con el escenario tendencial, los que presentan una menor diferencia son los escenarios de incorporación de mejoras en eficiencia del transporte privado, disminuyendo tan solo 2,82% del consumo de combustibles líquidos. Esto se debe principalmente a que la entrada de nuevo vehículos continúa siendo con combustibles convencionales y la eficiencia depende de la edad del parque automotor. En todos los demás escenarios el aumento en consumo de GLP favorece la diversificación de la canasta de combustibles, logrando un crecimiento más lento en el consumo de combustibles convencionales.

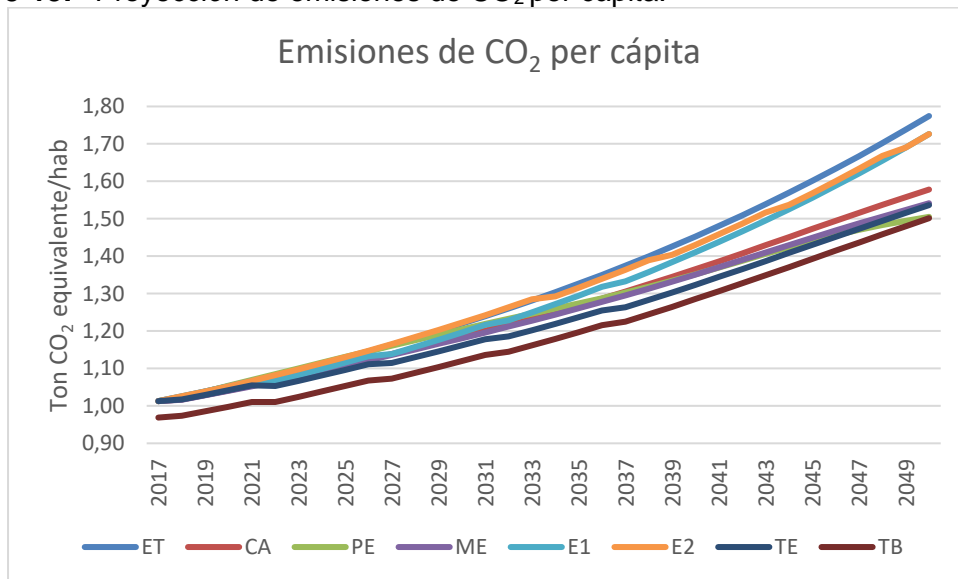
La reducción en la demanda de combustibles es similar en los escenarios de electrificación del transporte público y en el de electrificación de la flota de motocicletas, logrando una reducción con respecto al escenario tendencial del 13,9% y del 12,1%, respectivamente. También existe una reducción similar en el último escenario, en el cual se considera la entrada de combustibles alternativos y el aumento en la mezcla de biocombustibles, logrando 13,8% menos consumo que en el escenario tendencial. La ventaja que trae la implementación del último escenario es que, a diferencia de los de electrificación, este no requiere el reemplazo anticipado de gran parte de la flota, sino que se da con la reposición natural de vehículos que salen de circulación.

Respecto a las emisiones de dióxido de carbono, nuevamente pueden estimarse a partir de los factores de emisión para los combustibles en el país (UPME, 2018a), dando como resultado un comportamiento similar al de la demanda total de combustibles, por lo que en todos los escenarios la tendencia es creciente.

Finalmente, usando la proyección de población para Colombia de acuerdo con la CEPAL (2017), es posible calcular la intensidad de consumo de combustibles y de emisiones de CO<sub>2</sub>, como se muestra en la Figura 5-12 y en la Figura 5-13, respectivamente. En las gráficas resulta evidente que existe un aumento continuo para ambos indicadores, esto a pesar de la disminución en el consumo total de combustibles lograda por las políticas en relación con el escenario tendencial.

**Figura 5-12:** Proyección de consumo de combustibles líquidos per cápita.

Fuente: elaboración propia

**Figura 5-13:** Proyección de emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita.

Fuente: elaboración propia

El cálculo de un indicador agregado para la dimensión de aceptabilidad en el largo plazo no resulta conveniente en este estudio, pues involucra dos indicadores con un alto grado de incertidumbre que no hacen parte del modelo: atentados contra la infraestructura e incidentes operacionales. Respecto a la dimensión de accesibilidad, es posible determinar

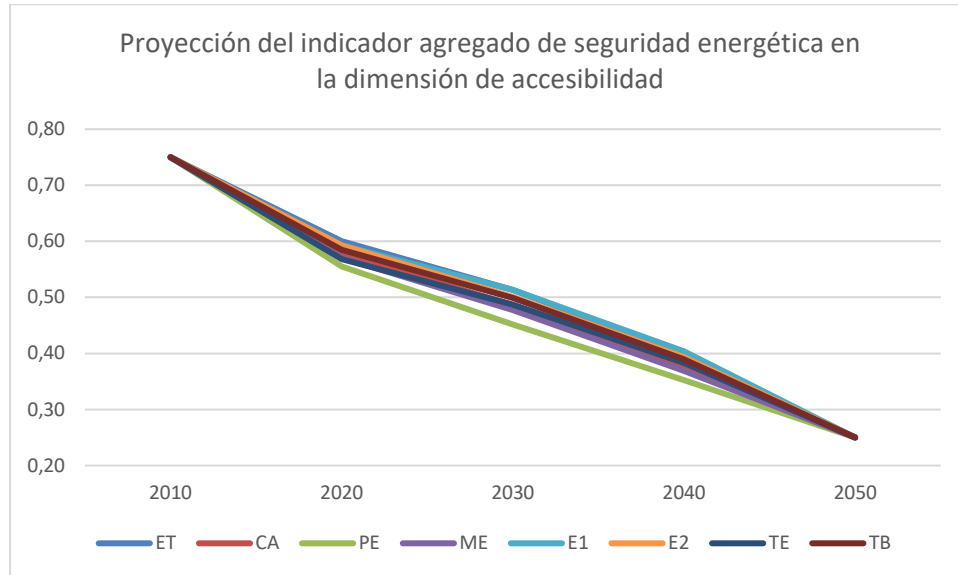
el comportamiento de todos los indicadores para el horizonte de análisis considerando los siguientes supuestos:

- En la oferta de combustibles el Plan de Abastecimiento de Combustibles Líquidos (UPME, 2018c) supone que la carga a refinerías se mantiene constante cerca de los 355.000 Barriles por día, considerando un factor de utilización del 90% para la refinería de Cartagena y del 80% para la refinería de Barrancabermeja, según sus capacidades nominales y las interrupciones por mantenimiento y daños operacionales.
- Teniendo en cuenta que la capacidad de refinación permanece constante y que la dieta de las refinerías requiere importación de crudo y de combustibles, según el comportamiento histórico se puede asumir que cerca del 27% del consumo de combustibles líquidos se cubre con importaciones (UPME, 2018a).
- Respecto a los biocombustibles, considerando que hasta 2016 solo se importaba etanol y que existe la expectativa de producción de biocombustibles de segunda y tercera generación para garantizar el porcentaje de mezcla establecido por el MME (UPME, 2018b), se puede asumir que las importaciones se mantienen constantes gracias al aumento en la capacidad de producción.

Así, de acuerdo con la información anterior, la figura 5-14 presenta la evolución del indicador agregado de seguridad energética para la dimensión de accesibilidad entre 2010 y 2050, para cada uno de los escenarios modelados, en la que observa un comportamiento decreciente en todos los casos, demostrando así que las políticas energéticas para el sector transporte no representan una mejora en el estado de seguridad energética en el largo plazo. Este resultado es de esperarse teniendo en cuenta que para el indicador de intensidad de consumo la tendencia deseada es decreciente y en ninguno de los escenarios se logra tener valores para este indicador por debajo del valor para el año base 2016.



**Figura 5-14:** Proyección del indicador agregado de seguridad energética en la dimensión de accesibilidad para la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia



Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el modelo entrega información útil para evaluar los impactos sobre el estado de la seguridad energética, pero que el análisis depende en gran medida del marco temporal en el que se evalúe. Para el caso de las políticas energéticas en el sector transporte, los cambios sobre la seguridad energética continúan siendo desfavorables en comparación con el estado actual; sin embargo, si se comparan los resultados para el último año de simulación, se podría afirmar que hay mejoras en el estado de seguridad energética con respecto al estado esperado para el mismo año en el escenario tendencial, en donde no entra en rigor ninguna de las políticas analizadas. Además, también resulta evidente que el cálculo de indicadores agregados es útil para comparar temporalmente, pero que, teniendo en cuenta que los indicadores para la dimensión de accesibilidad tienen comportamiento creciente en todos los escenarios modelados, no permite hacer comparaciones entre ellos, pues al utilizar valores normalizados todos los escenarios presentan el mismo valor para el indicador en los años 2010 y 2050 por tener los valores mínimos y máximos, respectivamente.



## **6. Conclusiones y recomendaciones**

### **6.1 Conclusiones**

A partir de la revisión de literatura académica es posible concluir que el análisis de la seguridad energética necesariamente requiere considerar el contexto de los sistemas energéticos en estudio, incluyendo todos los factores que representen algún tipo de amenaza para su correcto funcionamiento. Además, también se concluye que en el estudio de la seguridad energética debe diferenciarse entre el análisis en el corto plazo, en relación con la mitigación de riesgos, y en el largo plazo, en relación con la planeación y evaluación de políticas energéticas, pero siempre manteniendo como objetivo garantizar la mínima vulnerabilidad y probabilidad de daño de los sistemas energéticos.

En cuanto a la seguridad energética en el contexto colombiano, es fundamental reconocer la abundancia en fuentes de energía primaria; sin embargo, existen limitaciones en infraestructura que afectan la independencia energética, especialmente en relación con los procesos de transformación y transporte de energéticos. Esta particularidad hace que en Colombia la seguridad energética deba ser abordada desde una perspectiva integrada, involucrando la seguridad de suministro, para satisfacer la demanda interna de forma confiable y segura, y la seguridad de demanda, buscando mantener estables los mercados de energía que representan importantes fuentes de ingreso para la nación.

El análisis por dimensiones de la seguridad energética permite relacionar cada dimensión con las diferentes etapas de la cadena energética y facilita la identificación de amenazas sobre los sistemas energéticos, sin importar que el análisis sea sectorial, local, regional o nacional. Las dimensiones consideradas en esta investigación fueron: disponibilidad, en relación con el acceso a fuentes primarias de energía; accesibilidad, que considera la existencia y el correcto funcionamiento de infraestructura para satisfacer la demanda de energéticos; asequibilidad, en relación con la estabilidad de los mercados de energía y la

cobertura en la prestación de servicios energéticos; y finalmente la aceptabilidad, que considera la relación entre los sistemas energéticos, las comunidades y el ambiente.

De acuerdo con el balance energético colombiano, la cadena del petróleo y los combustibles líquidos juega un papel fundamental para lograr satisfacer la demanda interna de energía; además, según el panorama económico del país, de esta cadena depende gran parte de la inversión extranjera directa y de los ingresos por exportaciones. Lo anterior permite concluir que la cadena del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia puede ser considerada como un subsistema crítico, por lo tanto, la estimación del estado de su seguridad energética es de gran relevancia en la evaluación del estado de mínima vulnerabilidad y probabilidad de daño de todo el sistema energético nacional.

En cuanto a la metodología para evaluar el estado de seguridad energética de la cadena el petróleo y los combustibles líquidos en Colombia, el uso de indicadores resulta ser de gran utilidad, pues es posible encontrar una relación clara entre indicadores, dimensiones, etapas de la cadena y posibles amenazas sobre el subsistema. Además, considerando que para cada indicador debe establecerse un comportamiento esperado, es posible reconocer impactos sobre la seguridad energética a través del monitoreo y seguimiento de los indicadores en el corto, mediano y largo plazo.

Sin embargo, una de las limitaciones identificadas en el uso de indicadores fue el acceso a fuentes de información de calidad, ya que muchos de ellos demandan gran cantidad de datos, que además deben ser medidos con regularidad. En el caso colombiano los datos no se encuentran centralizados y muchos de los sistemas de información no son actualizados, como sucede con algunas series de datos del SIPG, y en otros casos la información no es de acceso público, como sucede con el SICOM.

Otra limitación tiene que ver con el análisis y la presentación de la información, pues al trabajar con un gran número de indicadores es difícil concluir sobre el estado real de la seguridad energética de un sistema. La agregación de indicadores por dimensiones soluciona parte del problema, al reunir varios indicadores en un solo dato, el cual permite identificar tendencias de comportamiento en un horizonte de tiempo establecido. Sin embargo, para que el comportamiento de los indicadores agregados responda a cambios en factores críticos, es necesario el uso de pesos que den importancia relativa a cada uno

de los indicadores dentro de una dimensión. Dichos pesos pueden ser obtenidos a través del criterio de expertos o con uso de herramientas de análisis multiobjetivo, que en algunos casos requieren el uso de información adicional.

Respecto al uso de indicadores también se concluye que, para el análisis de amenazas puntuales y la estimación de impactos por acciones ejercidas sobre los sistemas energéticos, la información debe estar disponible en forma desagregada, esto teniendo en cuenta que de un mismo indicador se pueden esperar comportamientos distintos según lo que se desee conocer. Por ejemplo, si se analiza la independencia energética, el comportamiento esperado de la carga en refinerías sería creciente, mientras que, si se analiza en relación con la capacidad de la infraestructura, el comportamiento esperado sería decreciente.

De los indicadores agregados se concluye que el estado de seguridad energética para la cadena del petróleo y los combustibles líquidos es más favorable para la dimensión de disponibilidad, pues a pesar de los cambios en la relación reservas/producción de petróleo, la oferta interna y el auto abastecimiento no se ven muy afectados, debido a que gran parte de la producción nacional es destinada a exportaciones. Por otro lado, considerando los resultados para la dimensión de asequibilidad, es posible identificar como amenaza la dependencia a recursos de inversión extranjera para la exploración de hidrocarburos, pues los años donde el precio del petróleo y las inversiones han disminuido, la incorporación de nuevas reservas ha sido menor.

Respecto a la accesibilidad, la disminución en la carga a refinerías durante varios años, a pesar del aumento en el consumo y en las importaciones de combustibles, permite concluir que otra de las grandes amenazas para la seguridad energética de la cadena del petróleo y los combustibles líquidos es la infraestructura de transformación, ya que aun con la entrada en funcionamiento en 2016 de las actualizaciones de la Refinería de Cartagena, siguen siendo necesarias las importaciones de crudos livianos y de combustibles para garantizar la calidad de la producción doméstica.

En cuanto a la aceptabilidad, junto con los indicadores adicionales de sostenibilidad, se concluye que la institucionalidad y factores relacionados con el conflicto son aspectos relevantes en la seguridad energética para el contexto colombiano. Una de las principales

amenazas está relacionada con los daños intencionales sobre la infraestructura de transporte de petróleo y combustibles líquidos, que además de poner en riesgo la prestación de servicios energéticos, generan afectaciones ambientales a causa de los derrames.

Además, teniendo en cuenta que las dimensiones propuestas para la seguridad energética se relacionan con las etapas de la cadena de suministro, se puede establecer que la producción, las importaciones y el consumo de combustibles tienen especial relevancia en las dimensiones de accesibilidad, asequibilidad y aceptabilidad. Al analizar los indicadores relacionados con los combustibles, es de destacar que gran parte de su oferta es destinada a cubrir la demanda interna y que el principal consumidor es el sector transporte, seguido por el sector industria y la generación térmica.

Finalmente, respecto a la estimación de impactos en el largo plazo sobre la seguridad energética, el uso de un modelo dinámico permite cuantificar cambios en algunos indicadores de acuerdo con los escenarios construidos a partir de acciones propuestas en las políticas energéticas para el sector transporte. Como ventaja, el modelo dinámico permite realizar simplificaciones y concentrar el análisis en una parte del subsistema, que para esta investigación es el parque automotor nacional.

Sin embargo, el modelo también presenta algunas limitaciones, especialmente en relación con la gran cantidad de supuestos necesarios para su elaboración, los cuales aumentan el grado de incertidumbre de los resultados. Estimaciones como la proyección de población y el crecimiento del parque automotor podrían ser consideradas como variables dentro del modelo para reducir la incertidumbre, pero aumentarían la complejidad en la evaluación de escenarios. Otra de las limitaciones tiene que ver con la incorporación en el modelo de políticas de reemplazo de vehículos, incluyendo conversiones y chatarrizaciones, ya que no lograron ser incluidas directamente, debido a la necesidad de información detallada del parque automotor que no se encontraba disponible.

Con los resultados se concluye que el estado de seguridad energética en el largo plazo no logra ninguna mejora con la entrada en rigor de las políticas analizadas, esto si se evalúa con respecto al estado actual, ya que los indicadores de intensidad de consumo de combustibles y emisiones de CO<sub>2</sub> continúan con un crecimiento continuo hasta el 2050.

Sin embargo, si se analiza en comparación con un escenario tendencial, es posible afirmar que las políticas tienen un efecto favorable sobre el estado de seguridad energética en el largo plazo. Esto demuestra que el análisis de la seguridad energética depende en gran medida del horizonte de tiempo en el que se evalúe y también comprueba que el análisis de la seguridad energética entrega información relevante para la toma de decisiones, tanto en la evaluación de políticas como en la mitigación de riesgos.

Respecto a las políticas energéticas sobre el sector transporte, teniendo en cuenta que la población continúa en aumento y por consiguiente también lo hará la demanda energética, se concluye que hacen falta acciones que vayan más allá de la diversificación de la canasta de combustibles y que busquen disminuir la intensidad de consumo de todo el parque automotor, incluyendo vehículos antiguos con tecnologías convencionales. Ese tipo de políticas se mencionan dentro del escenario Ciudades Sostenibles del PEN, pero no hay acciones que apunten a ellas dentro de los planes indicativos evaluados para el sector energético. Finalmente, esto sugiere que, si bien el análisis aislado de algunas políticas sectoriales permite estimar impactos en el estado de la seguridad energética, un modelo integrado y multisectorial entregaría una visión mucho más completa del futuro energético del país.

## 6.2 Recomendaciones

Como se mencionó en el desarrollo de esta investigación, el cálculo de indicadores se priorizó considerando la disponibilidad de información, por lo que se recomienda también incluir en el análisis de la seguridad energética algunos de los indicadores que no pudieron ser calculados, especialmente los relacionados con el almacenamiento y el transporte de combustibles. La información para su cálculo se encuentra disponible en el SICOM; sin embargo, no es de acceso público.

Para la elaboración del modelo no se contó con la información actualizada del parque automotor por parte del RUNT, por lo que se recomienda que el modelo sea considerado como una propuesta para el análisis de los impactos sobre el estado de la seguridad energética, pero que debe ser ajustado con información más precisa, incluyendo por ejemplo la entrada de vehículos híbridos, que no fueron incluidos por falta de información

sobre su rendimiento de combustibles y por el bajo porcentaje de estos en las metas de sustitución.

Considerando que los resultados del modelo arrojan que el impacto sobre la seguridad energética debido a la disminución en el consumo de combustibles no es significativo, sería valioso analizar el impacto de forma conjunta con el cambio en patrones de consumo de otras formas de energía como el gas natural y la electricidad, que posiblemente entregue resultados positivos en relación con la diversificación de fuentes de energía.

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se recomienda que en trabajos futuros se incluya el análisis de impactos sobre la seguridad energética integrando políticas de movilidad sostenible, como son el uso compartido y el transporte público multimodal. También se recomienda profundizar en un modelo para evaluación de impactos que incluya información más detallada y precisa en relación con las edades del parque automotor, características del transporte público colectivo y que incorpore cambios en los precios de combustibles y el efecto de costos en la sustitución de vehículos convencionales por vehículos con tecnologías alternativas. Finalmente, también se recomienda considerar la evaluación del estado de la seguridad energética para otros subsistemas en el país, incluyendo análisis regionales y la evaluación de impactos sobre amenazas puntuales para la seguridad energética de Colombia a partir del uso de indicadores.



## Bibliografía

- Ang, B. W., Choong, W. L., & Ng, T. S. (2015). Energy security: Definitions, dimensions and indexes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.  
<http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.064>
- ANH. (2018a). Contratos. Retrieved July 27, 2018, from  
<http://www.anh.gov.co/portalregionalizacion/Paginas/Los-contratos.aspx>
- ANH. (2018b). Estadísticas del sector. Retrieved May 21, 2018, from  
<http://www.anh.gov.co/Operaciones-Regalias-y-Participaciones/Sistema-Integrado-de-Operaciones/Paginas/Estadisticas-de-Produccion.aspx>
- Baena, A. I. (2011). *Dinámica de la penetración de tecnologías alternativas para vehículos automotores y su impacto en las concentraciones de carbono atmosférico*. Universidad Nacional de Colombia.
- Bambawale, M. J., & Sovacool, B. K. (2012). Energy Security: Insights from a Ten Country Comparison. *Energy & Environment*. <http://doi.org/10.1260/0958-305X.23.4.559>
- Banco de la República. (2018). Flujos de inversión directa - balanza de pagos. Retrieved July 28, 2018, from <http://www.banrep.gov.co/es/inversion-directa>
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*. [http://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199623\)12:3<183::AID-SDR103>3.3.CO;2-W](http://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<183::AID-SDR103>3.3.CO;2-W)
- Bedoya, L. F. (2017). *Efectos del Desarrollo Tecnológico de las Baterías en el Sistema Interconectado Nacional de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Bompard, E., Carpignano, A., Erriquez, M., Grosso, D., Pession, M., & Profumo, F. (2017). National energy security assessment in a geopolitical perspective. *Energy*. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.108>
- CEEESA. (2018). Energy and Power Evaluation Program (ENPEP-BALANCE). Retrieved October 28, 2018, from <https://ceesa.es.anl.gov/projects/Enpepwin.html>
- CEPAL. (2017). Estimaciones y proyecciones de población total, urbana y rural, y

- económicamente activa. Retrieved October 28, 2018, from <https://www.cepal.org/es/temas/proyecciones-demograficas/estimaciones-proyecciones-poblacion-total-urbana-rural-economicamente-activa>
- Cherp, A., & Jewell, J. (2011). The three perspectives on energy security: Intellectual history, disciplinary roots and the potential for integration. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. <http://doi.org/10.1016/j.cosust.2011.07.001>
- Cherp, A., & Jewell, J. (2014). The concept of energy security: Beyond the four as. *Energy Policy*. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.09.005>
- Chester, L. (2010). Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature. *Energy Policy*. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.039>
- DANE. (2018). Estadísticas por tema. Retrieved July 27, 2018, from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema>
- Delgado, J. E., Salgado, J. J., Perez, R., & Eduardo, J. (2015). Perspectivas de los biocombustibles en Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*.
- Díaz, C. A., Acevedo, C., & López, D. A. (2017). Impacto de la Eficiencia Energética en el Consumo final de Energía: escenarios prospectivos. Retrieved from <http://energycolombia.org/images/MEMORIAS/2016/PROSPECTIVAS/EficienciaenergeticaenColombia.pdf>
- Dike, J. C. (2013). Measuring the security of energy exports demand in OPEC economies. *Energy Policy*. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.086>
- Ecopetrol. (2014). Monitoreo Calidad de los Combustibles. Retrieved August 15, 2018, from [https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/productos-y-servicios/productos/combustible-liquido2/informacion-comercial/monitoreo-calidad-de-los-combustibles!/ut/p/z0/04\\_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfljo8ziLQIMHd09DQy9DZwt3QwcjTwsQxw9g5x8A4z0C71dFQH8](https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/productos-y-servicios/productos/combustible-liquido2/informacion-comercial/monitoreo-calidad-de-los-combustibles!/ut/p/z0/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfljo8ziLQIMHd09DQy9DZwt3QwcjTwsQxw9g5x8A4z0C71dFQH8)
- EIA. (2018). Petroleum & Other Liquids. Retrieved May 27, 2018, from <https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/RWTCD.htm>
- Energy Charter Secretariat. (2015). International Energy Security: Common Concept for Energy Producing, Consuming and Transit Countries. Retrieved from [https://energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Thematic/International\\_Energy\\_Security\\_2015\\_en.pdf](https://energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Thematic/International_Energy_Security_2015_en.pdf)
- Ernst & Young. (2017). *Proyecto: estructurar el mapa de ruta para la transición hacia los*

- vehículos de bajas y cero emisiones en Colombia*. Retrieved from <https://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1160>
- European Commission. (2014). European Energy Security Strategy. Brussels. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0330&from=EN>
- Hughes, L. (2012). A generic framework for the description and analysis of energy security in an energy system. *Energy Policy*. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.079>
- IDEAM. (2016). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011-2015*. Bogotá D.C. Retrieved from [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023637/Informe\\_del\\_Estado\\_de\\_la\\_Calidad\\_del\\_Aire\\_en\\_Colombia\\_2011-2015\\_vfinal.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023637/Informe_del_Estado_de_la_Calidad_del_Aire_en_Colombia_2011-2015_vfinal.pdf)
- IEA. (2017). Energy Access Outlook 2017: From poverty to prosperity. *International Energy Agency*, 94(March), 144. <http://doi.org/10.1787/9789264285569-en>
- Institut Choiseul, & KPMG. (2016). *Choiseul Energy Index*. Retrieved from <http://choiseul.info/wp-content/uploads/2016/02/Choiseul-Energy-Index-2016.pdf>
- Jewell, J., Cherp, A., & Riahi, K. (2014). Energy security under de-carbonization scenarios: An assessment framework and evaluation under different technology and policy choices. *Energy Policy*. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.051>
- Johansson, B. (2013). A broadened typology on energy and security. *Energy*. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.012>
- Jonsson, D. K., Johansson, B., Månsson, A., Nilsson, L. J., Nilsson, M., & Sonnsjö, H. (2015). Energy security matters in the EU Energy Roadmap. *Energy Strategy Reviews*. <http://doi.org/10.1016/j.esr.2015.03.002>
- Kaygusuz, K. (2012). Energy for sustainable development: A case of developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.013>
- Keirstead, J., Jennings, M., & Sivakumar, A. (2012). A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.047>
- Keppler, J. H. (2007). International Relations and Security of Energy Supply: Risks to Continuity and Geopolitical Risks. Energy Program of the French Institute for International Relations. Retrieved from

- [http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2004\\_2009/documents/dv/studykeppl/studykeppler.pdf](http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2004_2009/documents/dv/studykeppl/studykeppler.pdf)
- Kruyt, B., van Vuuren, D. P., de Vries, H. J. M., & Groenenberg, H. (2009). Indicators for energy security. *Energy Policy*. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.006>
- Lima, C., Relvas, S., & Barbosa-Póvoa, A. P. F. D. (2016). Downstream oil supply chain management: A critical review and future directions. *Computers & Chemical Engineering*. <http://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.05.002>
- Livingston, D., & Feldman, J. (2016). *Sustainable Energy Security: A Transatlantic Opportunity*. Retrieved from [https://us.boell.org/sites/default/files/sustainable\\_energy\\_security\\_report\\_final.pdf](https://us.boell.org/sites/default/files/sustainable_energy_security_report_final.pdf)
- Månsson, A. (2016). Energy security in a decarbonised transport sector: A scenario based analysis of Sweden's transport strategies. *Energy Strategy Reviews*. <http://doi.org/10.1016/j.esr.2016.06.004>
- Martchamadol, J., & Kumar, S. (2013). An aggregated energy security performance indicator. *Applied Energy*. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.027>
- Martínez-Jaramillo, J. E., Arango-Aramburo, S., Álvarez-Uribe, K. C., & Jaramillo-Álvarez, P. (2017). Assessing the impacts of transport policies through energy system simulation: The case of the Medellín Metropolitan Area, Colombia. *Energy Policy*. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.026>
- Mintransporte. (2016). *Transporte en cifras - Estadísticas 2016*.
- Morales, B. (2014). *Modelo de Masificación de Vehículos Eléctricos en Bogotá D.C.* Universidad Nacional de Colombia.
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffman, A., & Giovannini, E. (2005). *OECD Handbook on constructing composite indicators. OECD Statistics Working Papers*. <http://doi.org/10.1787/533411815016>
- Narula, K., Sudhakara Reddy, B., & Pachauri, S. (2017). Sustainable Energy Security for India: An assessment of energy demand sub-system. *Applied Energy*. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.142>
- Nieves Zárate, M., & Hernández Vidal, A. (2016). *Reporte de Inversión Energética en Colombia*. Bruselas. Retrieved from [https://energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Other\\_Publications/20170103-Reporte\\_de\\_Inversion\\_Energetica\\_en\\_Colombia.pdf](https://energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Other_Publications/20170103-Reporte_de_Inversion_Energetica_en_Colombia.pdf)
- O'Connor, P. A. (2010). Energy Transitions. *The Pardee Papers*. The Frederick S. Pardee

- Center for the Study of the Longer-Range Future Boston University. Retrieved from <https://www.bu.edu/pardee/files/2010/11/12-PP-Nov2010.pdf>
- OECD/IEA. (2018). Energy Security. Retrieved from <https://www.iea.org/topics/energysecurity/>
- Pan, L., Liu, P., & Li, Z. (2017). A system dynamic analysis of China's oil supply chain: Over-capacity and energy security issues. *Applied Energy*. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.036>
- Paredes, J. R., & Ramírez, J. J. (2017). Energías renovables variables y su contribución a la seguridad energética: complementariedad en Colombia. Banco Interamericano de Desarrollo. Retrieved from <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/8146/Energias-renovables-variables-y-su-contribucion-a-la-seguridad-energetica-Complementariedad-en-Colombia.PDF?sequence=5>
- Proskuryakova, L. (2018). Updating energy security and environmental policy: Energy security theories revisited. *Journal of Environmental Management*, 223(December 2017), 203–214. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.016>
- Ríos, L. C., Quirama, L. F., Gaviria, L. G., & Ospina, S. (2012). *Informe ejecutivo: Determinación del impacto producido por el uso del E20 en el parque automotor colombiano*. Retrieved from <http://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-121.htm>
- Rojas Fuentes, A. (2015). *Reforma al régimen de regalías y desarrollo regional: la experiencia de los departamentos de Arauca y Casanare*. Universidad de los Andes. Retrieved from [https://cider.uniandes.edu.co/Documents/Trabajos de grado/Reforma\\_regimen\\_regalias33.pdf](https://cider.uniandes.edu.co/Documents/Trabajos de grado/Reforma_regimen_regalias33.pdf)
- Rulli, M. C., Bellomi, D., Cazzoli, A., De Carolis, G., & D'Odorico, P. (2016). The water-land-food nexus of first-generation biofuels. *Scientific Reports*. <http://doi.org/10.1038/srep22521>
- SGR. (2012). Sobre el Sistema General de Regalías (SGR). Retrieved November 4, 2018, from <https://www.sgr.gov.co/QuiénesSomos/SobreelSGR.aspx>
- Shepherd, S. P. (2014). A review of system dynamics models applied in transportation. *Transportmetrica B*. <http://doi.org/10.1080/21680566.2014.916236>
- SICOM, & MME. (2015). *Boletín Estadístico del Ministerio de Minas y Energía 2011 a 2015*. Retrieved from <http://www.sicom.gov.co/apc-aa->

- files/495052435f5052454445465f30303231/Boletin\_Sicom\_Quinquenal\_publico.pdf
- Sovacool, B. K., & Mukherjee, I. (2011). Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach. *Energy*. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.043>
- Sterman, J. D. (2002). System Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. *In Proceedings of the ESD Internal Symposium*.  
<http://doi.org/10.1287/mnsc.35.3.321>
- Stockholm Environment Institute. (2018). LEAP. Retrieved October 28, 2018, from <https://www.energycommunity.org/default.asp?action=introduction>
- Sun, X., Liu, C., Chen, X., & Li, J. (2017). Modeling systemic risk of crude oil imports: Case of China's global oil supply chain. *Energy*.  
<http://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.018>
- Toro Gómez, M. V., & Quiceno Rendón, D. M. (2015). Energy demand and vehicle emissions estimate in Aburra Valley from 2000 to 2010 using LEAP model. *DYNA*.  
<http://doi.org/10.15446/dyna.v82n189.41991>
- United Nations Development Programme. (2000). *World Energy Assessment. Energy and the challenge of Sustainability. World Energy Assessment*.  
<http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.096>
- UPME. (2014). *Proyección de Demanda de Combustibles en el Sector Transporte en Colombia, Revisión noviembre de 2014*. Retrieved from [http://www.sipg.gov.co/sipg/documentos/Proyecciones/2014/Proy\\_Demanda Tte - Nov2014\\_12112014.pdf](http://www.sipg.gov.co/sipg/documentos/Proyecciones/2014/Proy_Demanda_Tte_Nov2014_12112014.pdf)
- UPME. (2015a). Plan Energetico Nacional Colombia: Ideario Energético 2050. *Unidad de Planeación Minero Energética, Republica de Colombia*, 184. Retrieved from [http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN\\_IdearioEnergetico2050.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN_IdearioEnergetico2050.pdf)
- UPME. (2015b). *Proyección de Demanda de Combustibles en el Sector Transporte en Colombia, Revisión marzo de 2015*. Retrieved from [http://www.sipg.gov.co/sipg/documentos/Proyecciones/2015/Proy\\_Demanda\\_Mar2015.pdf](http://www.sipg.gov.co/sipg/documentos/Proyecciones/2015/Proy_Demanda_Mar2015.pdf)
- UPME. (2015c). *Proyección de Demanda de Combustibles en el Sector Transporte en Colombia, Revisión noviembre de 2015*. Retrieved from [http://www.sipg.gov.co/sipg/documentos/Proyecciones/2015/Proy\\_Demanda\\_Combust\\_Liquidos\\_Nov2015.pdf](http://www.sipg.gov.co/sipg/documentos/Proyecciones/2015/Proy_Demanda_Combust_Liquidos_Nov2015.pdf)
- UPME. (2016). *Plan De Acción Indicativo De Eficiencia Energética 2017-2022. Ministerio*

- de Minas y Energía*. Retrieved from [http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI\\_PROURE\\_2017-2022.pdf](http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf)
- UPME. (2018a). Balance Energético Colombiano - BECO. Retrieved March 22, 2018, from <http://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/BalanceEnergetico.aspx>
- UPME. (2018b). *Plan indicativo de abastecimiento de combustibles líquidos*. Retrieved from [http://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Plan\\_liquidos\\_2018/Plan\\_de\\_Abastecimiento\\_de\\_Combustibles\\_Liquidos.pdf](http://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Plan_liquidos_2018/Plan_de_Abastecimiento_de_Combustibles_Liquidos.pdf)
- UPME. (2018c). Plan Indicativo de Abastecimiento de Combustibles Líquidos. Retrieved from [http://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Plan\\_liquidos\\_2018/Plan\\_de\\_Abastecimiento\\_de\\_Combustibles\\_Liquidos.pdf](http://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Plan_liquidos_2018/Plan_de_Abastecimiento_de_Combustibles_Liquidos.pdf)
- UPME. (2018d). *Plan Indicativo de Abastecimiento de Gas Licuado del Petróleo*. Bogotá D.C. Retrieved from [http://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Plan\\_GLP\\_19102018.pdf](http://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Plan_GLP_19102018.pdf)
- UPME. (2018e). Sistema de información de petróleo y gas. Retrieved May 12, 2018, from <http://www.sipg.gov.co/>
- UPME, & CIDET. (2017). Seguridad Energética para Colombia. Medellín: COCIER. Retrieved from <http://www.cocier.org/modulos/uploads/INAqolGT0iSeguridadEnergetica para Colombia CIER 2017.pdf>
- US Government Information. (2007). Energy Independence and Security Act. Retrieved from <https://www.congress.gov/110/plaws/publ140/PLAW-110publ140.pdf>
- Van Beeck, N. (1999). Classification of Energy Models. *FEW Research Memorandum*, 777. Retrieved from <https://pure.uvt.nl/ws/portalfiles/portal/532108/777.pdf>
- Van de Wyngard, H. R. (2006). Seguridad energética en Chile: dilemas, oportunidades y peligros. Santiago de Chile: Facultad de Ingeniería Universidad Católica de Chile. Retrieved from <http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/paperspdf/SeguridadEnergetica.pdf>
- Winzer, C. (2012). Conceptualizing energy security. *Energy Policy*. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.067>
- World Energy Council. (2017). *World Energy Trilemma Index 2017*. Retrieved from <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/11/Energy-Trilemma-Index-2017-Report.pdf>

Zhao, C., & Chen, B. (2014). China's oil security from the supply chain perspective: A review. *Applied Energy*. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.016>