

Análisis exploratorio y descriptivo de las tecnologías transitorias/intermedias en el proceso de reindustrialización del nororiente colombiano en el marco de la transición energética

Jose Domingo Piedrahita Santamaria, Iván Alfonso Meneses Agudelo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Economista

Director

Amado Antonio Guerrero Rincón

Economista. Doctor en Historia

Codirector

Wilfred Alonso Romero Arciniegas

Economista. Magister en Estudios del Desarrollo y Magister en Historia

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias Humanas

Escuela de Economía y Administración

Economía

Bucaramanga

2025

## Dedicatoria

A las víctimas del conflicto armado interno en Colombia, en reconocimiento a las miles de luchas silenciadas, a las vidas apagadas y los incontables sueños que quedaron inconclusos. En su honor y memoria, afirmó que su voz no ha sido olvidada. Su valentía y resistencia, inspiran este esfuerzo por construir un futuro más justo y digno para todos.

A mi madre, la economista Jacqueline Santamaria, por su apoyo incondicional y por ser mi fuente de inspiración.

A mi padre, Abimael, en su memoria, siempre vives en mi corazón.

A mis tías Deizy, Amparo y Yenny y mis tíos Edward, Rodolfo y Belisario, desde sus relatos, momentos compartidos, historias de vida me aproximaron a términos y lenguajes que me acercaron a la Economía.

A los nonos Belisario y Cruz Delina, quienes me han abierto sus corazones cada vez que han podido, ilustrándome de historias, anécdotas y aspectos de la vida que me dieron enseñanzas y lecciones a la hora de ver la realidad que nos rodea.

A mis primos, mis amigos y familia extensa, por su amor, compañía, esfuerzo y palabras de ánimo, momentos de alegría que fueron cruciales para poder culminar este gran logro.

A los profesores de la Escuela de Economía, que me brindaron espacios seguros, lleno de conocimientos, pedagogía, realidad social, discusiones en términos económicos.

A mis compañeros de carrera, por la infinidad de charlas de pasillo, los trabajos realizados, los momentos universitarios compartidos, las historias trazadas, el apoyo brindado hicieron de esta experiencia un camino inolvidable.

Con mucho amor y cariño, Jose Domingo Piedrahita Santamaria.

### **Agradecimientos**

A la Unidad para la Atención y Reparación Integral de las Víctimas del Conflicto Armado en Colombia –UARIV- por su apoyo económico sin el cual no habría sido posible para mí acceder a la educación superior de alta calidad.

A la Universidad Industrial de Santander –UIS- por ser un refugio donde crecí, me formé y eduqué. Al Instituto de Estudios Interdisciplinarios y Acción Estratégica para el Desarrollo -IdEAD-, como espacio para desarrollar investigaciones económicas.

Al Profesor Wilfred Romero, por su apoyo incondicional durante mi periodo de pasantía de investigación, guiando y haciendo posible la investigación.

Al Profesor Amado, por los conocimientos brindados, las recomendaciones allegadas.

A Claudia Quiroga por su amistad, el café cada mañana y las charlas políticas.

A mi amigo Héctor Puentes, por estar en el momento cero, haciendo posible mi inscripción a la carrera, cuando era solo un anhelo.

Atentamente, Jose Domingo Piedrahita Santamaria.

## Tabla de contenido

	Pág.
Introducción .....	15
1. Generalidades de la investigación.....	18
1.1 Antecedentes .....	21
1.2 Visión, hojas de ruta y metas de Colombia en la transición energética .....	24
1.2.1 Los ‘Minerales Estratégicos’, materia prima del futuro sostenible .....	24
1.2.2 Los ‘Nuevos Energéticos’ de promesa a pilar del desarrollo industrial .....	26
1.2.3 Gas natural, el nuevo oro negro de la transición energética .....	28
1.2.4 ¿Herejía energética? Por qué Colombia no puede prescindir (aún) del carbón.....	29
1.2.5 Transporte 4.0: el transporte del siglo XXI .....	30
1.2.6 Del fogón de leña a la energía limpia, el futuro del sector residencial.....	31
1.2.7 El sector más difícil para descarbonizar, el industrial .....	32
2. Panorama de la transición energética en Colombia .....	33
2.1 Sistemas de Almacenamiento a Gran Escala .....	34
2.1.1 Bombeo hidroeléctrico .....	34
2.1.2 Tecnologías de energías de los océanos .....	40
2.1.3 Almacenamiento térmico, transferencia de calor .....	45
2.1.3.1 Tecnologías de recuperación de calor.....	48
2.1.3.2 Intercambiadores de Calor. ....	50
2.1.3.2.1 Caso estudio Cementera en Colombia. ....	53
2.1.3.3 Bombas de calor.....	53
2.1.3.3.1 Bombas de Calor Aero-térmicas. ....	54
2.1.3.3.1.1 Equipos Split.....	55
2.1.3.3.1.2 Bombas de Calor Compactas para ACS. ....	55
2.1.3.3.1.3 Bombas de Calor Reversibles para Clima y ACS. ....	55
2.1.3.3.1.4 Bombas de Calor Industriales para Generación de Calor.....	55
2.1.3.3.2 Bombas de Calor Geo-Térmicas. ....	56
2.1.3.3.2.1 Circuito Cerrado. ....	56
2.1.3.3.2.2 Circuito Abierto.....	56
2.1.4 Almacenamiento a través de aire comprimido (CAES) .....	57
2.1.4.1 Proyectos CAES notables. ....	57
2.1.4.1.1 Planta Kraftwerk Huntorf (Alemania).....	57
2.1.4.1.2 Planta Nengchu-1 (China).....	58
2.2 Energía Eólica .....	58

2.2.1	Proyectos de Generación de energía eléctrica: eólica .....	61
2.2.2	Parques eólicos operativos.....	62
2.3	Energía solar.....	63
2.3.1	Elementos o tierras ‘raras’ necesarios en la energía fotovoltaica.....	67
2.3.1.1	Óxido de germanio $\text{GeO}_2$ y dióxido de circonio $\text{ZrO}_2$ .....	68
2.3.1.1.1	Células solares de concentración.....	70
2.3.1.1.2	Células solares multiunión .....	70
2.3.1.2	Dióxido de Silicio $\text{SiO}_2$ .....	72
2.3.1.2.1	Los paneles solares monocristalinos. ....	73
2.3.1.2.2	Los paneles solares policristalinos. ....	73
2.3.1.2.3	Los paneles de silicio amorfo.....	73
2.3.1.3	El cadmio, (Cd).....	76
2.3.1.3.1	Las células solares de telururo de cadmio (CdTe). ....	77
2.3.1.3.2	Células solares de sulfuro de cadmio (CdS).....	78
2.3.1.4	Indio (In). ....	80
2.3.1.4.1	Las células solares (CIGS). ....	81
2.3.1.5	Telurio Te.....	82
2.3.2	Proyectos de Generación de energía eléctrica: Solar.....	84
2.3.2.1	Parque Solar La Unión (Córdoba). ....	84
2.3.2.2	Parque Solar El Paso (Cesar). ....	85
2.3.2.3	Parque Solar Fundación (Magdalena).....	85
2.4	La Biomasa.....	85
2.4.1	Producción Agrícola.....	86
2.4.2	Producción Pecuaria .....	88
2.4.3	Producción de Residuos Sólidos de Disposición Final .....	92
2.4.4	Proyectos de Generación de Energía Eléctrica en Colombia de Biomasa .....	96
2.4.4.1	Cogeneración. ....	96
2.4.4.2	Ciclo abierto.....	96
2.4.4.3	Tecnologías termoquímicas .....	96
2.4.5	Proyectos de biomasa por recursos utilizado.....	97
2.4.5.1	Proyectos de Biomasa de Generación Eléctrica con Base en Bagazo. ....	97
2.4.5.2	Proyectos de biomasa de generación eléctrica con base en Biogás. ....	100
2.4.5.3	Proyectos de biomasa de generación eléctrica en Cultivos energéticos. ....	101
2.4.5.4	Proyectos de biomasa con base en Residuos agrícolas.....	102
2.4.5.5	Proyectos biomasa de generación eléctrica Residuos Sólidos Urbanos. ....	102
3.	Tecnologías de gas, captura y almacenamiento de Carbono .....	104
3.1	Gas natural.....	104
3.1.1	Antecedentes del Gas Natural en Colombia.....	105
3.1.2	Reservas de gas.....	108
3.1.3	Exploracion.....	109
3.1.3.1	Llanos Orientales. ....	110

3.1.3.2 Valle Medio del Magdalena –VMM.....	110
3.1.3.3 Valle Inferior del Magdalena –VIM. ....	111
3.1.3.4 Valle Superior del Magdalena - VSM. ....	111
3.1.3.5 Proyecto Sirius. ....	112
3.1.4 Producción de gas en Colombia (Oferta) .....	112
3.1.4.1 Producción fiscalizada de gas. ....	113
3.1.5 Demanda de gas en Colombia .....	114
3.1.5.1 Análisis por sectores Gas Natural Colombia de sep-23-sep-24.....	115
3.1.5.1.1 Sector de Generación Térmica. ....	115
3.1.5.1.2 Sector industrial.....	116
3.1.5.1.3 Sector Industria Petrolera .....	117
3.1.5.1.4 Sector GNVC. ....	118
3.1.5.1.5 Sector comercial.....	118
3.1.5.1.7 Gas importado. ....	120
3.1.5.1.8 Gas licuado del petróleo (GLP).....	121
3.1.6 Principales necesidades encontradas en el sector Gas Natural.....	122
3.1.6.1 Bidireccionalidad de los tramos de transporte Barranquilla–Ballena y Barrancabermeja–Ballena, e Interconexión de sistemas entre Barranquilla y Barrancabermeja. ....	123
3.1.6.2 Ampliación capacidad transporte tramo Mariquita–Gualanday. ....	123
3.1.6.3 Ampliación capacidad de transporte tramo Jamundí hacia Popayán.....	123
3.1.6.4 Bidireccionalidad entre Yumbo–Mariquita. ....	124
3.1.6.5 Gasoducto Noroccidente Conexión VIM–Interior.....	125
3.1.5.6 Gasoducto conexión Bogotá-SNT MME tramo Mariquita-Vasconia. ....	126
3.1.5.7 Gasoducto conexión Cúcuta-SNT tramo Barrancabermeja-Ballena .....	126
3.1.5.8 Importación en la Guajira con conexión a SNT.....	127
3.1.5.9 Infraestructura Cartagena.....	128
3.1.5.10 Conexión a tierra de proyectos Offshore. ....	128
3.2 Tecnologías de gasificación .....	128
3.2.1 Panorama Nacional.....	128
3.2.1.1 Caso de estudio: La Guajira. ....	132
3.3 El Carbón.....	132
3.3.1 Tipos de carbón en Colombia.....	133
3.3.1.1 Carbón térmico.....	134
3.3.1.2 Carbón metalúrgico.....	135
3.3.1.3 Coque. ....	136
3.4 Tecnologías de captura y almacenamiento de Dióxido de Carbono CO <sub>2</sub> .....	138
3.4.1 Pre-combustión.....	139
3.4.1.1 Pressure Swing Adsorption (PSA).....	140
3.4.1.1.1 Carbón Activado. ....	141
3.4.1.1.2 Zeolitas. ....	142
3.4.1.1.3 Marcos Metal-Orgánicos (MOF – Metal Organic Frameworks). ....	143

3.4.1.2 La separación criogénica.....	145
3.4.1.3 Absorción física. ....	146
3.4.1.4 Las membranas. ....	146
3.4.2 Oxi-combustión .....	148
3.4.3 Post-combustión .....	149
3.4.3.1 La absorción química. ....	150
3.4.3.1.1 Monoetanolamina (MEA). ....	151
3.4.3.1.2 Dietanolamina (DEA). ....	151
3.4.3.1.3 Metildietanolamina (MDEA) .....	151
4. Tecnologías de almacenamiento, conversión energética y movilidad.....	152
4.1 Tecnologías de Almacenamiento y conversión de energía .....	152
4.1.1 Baterías .....	152
4.1.1.1 Baterías de Litio.....	154
4.1.1.2 Baterías Plomo Acido. ....	157
4.1.1.3 Baterías de Vanadio (V).....	159
4.1.1.4 Baterías Sodio-Sulfuro (NaS). ....	163
4.2 Tecnologías de conversión de energía .....	164
4.2.1 Electrolisis a alta temperatura e hidrogeno.....	164
4.3 El sector transporte en la Transición Energética.....	169
4.3.1 Incentivos y parque automotor .....	171
4.3.2 Motos .....	174
4.3.2.1 Motos Diésel. ....	176
4.3.2.2 Motos gas convertido.....	177
4.3.2.3 Motos Eléctricas B.E.V.....	178
4.3.3 Vehículos .....	180
4.3.3.1 Carros eléctricos.....	182
4.3.3.2 Carros híbridos.....	187
4.3.3.3 Vehículos de Hidrógeno. ....	189
4.3.3.4 Vehículos de Gas Natural Convertido. ....	189
4.3.3.5 Vehículos de Gas licuado de Petróleo (GLP). ....	190
5. Conclusiones .....	191
Referencias Bibliográficas .....	198

## Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Tipos de centrales hidroeléctricas.....	36
Tabla 2 Las 10 hidroeléctricas con mayor capacidad instalada corte 31 octubre 2024.....	39
Tabla 3 Centrales termoeléctricas en Colombia.....	46
Tabla 4 Tipos de recuperación de calor en distintas temperaturas.....	48
Tabla 5 Fuerza del Viento a 2 y 10 metros de altura regiones de Colombia año 2018.....	59
Tabla 6 Cantidad de Proyectos de generación de energía eólica a 31 de octubre de 2024.....	61
Tabla 7 Proyectos Generación de electricidad proveniente de la Energía Solar registrados en UPME nororiente colombiano a 31 oct-2024.....	84
Tabla 8 Disposición final 2022 por Departamentos del Nororiente Colombiano.....	93
Tabla 9 Reservas 1P. Gas Natural por Cuenta Sedimentaria.....	109
Tabla 10 Principales aminas usadas en proceso de absorción química captura de CO2.....	150
Tabla 11 Tipo de baterías más populares.....	153
Tabla 12 Métodos de reciclaje para las baterías de Litio.....	156
Tabla 13 Algunos Proyectos de Hidrogeno destacados en Colombia.....	168
Tabla 14 Motos nuevas más matriculadas Colombia Ene-sep. 2024.....	176
Tabla 15 Motos eléctricas BEV nuevas más matriculadas en Colombia ene-Sep. 2024.....	179
Tabla 16 Cantidad de Vehículos por tipo de combustible entre ene-oct 2024.....	181
Tabla 17 Líneas de carros eléctricos más matriculados entre ene-oct. 2024.....	185
Tabla 18 Principales arquitecturas de vehículos híbridos.....	188
Tabla 19 Energía para encender bombillas de distintos tipos durante su vida útil.....	238

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Índice de Transición Energética .....	19
Figura 2 Participación por sectores en las emisiones GEI año 2018 .....	23
Figura 3 Demanda de minerales por tecnologías limpias y escenarios, 2010-2040 .....	25
Figura 4 Principales exportadores, por elementos utilizado en las energías renovables .....	25
Figura 5 Matriz energética a corte de 31 de octubre de 2024 y proyección .....	33
Figura 6 Proceso de Generación de energía hidroeléctrica.....	35
Figura 7 Participación capacidad hidro-eléctrica por países año 2023.....	37
Figura 8 Tipos energías oceánicas .....	42
Figura 9 Intercambiador de calor tubular con un paso de coraza y un paso de tubos (modo de funcionamiento en contraflujo cruzado .....	51
Figura 10 Proceso bomba Aero-térmica uso doméstico en modo refrigeración.....	54
Figura 11 Mapa Fuerza máxima del viento Colombia año 2018.....	60
Figura 12 Producción de paneles solares por región del mundo año 2023.....	64
Figura 13 Capacidad fotovoltaica Global instalada año 2023 .....	65
Figura 14 Mapa Radiación Solar kWh/m <sup>2</sup> .....	66
Figura 15 Germanio GeO <sub>2</sub> .....	68
Figura 16 Circonio ZrO <sub>2</sub> .....	69
Figura 17 Concentración sedimentos Zirconio, (Zr).....	70
Figura 18 Mapa de zonas con favorabilidad geológica para arenas silíceas.....	74
Figura 19 Volumen de explotación de arenas silíceas asociado al pago de regalías .....	75
Figura 20 Cadmio, (Cd) .....	76
Figura 21 Concentraciones de sedimentos Cadmio (Cd) año 2020.....	78
Figura 22 Indio (In).....	81
Figura 23 Telurio (Te) .....	83
Figura 24 Emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) año 2021 .....	85
Figura 25 Emisiones de Metano CH <sub>4</sub> entérico producido ganado bovino Colombia años 1990-2018.....	90
Figura 26 Rutas llegadas de ganados españoles durante la conquista española .....	88
Figura 27 Mapa Proyectos de energía eléctrica del tipo Biomasa .....	97
Figura 28 Proceso aprovechamiento caña de azúcar insumo.....	99
Figura 29 Mapas de gasoductos en Colombia 1993 y 2000 .....	107
Figura 30 Ubicación proyectos Costa afuera con recursos potenciales gas natural .....	111
Figura 31 Demanda Total de Gas Natural en Colombia sep. 2023 a sep. 2024 .....	114
Figura 32 Demanda gas Generación Térmica Colombia sep. 2023 a sep. 2024 .....	115
Figura 33 Demanda gas sector industrial en Colombia sep. 2023 a sep. 2024.....	116

Figura 34 Demanda gas sector industria petrolera Colombia sep. 2023 a sep. 2024 .....	117
Figura 35 Demanda de gas del sector GNVC en Colombia sep. 2023 a sep. 2024.....	118
Figura 36 Demanda de gas del sector Comercial en Colombia sep. 2023 a sep. 2024.....	118
Figura 37 Demanda gas sector Residencial en Colombia sep. 2023 a sep. 2024 .....	119
Figura 38 Gas importado por Colombia May-2023 a sep-2024 .....	120
Figura 39 Oferta y demanda Nacional de Gas Licuado del Petróleo en MPCD.....	121
Figura 40 Mapa principales 8 proyectos para la infraestructura de Gas IPAT .....	122
Figura 41 Mapa Sistema Nacional con ubicación y necesidades de infraestructura .....	124
Figura 42 Emisiones CO2 eq. (toneladas) uso de leña para cocinar, por departamento.....	129
Figura 43 Mapa número de hogares que cocinan con leña, carbón o desechos (Combustibles de uso Ineficiente y Altamente Contaminantes -CIAC-) año 2021 .....	130
Figura 44 Gasificadores de lecho fluidizado .....	130
Figura 45 Producción Nacional de carbón metalúrgico.....	135
Figura 46 Funcionamiento del carbón activado.....	141
Figura 47 Representación química y usos para distintos MOF's .....	143
Figura 48 Proceso de la Tecnología de separación Criogénica .....	145
Figura 49 Proceso de pre-combustión de gas con membranas .....	147
Figura 50 Colombia concentración de litio (Li) .....	155
Figura 51 Colombia concentración de plomo (Pb).....	157
Figura 52 Colombia concentración Vanadio (V) 2020.....	161
Figura 53 Esquema del proceso de electrólisis .....	164
Figura 54 El Pantone del hidrógeno.....	166
Figura 55 Comparación de tamaño de las partículas de PM.....	169
Figura 56 Gases de efecto invernadero –GEI- del sector transporte .....	170
Figura 57 Beneficios Económicos que estimulan el transporte sostenible en Colombia .....	172
Figura 58 Inventario de Emisiones contaminantes Sector Transporte año 2018.....	174
Figura 59 Distribución nacional cargadores y conectores vehículos eléctricos 2022 .....	183
Figura 60 Biomasa residual tipos y características físicas.....	235
Figura 61 Biomasa residual poder calórico inferior (PCI) del sector agrícola en Colombia principales residuos.....	236
Figura 62 Biomasa residual poder calórico inferior (PCI) del sector Pecuario en Colombia principales residual .....	236
Figura 63 Biomasa residual poder calórico inferior (PCI) del sector Residuos sólidos Urbanos (RSOU) en Colombia principales residuos.....	236
Figura 64 Tipos de bombillas, principales características .....	239
Figura 65 Resultado Biomasa requeridas para encender una bombilla durante su vida útil Bombilla Incandescente y Halógena.....	242
Figura 66 Resultado Biomasa requeridas para encender una bombilla durante su vida útil Bombillas Fluorescentes y Led .....	243

**Lista de ecuaciones**

	Pág.
Ecuación 1 Factor de Conversión .....	237
Ecuación 2 Energía total consumida por cada tipo de bombilla.....	238
Ecuación 3 PCI a energía potencial por kilogramo .....	240
Ecuación 4 Biomasa requerida (kg).....	240
Ecuación 5 Biomasa calculada y ajustada a niveles de eficiencia .....	241

**Lista de Apéndices**

	Pág.
Apéndice A Biomasa Residual .....	235
Apéndice B ¿Cuánta biomasa residual se necesita para encender una bombilla vida útil? .....	237

## Resumen

**Título:** Análisis exploratorio y descriptivo de las tecnologías transitorias/intermedias en el proceso de reindustrialización del nororiente colombiano en el marco de la transición energética<sup>1</sup>

**Autores:** Jose Domingo Piedrahita Santamaria e Iván Alfonso Meneses Agudelo <sup>2</sup>

**Palabras clave:** Transición energética, reindustrialización, energías renovables, tecnologías intermedias.

### Descripción:

El mundo vira hacia tecnologías que reduzcan las emisiones, la dependencia de los hidrocarburos y el impacto ambiental, mediante tecnologías novedosas y energías antes ignoradas, el cambio climático es una realidad, y las economías deben transformarse para enfrentarlo. Esta investigación se realiza desde una mirada heterodoxa de la economía explora el contexto de la transición energética en Colombia como medio industrializador. La metodología es mixta, con enfoque exploratorio, y tiene el objetivo principal de recopilar el estado del arte, el panorama de aquellos aspectos esenciales de este proceso y analizar cómo las tecnologías intermedias pueden contribuir a reindustrializar el país.

Las nuevas tendencias, están promoviendo las industrias nacionales en favor de los cambios en la matriz energética, pero, están convirtiendo a Colombia en importador de tecnologías. Estas tecnologías logran efectos a corto plazo, como la reducción de emisiones y diversificación energética, pero, surgen preguntas sobre si esta es la estrategia adecuada cuando se obtiene el 66% de la producción energética de la energía hidroeléctrica, sumado a factores como la falta de transmisión de conocimiento, los trámites complejos derivados de la fragmentación normativa, y el hecho de que Colombia posee conocimientos parciales sobre sus propios recursos especialmente en elementos como las ‘tierras raras’, claves en las nuevas tecnologías contribuyen a que la importación de estas tecnologías se estimule cada año. El primer capítulo presenta una visión actual de la transición energética en Colombia. El segundo capítulo se centra en el gas, tanto sintético como natural. el tercer capítulo explora tecnologías destinadas al almacenamiento de energía y el cuarto a la movilidad híbrida y eléctrica.

---

<sup>1</sup> Trabajo de Grado

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Humanas, Escuela de Economía, Director Amado Antonio Guerrero Rincón Codirector Wilfred Romero Arciniegas.

## Abstract

**Title:** Exploratory and descriptive analysis of transitional/intermediate technologies in the reindustrialization process of northeastern Colombia within the framework of the energy transition<sup>3</sup>

**Authors:** Jose Domingo Piedrahita Santamaria and Iván Alfonso Meneses Agudelo<sup>4</sup>

**Keywords:** Energy transition, reindustrialization, renewable energy, intermediate technologies.

### Description:

The world is shifting towards technologies that reduce emissions, dependence on hydrocarbons, and environmental impact through innovative technologies and previously overlooked energy sources. Climate change is a reality, and economies must transform to confront it. This research, conducted from a heterodox economic perspective, explores the context of Colombia's energy transition as an industrialization strategy. The methodology is mixed, with an exploratory approach, and its primary objective is to compile the state of the art, present an overview of essential aspects of this process, and analyze how intermediate technologies can contribute to the country's reindustrialization.

New trends are promoting national industries in favor of changes in the energy matrix, but they are also turning Colombia into an importer of technologies. These technologies achieve short-term effects, such as emission reductions and energy diversification. However, questions arise about whether this is the right strategy, given that 66% of Colombia's energy production comes from hydropower. Additionally, factors such as the lack of knowledge transmission, complex procedures resulting from regulatory fragmentation, and Colombia's partial understanding of its own resources—especially regarding rare earth elements essential for new technologies—contribute to the increased annual importation of these technologies. The first chapter provides a current overview of the energy transition in Colombia. The second chapter focuses on gas, both synthetic and natural. The third chapter examines technologies aimed at energy storage, while the fourth addresses hybrid and electric mobility.

---

<sup>3</sup> Bachelor Thesis

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Humanas, Escuela de Economía, Director Amado Antonio Guerrero Rincón Codirector Wilfred Romero Arciniegas.

## Introducción

La reindustrialización es un proceso mediante el cual se busca revitalizar y fortalecer el sector industrial de un país, enfocándose en la modernización tecnológica, la innovación y la competitividad. Este proceso es especialmente relevante en un mundo que enfrenta desafíos ambientales significativos, donde la transición energética hacia fuentes más sostenibles se ha convertido en una prioridad global. La reindustrialización no solo pretende mejorar la eficiencia y la producción, sino también alinearse con los objetivos sostenibles, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

En el contexto de Colombia, la reindustrialización enfocada en la transición energética adquiere una importancia particular. El territorio nacional, con su rica diversidad de recursos naturales y su vulnerabilidad a los efectos del cambio climático, se encuentra en una posición única para liderar una transformación hacia una economía más verde y sostenible. La transición energética en el país implica un cambio desde un sistema energético tradicional basado en el petróleo y el carbón hacia uno que privilegie las energías renovables, como la hidroeléctrica, solar, eólica, entre otras, en proceso de maduración como el hidrógeno verde.

En Colombia se han venido realizando cambios sustanciales en la diversificación de las fuentes de generación de energía eléctrica desde la histórica industria hidroeléctrica a las nuevas tendencias en energías renovables como la eólica o solar, así como la transformación de procesos industriales, uso tecnologías novedosas y aprovechamiento de fuentes de energías antes ignoradas.

Por esta razón, la presente investigación busca analizar las oportunidades que ofrecen las tecnologías intermedias, entendidas como aquellas que no son completamente libres de emisiones de Gases Efecto Invernadero (G.E.I.), pero si contribuyen a su reducción, así como deslumbrar un panorama como marco general de las principales temáticas que podrían ser foco de industrialización del país y en especial del nororiente colombiano por ser la región con mayor radiación solar y de mayor fuerzas del viento, en el marco de la transición energética.

Las tecnologías intermedias, la mejora de procesos y la ampliación de infraestructuras, así como el aseguramiento de minerales y tecnologías cruciales son el siguiente paso dentro de la

transición, ya que permiten seguir aprovechando los recursos existentes y la infraestructura construida a lo largo de todos estos años de manera más responsable y eficiente.

Los estudios revisados resaltan el gran potencial de Colombia en energías renovables y proponen acciones para alcanzar la carbono-neutralidad en el largo plazo. No solo documentos académicos exploran el potencial de departamentos como la Guajira o el Cesar en materia de energía solar y fotovoltaica, sino que el propio Gobierno Nacional y entidades privadas han financiado estudios para alcanzar una reducción progresiva de los gases de efecto invernadero y el uso de combustibles fósiles. Los estudios encontrados tienen en común el pretender resolver el problema medioambiental por medio de las energías limpias, pero, se quedan cortos a la hora de explicar cómo industrializar al país y no ser solo consumidores tecnológicos y de materias primas.

Esta investigación pretende realizar algunos aportes para este vacío, pues a partir de las tecnologías intermedias es posible avanzar en reducción de emisiones a corto plazo, mientras se desarrolla la industria e infraestructura necesaria para lograr una economía más limpia, reducir la pobreza y mejorar la calidad de vida, porque aún falta muchas zonas del territorio nacional que requieren de los servicios básicos esencial, del acceso a las telecomunicaciones e incluso de carreteras, lo que se traduce en mejoras socioeconómicas que pueden permitir el desarrollo de proyectos ambientales y que perduren en el tiempo.

Los principales aportes de la investigación, se enfocan sobre las problemáticas relacionadas con el establecimiento de la transición energética como realidad objetiva y la exploración de tecnologías aplicables a la industria nacional que ha sido dependientes de hidrocarburos para que repliquen en un desarrollo reindustrializador del país y que a su vez generen menos emisiones para así tener diferentes alternativas que nos permitan como nación realmente transitar hacia una nueva matriz reductora de la pobreza, ofrecedora de oportunidades para el desarrollo de talento humano y empleo, la concientización sobre la promoción de minimizar el impacto del antropoceno ambiental, por medio de la diversificación a lo largo de diferentes tanto energías como tecnologías.

Se busca que emprendedores e investigadores encuentren ideas para aportar a la reindustrialización de la economía y a la transición energética, teniendo de presente aquellos sectores tanto energéticos como tecnológicos que se encuentran en pleno auge y crecimiento que pueden ser áreas interesantes para la inversión en los cuales dadas las necesidades de nuevos elementos y materiales serán un gran nicho que aún en Colombia requiere desde normas que

regulen los sectores hasta investigación científicas, académicas y el apoyo gubernamental para virar nuestra matriz energética e industrial a niveles cada vez más amigables con el medio ambiente.

El estudio consta de cuatro capítulos, organizados de la siguiente manera: El primero, aborda el panorama general de la investigación el marco normativo principal de la transición energética en Colombia, incluyendo hojas de ruta, los antecedentes más relevantes, y un análisis detallado de los proyectos de generación eléctrica por tecnologías como los sistemas de almacenamiento a gran escala hidroeléctricos y térmicos, la energía eólica, solar, así como la biomasa. El segundo, se centra en las tecnologías relacionadas con el gas natural, así como en la captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), explorando aspectos como las reservas de gas, su producción, demanda, y las tecnologías de gasificación y captura de carbono.

El tercero analiza las tecnologías de almacenamiento y conversión de energía, el hidrogeno, destacando innovaciones como baterías avanzadas, y tecnologías de conversión energética, energía mareomotriz. El capítulo cuarto, incluye un estudio sobre la dinámica del sector automotor en el marco de la transición energética, con un enfoque en vehículos y motocicletas alternativos. El trabajo culmina con un apartado de conclusiones y recomendaciones que sintetiza los hallazgos principales.

## 1. Generalidades de la investigación

El Gobierno de Colombia, bajo la administración del Presidente de la República Gustavo Francisco Petro Urrego, ha establecido un objetivo fundamental en el Plan Nacional de Desarrollo -PND- 2022-2026: Colombia, Potencia Mundial de la vida, el cual busca transformar la estructura económica del país, pasando de un modelo extractivista basado en la explotación y comercialización de recursos naturales a una economía impulsada por la tecnología, el conocimiento y la innovación.

Este cambio estratégico plantea desafíos significativos, como se detalla en el diagnóstico de la industria delineado en la Política Nacional de Reindustrialización, entre los principales problemas identificados, se destacan el subdesarrollo de las capacidades humanas, la falta de inversión en investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), la limitada diversificación y sofisticación de la matriz productiva, tanto a nivel interno como en las exportaciones, y la marcada dependencia del sector minero-energético (CONPES 4129, 2023). Colombia tiene el potencial para liderar la producción energética en América Latina debido a sus características físico-geográficas, su diversidad climática y su alta incidencia de energía solar y eólica. Además, el país cuenta con una amplia gama de recursos hídricos, incluyendo grandes afluentes y ríos, así como la convergencia de dos océanos, sin olvidar su biodiversidad única, el hecho de poseer todos los pisos térmicos y su posición como potencia en fauna y flora.

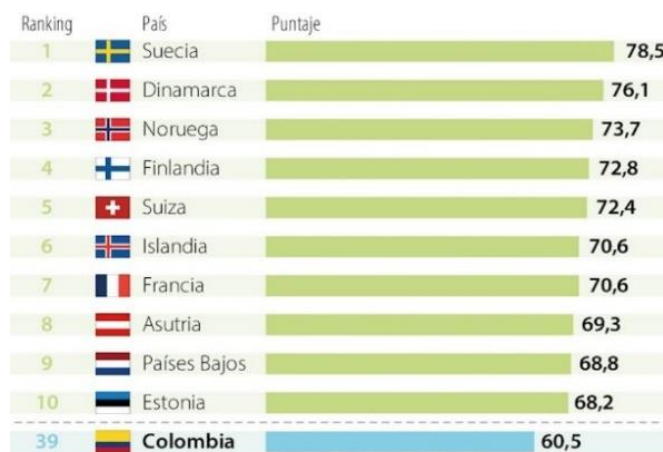
Por ello, la coherencia política de los compromisos internacionales adquiridos por Colombia para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible –ODS- (ODS. Nueva York, 2015). La COP 21 (Acuerdo de París. París, 2015). El Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y el Caribe (Acuerdo Ambiental. Escazú, 2022). Así como las distintas herramientas, estrategias, mecanismos de financiación entre otros métodos para una transición energética verde y justa de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, 2023). Quienes desarrollan el índice de transición energética donde Colombia ocupa el puesto 39 de 120 países, véase figura 1), entre otros compromisos obligan acciones que hagan efectivas estas promesas y demarcan el camino político, ejecutivo, complementario y asistencial

en el corto y mediano plazo, desde una agenda global o agenda 2030, que lleva los impulsos de casi todos los países del mundo con el fin de reducir las emisiones, transitar a sistemas más sostenibles y preservar, así como mejorar en lo posible del caso la biodiversidad de fauna y flora que se configura en una visión que impacte lo menos posible a la naturaleza.

Estos acuerdos implican un cambio en las agendas de los distintos sectores para reorientar el desarrollo, apuntando a mitigar la pobreza, mejorar la equidad social e impulsar alianzas para promover una vida sana y de bienestar en armonía con la naturaleza, los bosques y el agua, pues la mejora de la calidad de vida de las personas involucra también uso de sistemas más eficientes que a su vez, comulga en un menor impacto en el medio ambiente. Todo esto debe realizarse bajo un progreso seguro, donde prevalezca un equilibrio congruente entre las dimensiones social, económica y ambiental.

## Figura 1

### *Índice de Transición Energética*



Nota. Tomado de Sierra, (2023).

Consecuentemente, este panorama brinda múltiples oportunidades para alcanzar los objetivos establecidos en el PND 2022-2026, particularmente en las Bases del Plan Nacional de Desarrollo -PND- 2022-2026, (DNP, 2023). En concordancia con la estrategia de generación de energía a partir de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) y la diversificación

productiva asociada a las actividades extractivas, el plan fomenta iniciativas alternativas en territorios altamente dependientes de la explotación de combustibles fósiles. Por ello, es de interés para las autoridades locales, tanto políticas, administrativas y académicas considerar las alternativas y modelos de transición aplicables a sus territorios, asegurando coherencia con sus tradiciones comerciales, económicas y socioculturales, con el fin de alcanzar las metas de reducción de emisiones y aprovechamiento sostenible de los recursos.

Asimismo, impulsar la adopción de nuevas tecnologías como parte del proceso de transición energética, promoviendo un modelo de desarrollo más sostenible e innovador debe tener en cuenta la necesidad de fortalecer la industria nacional, la transición energética representa una oportunidad para iniciar un proceso de reindustrialización que permita el aprovechamiento sostenible de los abundantes recursos naturales del territorio de Colombia. Este enfoque ha sido contemplado por el Gobierno en diversos documentos estratégicos, como la Política de Transición Energética (CONPES 4075, 2022).

Con este contexto, el objetivo principal de esta investigación fue identificar las potencialidades del país, con enfoque en los departamentos del nororiente colombiano por sus características especiales de radiación solar y de vientos, así como ser de las zonas más estudiadas en otros recursos como minerales estratégicos, hidrocarburos entre otros, para fortalecer su industria a través de tecnologías intermedias y finales en el contexto de la transición energética.

Para ello, se establecieron tres objetivos específicos: (1) analizar los proyectos de corto y mediano plazo en el marco de la transición energética; (2) identificar las tecnologías intermedias necesarias y aplicables, considerando fuentes de energía como la hidráulica, solar, la eólica y el gas natural, entre otras, de acuerdo con la industria existente y su potencial desarrollo en la región; y (3) determinar las fortalezas y debilidades del país para lograr una transición energética que trascienda los gobiernos de turno y se consolide como un proyecto de Estado.

Esta investigación fue realizada desde una mirada heterodoxa de la economía,<sup>5</sup> de carácter exploratorio y se basó en una metodología mixta con un enfoque descriptivo, analizando dinámicas

---

<sup>5</sup> La heterodoxia en la economía es un conjunto de corrientes que se enfocan en aspectos que la ortodoxia (suele basarse en modelos matemáticos, el equilibrio de mercado, el comportamiento racional de los agentes económicos, usan supuestos limitantes con enfoque en el libre mercado [como el neoliberalismo o el monetarismo]), tiende a dejar de lado, como la desigualdad, el poder de las instituciones, la historia económica, el contexto social y político, y los

comerciales, coyunturales, económicas, geopolíticas, financieras, geológicas y políticas, con la utilización de más de 300 referencias y fuentes relacionadas con las distintas tecnologías y energías de la transición energética que permiten exponer el desarrollo del mismo en Colombia y su utilización como medio industrializador, el alcance de esta investigación culmina a corte del 31 de octubre del año 2024, el nororiente del país es la zona con mayor enfoque debido a sus características territoriales.

Como metodología se llevó a cabo una recopilación de información (bases de datos, artículos, fuentes, links, etc.), junto a una revisión bibliográfica fraccionada por temáticas a lo largo del tiempo de 1 año de investigación sobre las tecnologías existentes a su vez segmentada por energías, y estudios a nivel global, nacional y local para identificar aquellas tecnologías y energías aprovechadas que podrían ser adaptadas o son adoptadas en el país. Para ello, se aplicaron técnicas estadísticas y uso de herramientas para gráficos para el aprovechamiento de las distintas fuentes de datos.

### **1.1 Antecedentes**

Benavides, et al., (2022) analizaron la viabilidad de la carbono-neutralidad y advirtieron sobre los costos asociados a una adopción acelerada y forzada de esta. Estudiaron el papel del gas natural en el proceso de transición energética. Sus principales aportes radicarón en la propuesta de políticas públicas para implementar en el PND 2022-2026, destacando al gas natural como el combustible fósil menos contaminante y resaltando sus diversos usos e importancia como vector energético de la transición. También enfatizaron la necesidad de su desarrollo en el corto y mediano plazo.

Di Terlizzi, et al., (2021) argumentan que la transición energética en Colombia no se justifica únicamente por su impacto medioambiental, dado que el país cuenta con una de las matrices de generación eléctrica más limpias del mundo. En su estudio, recopilan diversas políticas e incentivos tributarios dirigidos al desarrollo de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) y analizan los principales factores que impulsan la transición energética.

Los resultados de este estudio destacan que la transición presenta mayores beneficios sociales y económicos que ambientales, ya que implica desafíos como la competitividad de costos

---

desequilibrios persistentes del mercado. Se destacan las escuelas keynesianistas, *post-keynesianas*, marxistas, institucionalistas, feministas, ecológicas y las *neo-shumpeterianas* que son las que inspiran esta investigación.

de las nuevas fuentes de energía y el acceso universal a la electricidad, lo que a su vez contribuye al mejoramiento de la seguridad y el suministro energético, aspectos que, aunque mejoran la calidad de vida, no están del todo enfocados en proteger al medio ambiente.

En su estudio Cruz, et al., (2023), proponen tres estrategias principales: la adaptación progresiva de vehículos impulsados por nuevas fuentes de energía, el establecimiento de alianzas estratégicas y la implementación de incentivos fiscales. Diversas investigaciones han corroborado estos procesos, como evidencia se resalta que los vehículos híbridos y eléctricos registraron las mayores ventas durante 2024, alcanzando incluso cifras récord en matriculaciones, un auge que ya representa una cuota de mercado considerable en nuestro país.

Esto refleja un cambio en el comportamiento de la demanda dentro del sector automotriz. El mercado de motocicletas en cambio, aún no ha logrado el inicio de la transición progresiva hacia modelos de energía eléctrica, principalmente debido a la falta de maduración tecnológica en este segmento y sus precios. El sector eléctrico es fundamental en la transición energética, es responsable de aprovechar y promover las fuentes de energía renovables, Colombia posee un enorme potencial en energía eólica y solar; estas aún representan un porcentaje muy bajo dentro de la matriz energética, dominada principalmente por la generación hidroeléctrica y térmica. Modelos implementados en países como Estados Unidos, Alemania, Japón y Dinamarca han demostrado la importancia de integrar los sectores residencial, industrial, académico y gubernamental en este proceso para lograr efectivos procesos de transformación (Velásquez, 2017).

Benavides y Cadena, (2018), analizan las características de la electricidad como bien económico. En el contexto de la transición energética, sus propuestas más relevantes incluyen la implementación de subastas de contratos para la incorporación de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), el establecimiento de una regulación favorable para nuevos actores y modelos de negocio, así como el desarrollo de servicios complementarios.

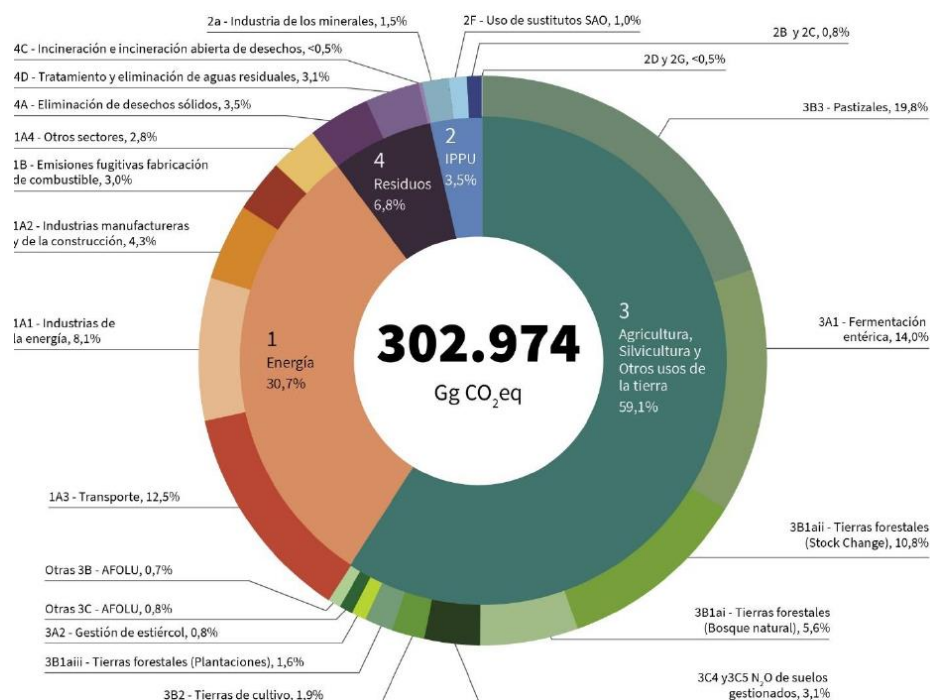
Según Ge, et al., (2021) el sector energético genera el 75.6% de las emisiones globales de GEI, con la generación eléctrica como principal subsector (31.9%), seguido del transporte (14.2%) y la industria manufacturera (12.6%). China lidera las emisiones absolutas con exactamente el 26.1% del total mundial, superando a Estados Unidos 12.67% e India 7.08%, Colombia representa el 0.6%. Entre 1990-2018, los procesos industriales incrementaron sus emisiones un 186.7% y el

transporte un 79.4%. En cuanto a composición gasosa, el CO<sub>2</sub> representa el 74.4% de las emisiones totales, seguido del Metano CH<sub>4</sub> (17.2%) de origen predominantemente agrícola.

Thema y Roa, (2023), presentan un panorama de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCR) en el contexto de Alemania y Colombia. Su estudio proyecta la demanda de energía y destaca la necesidad de un esfuerzo significativo tanto del sector empresarial como del gubernamental. En Colombia, el 31% de las emisiones de GEI proviene del sector energético, mientras que el 59% corresponde al sector de agricultura y otros usos de tierra como se expone en la figura 2.

**Figura 2**

*Participación por sectores en las emisiones GEI año 2018*



Nota. Tomado de (p.95), IDEAM, (2018).

Sumado a los beneficios medioambientales, que constituyen el objetivo esencial de este proceso, numerosos estudios e investigaciones coinciden en que la transición energética comprende cambios desde el presente y generará una amplia variedad de nuevas oportunidades más allá de la reducción de emisiones como innovaciones de negocio, mejoras en la calidad de

vida, reducción de la pobreza y mayor acceso a la energía. Se prevén diversas ventajas económicas y sociales, como el fortalecimiento de las telecomunicaciones, la promoción de los servicios digitales, entre muchos otros.

## **1.2 Visión, hojas de ruta y metas de Colombia en la transición energética**

Colombia ha planteado una serie de ‘hojas de ruta’ que delinean el camino para cumplir con los diferentes compromisos ambientales e internacionales adquiridos, con el propósito de conseguir un desarrollo industrial y económico que mejore la calidad de vida y sea sostenible en el tiempo, la primera y más importante en todo este proceso es la Hoja de Ruta de la Transición Energética Justa de Colombia, que busca alcanzar 4 grandes principios (Min. Energía HRTEJ, 2023).

1. Acción climática y descarbonización para territorios sustentables.
2. Reindustrialización y diversificación productiva buscando la soberanía nacional.
3. La paz total y territorial con participación con enfoque diferencial y de Derechos Humanos –DDHH-.
4. La democratización energética como derecho fundamental.

### ***1.2.1 Los ‘Minerales Estratégicos’, materia prima del futuro sostenible***

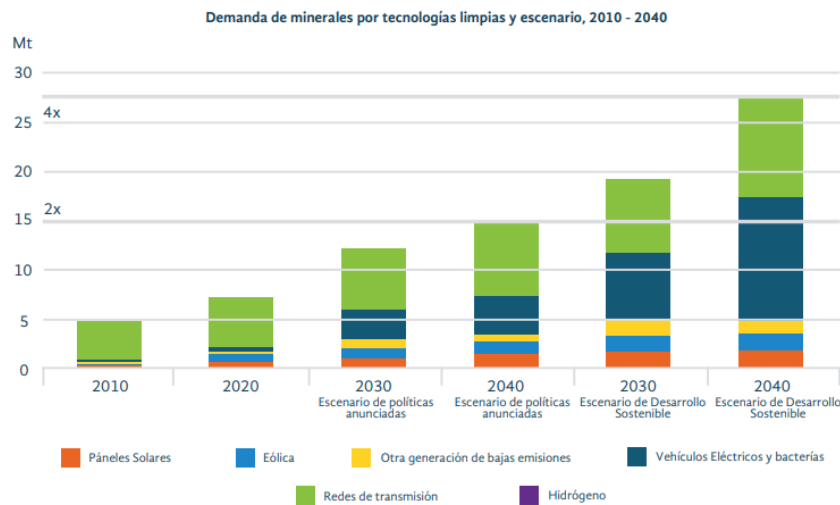
Para lograr los principios de la transición, se requieren políticas, integración de las comunidades, desarrollo de infraestructura, impulso de tecnologías así como producción de materias primas para su desarrollo por lo que se ha priorizado en la hoja de ruta de la transición, las cadenas de valor, desarrollo de estudios geo-científicos y delimitación de áreas especiales en el sector minero para el Acero, Acero Plano, Fosfatos, Áreas Silíceas, Carbón Coque, Grafeno, Cobre (Cu), Oro (Au), Níquel (Ni), Sodio (S) y Esmeraldas (Min. Energía HRTEJ, 2023). Son ‘minerales estratégicos’, por encontrarse disponibles para abastecer la demanda interna actual o futura, asociada a desarrollos industriales para una transición energética hacia fuentes limpias y también resultan estratégicos, porque se utilizan para promover esquemas asociativos de pequeños y medianos mineros y la formalización colectiva de mineros informales (ANM, 2023).

El crecimiento de la demanda global de estos minerales junto a otros más como las conocidas como ‘tierras raras’ plantea serios retos ambientales pero, representa una oportunidad industrializadora para Colombia, pues las energías renovables están en auge a nivel mundial que continuará siendo muy promovido en el mediano y largo plazo, como se señala en CREE, (2023),

se proyecta que la demanda de minerales críticos para energías renovables aumente significativamente hacia el año 2040 como se observa en la figura 3, con diferencias entre los escenarios estudiados, donde en las ‘Políticas anunciadas’ reflejan un menor aumento que el de ‘Desarrollo Sostenible’ donde las necesidades de minerales crecerá por cuatro (4x) en algunos sectores hacia 2040.

**Figura 3**

*Demanda de minerales por tecnologías limpias y escenarios, 2010-2040*

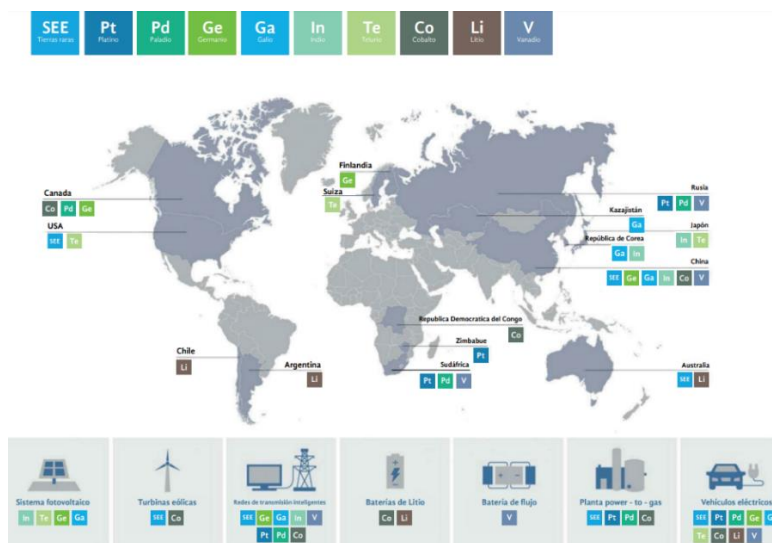


Nota. Mt= Millones de Toneladas. Tomado de (p.8), Centro Regional de Estudios de Energía CREE, (2023).

Además de los elementos químicos mencionados, las energías renovables también necesitan de otros elementos como el Vanadio (V), el Litio (Li) o el Galio (Ga), entre otros, que son producidos por muy pocos países, que son necesarios para diferentes tecnologías emergentes en especial la solar y eólica, donde la presencia de estos elementos son esenciales de los procesos de transformación de las energías de la naturaleza en energía eléctrica, cuestiones que plantean desafíos dada las dependencias internacionales en un contexto geopolítico volátil, que puede poner en riesgo las cadenas de suministro y el abastecimiento, véase figura 4.

**Figura 4**

*Principales exportadores, por elementos utilizado en las energías renovables*



Nota. Tomado de (p. 9), CREE, (2023).

### ***1.2.2 Los ‘Nuevos Energéticos’ de promesa a pilar del desarrollo industrial***

Adicional a los ‘minerales estratégicos’, se plantean los ‘nuevos energéticos’, que son fuentes y vectores energéticos sostenibles y bajos en carbono, centrándose en tres estrategias, el hidrógeno, la bioenergía y la geotermia, en las que se plantean una serie de acciones y metas. El hidrógeno (H), se ha posicionado como el vector energético más relevante dentro de los esfuerzos que Colombia ha realizado desde 2021 para avanzar en la transición energética. En este contexto, se estableció la Hoja de Ruta del Hidrógeno, con el objetivo de convertirlo en un elemento de reserva energética, se plantean 5 formas de producirlo.

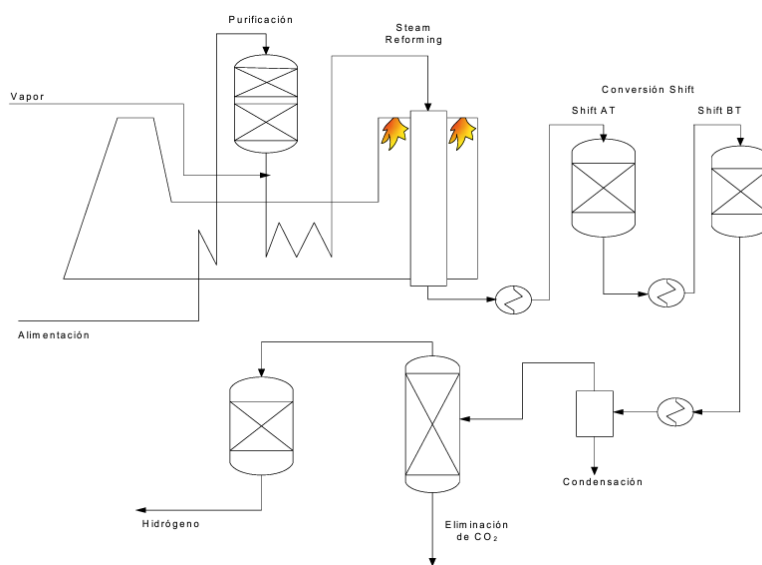
1. Hidrógeno a partir de combustibles fósiles usando tecnologías como el reformado del gas natural –SMR- o la gasificación del carbón.
2. Hidrógeno a partir de combustible con utilización de captura de carbono.
3. Hidrógeno a partir de electricidad, producido mediante electrolisis.
4. Hidrógeno renovable (o hidrógeno limpio), producido a partir de energía producida de fuentes renovables.
5. Hidrógeno con bajas emisiones, estrategias mixtas de las anteriores.

Bajo esta lógica, la hoja de ruta prioriza el hidrógeno gris de fuentes fósiles como paso temporal, el azul de fuentes fósiles, pero con captura de carbono y el verde de energías renovables,

como los esquemas más aplicables en Colombia. Conforme a las metas a 2030 en la producción, para el hidrogeno verde se plantea una capacidad instalada de 1 a 3 gigavatios –Gw- en electrolisis con el fin de lograr costos de US\$1.7 por kilogramo, del azul se plantean al menos 50 kt,<sup>6</sup> anuales principalmente de plantas reformado con vapor –SMR- con captura de carbono, proceso que se puede visualizar en la figura 5.

### Figura 5

*Proceso de reformado con vapor con captura de CO<sup>2</sup>*



Nota. Tomado de (p.187), Fundación Energia, (2008).

Esta oferta se usará para satisfacer la demanda no solo actual donde el hidrogeno es usado en refinerías para hidro-tratamientos e hidro-craqueo, en la industria química se utiliza en los procesos de síntesis del amoniaco y metanol, en las siderurgias y otras industrias se usa como agente reductor, sino también su papel en la demanda futura, que se necesitará este insumo para el consumo de calor, como *blending* o transporte dedicado para calor industrial y residencial, así como generación de electricidad. Teniendo como gran meta la reducción de entre 2.5 y 3 millones de toneladas de dióxido de Carbono -CO<sub>2</sub>-, metas que se esperan alcanzar en 2030

Con el hidrógeno (H), se planten acciones como generación de políticas públicas para incentivar su desarrollo con sus derivados, integración de infraestructura para demanda local y exportación, promover inversión extranjera, con un enfoque reindustrializador con

<sup>6</sup> Kt= Kilo-toneladas.

encadenamientos productivos y comunitarios, así como mejorar la articulación interinstitucional que incluya al sector privado, la academia y las comunidades.

Respecto a la bioenergía, se promoverá su uso como sustituto de los combustibles tradicionales, para ello se busca desarrollar políticas públicas que permitan la adopción de combustibles alternativos; impulsar el uso de bioenergía en la cocción de alimentos y en procesos productivos a nivel territorial, con el fin de que para el año 2030 tener al menos una generación eléctrica de 0.66 gigavatios –GW-, que para 2040 se esperan sea de 3.2 GW y de 5.5 GW para el año 2050. Por último, en la geotermia, se plantean acciones como estudios de prospección potencial de pozos, la generación de normativa ambiental para regular la exploración, la flexibilización de los licenciamientos ambientales, el alineamiento de las políticas públicas con los fondos de inversión multilaterales para acceder a financiación especializada y la expedición de un mecanismo de mercado que asegure el precio y permita sistema de apalancamiento.

Se espera desarrollar principalmente en la cordillera Central de Colombia, por sus territorios vulcanológicos activos, también con el fin de aprovechar la infraestructura existentes de hidrocarburos, teniéndose como meta la producción eléctrica de alrededor de 0.44GW para el 2040 y de al menos 1.16 GW para el 2050 (Min. Energía HRTEJ, 2023). Se enfatiza que la inclusión de los ‘nuevos energéticos’ en la matriz eléctrica del país será un posible polo de desarrollo industrial en especial en las regiones del nororiente del país, donde más infraestructura de hidrocarburos existe, la cual puede ser aprovechada y transformada para la producción de hidrogeno.

### ***1.2.3 Gas natural, el nuevo oro negro de la transición energética***

Otra de la estrategia que se tuvo en cuenta para alcanzar los principios de la transición energética, es la Hoja de Ruta del Gas Natural, en la que se proponen 22 acciones a corto, mediano y largo plazo para integrar el gas en la transición energética medidas que involucran a diferentes actores, que buscan a grandes rasgos garantizar el suministro, el abastecimiento y la ampliación de infraestructura. El gas natural desempeña un papel fundamental en la reindustrialización del país, ya que actualmente llega a más de 10 millones de hogares en todo el territorio nacional. En el sector industrial, representa aproximadamente el 43 % del consumo total de energía, seguido por los sectores de edificaciones y transporte, por lo que el Gas Natural, es el hidrocarburo que se busca como reemplazo al petróleo y el carbón (CREE, 2023).

La hoja de ruta del gas visualiza incertidumbre en la oferta, lo que genera un entorno de riesgo para inversiones en la sustitución de fuentes de energía más contaminantes. Se resalta que es necesario fortalecer el desarrollo de reservas locales de gas y optimizar la infraestructura de importación. La implementación de un modelo de transporte entrada-salida se presenta como una solución para promover la competencia y mejorar la eficiencia operativa del sistema, permitiendo una mayor flexibilidad en las transacciones, contratos y reduciendo costos operativos.

En términos de infraestructura del gas, más allá de las obras que se necesitan para garantizar el suministro, confiabilidad, suministro y abastecimiento en más regiones del país se enfatiza en la necesidad de la creación de un Gestor Técnico independiente que coordine la operación del sistema de transporte y almacenamiento de gas, que buscaría promover la creación de un Centro de Transacciones Virtual para la gestión de desbalances.

Se sugiere la creación del FONENERGÍA, un fondo destinado a la expansión de la cobertura en zonas no conectadas a la red de gas en zonas rurales en especial, con el objetivo de sustituir el uso de leña. Con estas estrategias se busca que se puedan alinear alcanzar las metas de descarbonización a largo plazo del país, optimizando la estructura de costos y favoreciendo la competitividad en el sector (CREE, 2023).

#### ***1.2.4 ¿Herejía energética? Por qué Colombia no puede prescindir (aún) del carbón***

Carlos Cante, presidente ejecutivo de Fenalcarbón, destacó que contrario a lo pensado respecto al carbón, sigue siendo esencial para Colombia debido a su capacidad para garantizar un suministro eléctrico confiable ante la intermitencia de las energías renovables. En 2024, el 18 % de la energía del país provino de plantas térmicas a carbón, las cuales consumen entre 18000 y 20000 toneladas diarias, sin olvidar que representan el 15% de las exportaciones de Colombia, por lo que la descarbonización del país es a la vez un arma de doble filo, requiriendo de un proceso gradual y que reemplace el carbón por energías como el gas natural o la electricidad en procesos en industrias que se puedan aplicar. En términos anuales, Colombia consume alrededor de entre 2.5 y 5 millones de toneladas de carbón para generación eléctrica, lo que representa menos del 0.6% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>. Fenalcarbón, en colaboración con la CREE, está desarrollando la Hoja de Ruta de la Transición Energética de los Carbones de Colombia para aprovechar eficientemente las reservas nacionales, estimadas en más de 7000 millones de toneladas (Portafolio, 2024).

Entre otros aspectos, a grandes rasgos la transición energética se plantea las siguientes grandes metas evaluadas por los sectores transporte, industrial y residencial.

#### ***1.2.5 Transporte 4.0: el transporte del siglo XXI***

El sector transporte enfrenta una transformación sin precedentes, impulsada por la necesidad de reducir su impacto ambiental y mejorar la eficiencia energética en Colombia se han definido seis estrategias clave que buscan redefinir la movilidad, desde la electrificación del parque automotor hasta la digitalización y optimización del transporte de carga, estas estrategias se plantean en el mediano y largo plazo, como un proceso gradual que busque la optimización de procesos, la reducción de emisiones y el menor uso particular de vehículos.

1). La electro-movilidad, destaca los vehículos híbridos y eléctricos como estrategia de transformación, reconociendo los desafíos en costos e infraestructura, se plantea la promoción de la producción de vehículos eléctricos y suministros, así como el apoyo de emprendimientos automotriz en fases de desarrollo.

Se buscará la reconversión del parque automotor antiguo a eléctrico, lo que estimularía el comercio de estos vehículos creándose espacios para la reindustrialización nacional. Se buscará acelerar la infraestructura de carga eléctrica tanto rápida como lenta, para poder satisfacer las necesidades de las nuevas movilidades lo que hará espacio a nuevos servicios de energía para usuarios como estaciones de carga, en casa y en la ciudad y otras innovaciones que dan espacio para el desarrollo de industrias.

2). La movilidad sostenible e incluyente, busca integrar el transporte público con opciones no motorizadas, como bicicletas y caminatas, buscando reducir el uso de vehículos particulares.

3). El cambio modal, se centra en mejorar la eficiencia energética y optimizar el consumo de combustibles, consiste en promover un cambio de hábitos en los usuarios del transporte, incentivando el uso del transporte público.

4). Al transporte multimodal, se promueve la redistribución de la carga hacia modos más sostenibles, como el ferroviario y fluvial, para reducir las emisiones del transporte carretero.

5). Digitalización del transporte y ciudades inteligentes, para crear un sistema de transporte verde, mediante tecnologías que optimizan rutas y mejoran la accesibilidad.

6). La conducción eficiente se presenta como una estrategia para reducir el consumo de combustible en el transporte de carga con uso de sistemas de transporte inteligente basados en

Sistemas de Posicionamiento Global –GPS- y telemetría para mejorar la eficiencia de los viajes (Min. Energía HRTEJ, 2023).

### ***1.2.6 Del fogón de leña a la energía limpia, el futuro del sector residencial***

En 2021, cuando se realizó la hoja de ruta de la transición, el 66% de la energía utilizada en los hogares era destinada a la cocción de alimentos, (el 35% correspondía a leña, el 22% a gas natural y el 9% a Gas Licuado del Petróleo –GLP-, el restante en carbón mineral, *kerosene* y *Jet Fuel*), seguido por refrigeración (13%) y otros electrodomésticos (21%). Las diferencias entre usuarios urbanos y rurales de energía son notables, los urbanos usando principalmente electricidad para refrigeración, iluminación y otros electrodomésticos (50% de la demanda total), mientras que en las zonas rurales la leña representa el 67% del consumo energético debido a la baja eficiencia de los fogones de leña (Min. Energía HRTEJ, 2023).

Por ello, las políticas de descarbonización deben centrarse en mejorar la eficiencia en la cocción, con estufas eléctricas, de inducción, y hornos eléctricos, que reemplazan combustibles fósiles en lo urbano. En las zonas rurales, se prevé la sustitución de leña por gas natural o GLP. Se contempla el uso de estufas eco-eficientes, sistemas de biogás, estufas solares y otras opciones de energía renovable. Para el calentamiento de agua sanitaria, se están promoviendo alternativas como los calentadores solares térmicos y de paso eléctrico, con el objetivo de reducir el uso de gas natural y GLP.

El sector terciario utiliza en energía el 20% en gas natural y el 4% GLP, principalmente utilizados en equipos de calor directo (como estufas y hornos) e indirecto (como calderas a gas). Estos consumos se dieron en edificaciones como clínicas, hospitales, hoteles, centros recreativos y restaurantes. Las alternativas proyectadas en estas áreas incluyen el uso de tecnologías híbridas y combustibles menos contaminantes, como pellets o biomasa. Se busca la promoción de tecnologías como hornos de arco eléctrico, quemadores de bajo NOx y calderas eléctricas de vapor. Los distritos energéticos permitirían una distribución eficiente de energía térmica en zonas como centros comerciales y zonas francas, reduciendo costos operativos y de mantenimiento. Se proyecta que para 2030 se implementen varios distritos energéticos, lo que podría reducir la demanda eléctrica no regulada en hasta un 1,5% (Min. Energía HRTEJ, 2023).

### ***1.2.7 El sector más difícil para descarbonizar, el industrial***

El sector industrial colombiano tiene como fuentes de energía, en un 31% el gas natural, un 26% carbón mineral, 17% electricidad del sistema eléctrico nacional, bagazo un 16%, auto cogeneración 7%, Gas licuado 2%, 1% entre otros. Una parte importante de la energía consumida en la industria se destina a generar calor, tanto directo como indirecto, necesario para procesos como el calentamiento de hornos y calderas.

Dentro de las industrias más intensivas en consumo de energía y emisiones de GEI destacan las de alimentos, bebidas y tabaco, y minerales no metálicos, que en conjunto representan el 56% del consumo total de energía y el 51% de las emisiones del sector. La industria de alimentos y bebidas, por ejemplo, utiliza principalmente bagazo de caña de azúcar y carbón térmico para generar vapor, mientras que la industria de minerales no metálicos depende del carbón y el gas natural para procesos como el horneado en la fabricación de cemento, cerámica y vidrio.

Se plantea la electrificación de procesos y la adaptación de activos para uso de fuentes renovables. En casos que requieren grandes cantidades de energía, se sugiere el uso de biomasa o gas natural. El sector de alimentos, bebidas y tabaco presenta oportunidades significativas para mejorar la eficiencia energética, principalmente debido a la obsolescencia de los equipos y la falta de sistemas de monitoreo y control adecuados. La modernización tecnológica y la adopción de tecnologías más sostenibles, pueden contribuir a mejorar la competitividad del sector y reducir su huella de carbono.

En cuanto a los minerales no metálicos, que incluyen industrias como la cementera y la cerámica, se observa un potencial de mejora a través de la electrificación de procesos y el uso de fuentes renovables. Las refinerías y petroquímicas, con un perfil distinto, también son sectores clave en la transición energética. Estas industrias, producen combustibles derivados del petróleo y productos petroquímicos, podrían beneficiarse del uso de hidrógeno como fuente de energía más limpia, especialmente si se incorpora la captura y almacenamiento de carbono (CCUS) para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas durante la producción de hidrógeno.

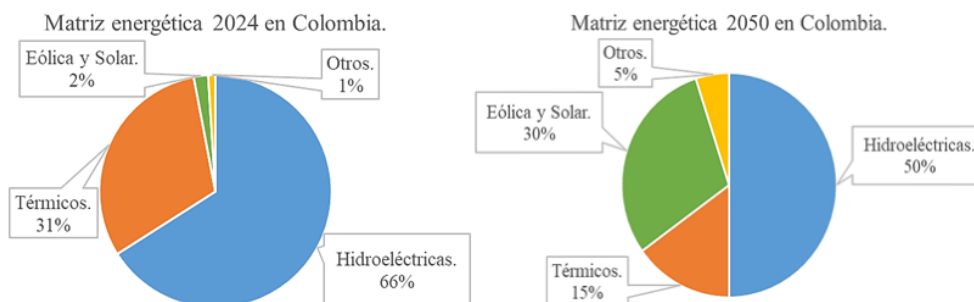
Además de los sectores mencionados, existen otras industrias que también pueden contribuir a la descarbonización, aunque con menores consumos energéticos como los sectores de la industria de pulpa, papel e imprenta, procesos químicos, hierro y acero, textiles, cueros, madera y maquinaria. A pesar de que no son sectores de alto consumo energético, su potencial para reducir emisiones de GEI es considerable.

## 2. Panorama de la transición energética en Colombia

Para comprender el panorama de la transición energética en Colombia, se explorarán diversas temáticas relacionadas con la generación de energía eléctrica teniendo en 2023 un total de 18.9Gw,<sup>7</sup> donde se destacaron los sistemas hidroeléctricos con un 66%, sistemas térmicos 31%, eólica y solar 2% y la biomasa (cogenerador) 1%, la matriz energética de Colombia se puede considerar ‘limpia’ aunque se proyecta reducir a un más el papel de la producción energética del país de los hidrocarburos promoviendo en su lugar las renovables para el 2050, véase figura 6.

### Figura 6

*Matriz energética a corte de 31 de octubre de 2024 y proyección*



Nota. Datos, UPME, (2024-2).

En primer lugar, en este capítulo se analizará los sistemas de gran almacenamiento de energía como los sistemas hidroeléctricos y térmicos que representan las principales fuentes de producción de energía del país, continuamente se explorará la energía eólica, solar y la biomasa.

Se reconocen las Resolución 520 UPME de 2007, y Resolución 0638 UPME de 2007, las cuales establecieron los requisitos, documentos y procedimientos para el registro de proyectos de generación de energía eléctrica, permitiendo a los desarrolladores acceder a beneficios tributarios y económicos definidos por normativas, que promueven el uso de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) (Ley 1715, 2014).

<sup>7</sup> Gw = Gigavatios. 1 GW = 1.000 megavatios MW o 1.000.000 de kilovatios kW o 1.000.000.000 W.

Posteriormente, la Resolución UPME 143 de 2016, actualizó estas regulaciones, estableciendo fases con vigencias específicas para los proyectos: Fase 1 (dos años), Fase 2 (un año) y Fase 3 (un año o hasta el inicio de la construcción). Los proyectos pueden ingresar directamente a una fase dependiendo del cumplimiento de los requisitos establecidos. El registro de los proyectos en la UPME es indispensable para acceder a autorizaciones ambientales, declaratorias de utilidad pública y participación en las subastas del mercado mayorista de energía, en línea con los requisitos de la Comisión de Energía y Gas. Además, para optar por financiación con tasa compensada a través de Findeter S.A., los proyectos deben encontrarse al menos en Fase 2 (Resolución 40393 Min. Minas, 2015).

Desde el inicio del registro de proyectos de generación eléctrica en 2007, se han contabilizado 1.874 proyectos. De estos, 1.613 proyectos han sido prescritos debido a su entrada en operación, agotamiento del recurso base o cumplimiento de sus fases. Actualmente, permanecen vigentes 261 proyectos, centrados exclusivamente en energías alternativas, sin incluir nuevos desarrollos basados en combustibles fósiles.

Colombia está en medio de una transformación energética crucial, con una matriz aún dominada por hidroeléctricas y térmicas, pero con un futuro más limpio en el horizonte. La clave está en sustituir los hidrocarburos por renovables, con un enfoque en la eficiencia y la innovación. Para asegurar esta transición, los sistemas de almacenamiento a gran escala han sido, son y seguirán siendo esenciales, marcando el siguiente paso hacia una matriz energética verdaderamente sostenible.

## **2.1 Sistemas de Almacenamiento a Gran Escala**

Existen sistemas físicos para el almacenamiento de energía que permiten tener infraestructuras de larga vida y que proporcionan confiabilidad en suministro eléctrico. Los tres principales son el almacenamiento hidroeléctrico, los sistemas térmicos y el aprovechamiento del calor y los sistemas de aire comprimido CAES que se proceden a desarrollar a continuación.

### ***2.1.1 Bombeo hidroeléctrico***

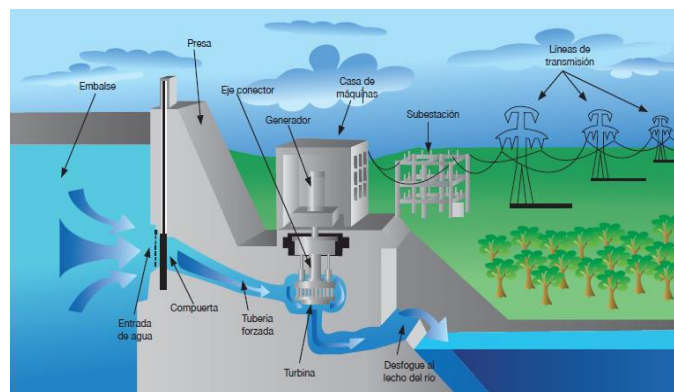
Desde una postura histórica, la primera hidroeléctrica en entrar en operación en el mundo ocurrió el 30 septiembre 1882 en Appleton, Wisconsin, Estados Unidos, la Central hidroeléctrica de *Vulcan Street* (Durán, 2023). Inicialmente alimentaba la iluminación de dos fábricas de papel

y una vivienda, la casa pertenecía al empresario H.J. Rogers, este visionario, inspirado en la primera central eléctrica a base de vapor construida en Nueva York la Central *Pearl Street*, por Thomas Alva Edison quien luego de inventar la bombilla en 1879, necesitaba suministrar electricidad a sus clientes ya en 1882, Rogers pensó en un proyecto similar pero, en vez de vapor se aprovecharía la fuerza del río Fox proyecto que hizo realidad mediante una rueda hidráulica, desde ese momento el aprovechamiento de la fuerza fluvial se ha masificado a lo largo de todo el globo terráqueo (Ramon, 2015).

El Almacenaje de energía por bombeo hidroeléctrico usa principios de la física inversa, bombeando agua a una altura para ganar energía potencial que luego se convierte en electricidad al ser turbinada. Las hidroeléctricas son una fuente de energía renovable, confiable y de baja emisión de carbono, se componen de (3) grandes partes, la presa, que es la infraestructura de obra civil, que destacan reteniendo el agua y ser de grandes alturas, de materiales macizos y que delimita la capacidad estructural del proyecto; el embalse, que es el agua o volumen acumulado en el territorio, sus paredes y territorios inundados, y la central donde están localizados los grupos generadores de energía eléctrica que en algunos casos puede ser inclusive subterráneos (UPME, 2015). Véase su proceso de generación de energía a grandes rasgos en la figura 7.

### Figura 7

#### *Proceso de Generación de energía hidroeléctrica*



Nota. Tomado de (p.26), UPME, (2015).

De manera general no existe una forma de clasificación de estos sistemas, aun así, se utiliza por concepción general de clasificación dispuesta por los mapas que utiliza la UPME, sugerida por

la Organización Latinoamericana de Energía -OLADE- en ese sentido, las hidroeléctricas se clasifican conforme a su capacidad instalada de la siguiente manera, las pico-centrales tienen una capacidad entre 0,5 y 5 kilovatios –kW-, las micro-centrales entre 5 y 50 kW, las mini-centrales entre 50 y 500 kW, las pequeñas centrales hidroeléctricas –PCH- entre 500 y 20.000 kW, y las centrales hidroeléctricas -CH- presentan una capacidad mayor a 20 megavatios –MW- (UPME, 2015). Los principales tipos de tecnologías usadas en las centrales hidroeléctricas por la forma de captación de energía se visualizan en la tabla 1.

**Tabla 1**

*Tipos de centrales hidroeléctricas*

<b>Tipo</b>	<b>Descripción</b>
Central de agua fluyente.	Utiliza el caudal natural del río para generar energía sin almacenar agua. Su potencia varía según la estación del año: es máxima en épocas de lluvias y casi nula en épocas secas.
Central con embalse o de regulación.	Almacena grandes volúmenes de agua en embalses creados por presas, permitiendo regular el caudal y garantizar una producción constante de energía, requieren mayor inversión, optimizan la generación y reducen el costo energético.
Central de acumulación por bombeo.	Utiliza dos embalses a distintos niveles. Durante la demanda máxima, el agua del embalse superior genera energía al pasar por turbinas. En períodos de baja demanda, el agua se bombea nuevamente al embalse superior para reiniciar el ciclo.

Nota. Datos del Atlas Potencial Hidro-energético, UPME, (2015).

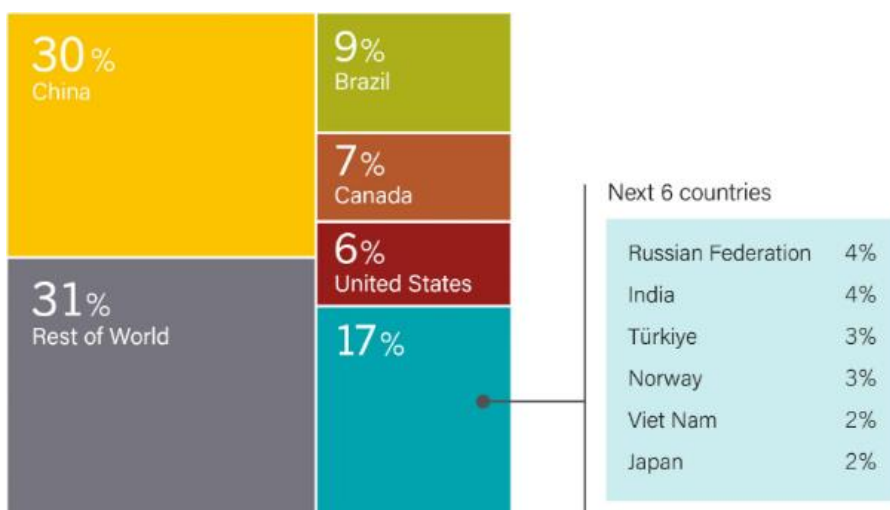
Las energías de las hidroeléctricas representaron alrededor del 16% de la energía global en 2023 y el 47% del total de toda la energía renovable, alcanzando 1.237 GW de capacidad acumulada en 2023, 7.2 GW más que en 2022. La mayor Central hidroeléctrica del mundo a 31 de octubre de 2024, es la represa de las Tres Gargantas en China, con una capacidad instalada de 22,500 MW ubicada en Hubei sobre el río Yangtsé (río más largo de Asia y el más caudaloso de China) construcción, que duró 17 años (1993-2009), implicó desviar el río y desplazar a más de unas 1.250.000 personas, la destrucción de 34,6 millones de m<sup>2</sup> de viviendas, y afectó a 24.500 ha. de cultivos y 1.600 fábricas (Berga, 2015). La presa se diseñó para generar energía y controlar las inundaciones, lo que ha reducido significativamente los daños por subidas del río, suministra energía a nueve provincias chinas y dos ciudades, como Shanghái.

En segundo lugar está en Latinoamérica sobre el río Paraná, la Central Binacional Hidroeléctrica de Itaipú, en Brasil y Paraguay, con una capacidad instalada de 14.000 MW suministra el 17.3% de energía de todo el Brasil y el 72.5% de Paraguay fue terminada en 1977, fecha desde la cual ha acumulado una visita de más de 20 millones de personas de 197 países por turismo (ITAIPU, 2015).

La tercera es la Central Hidroeléctrica ‘Simón Bolívar’ en la represa Gurí en Venezuela inaugurada en 1986, con 10.000 MW de capacidad instalada representando el 62% de la energía que consume ese país, y también se ha logrado en algunos momentos venta de electricidad a Brasil (Construtec, 2024). Los países con mayor capacidad instalada en 2023, fueron China, Brasil, Canadá y Estados Unidos, estos 4 países representaron el 50% del total mundial y las 10 primeras naciones un 69%, más de la mitad de la capacidad instalada se encuentra en Asia (REN21, 2024). Véase figura 8.

### Figura 8

*Participación capacidad hidro-eléctrica por países año 2023*



Nota. Tomado de REN21, (2024).

Nepal, se destacó en 2023 por su aumento de 2.6 GW a 4.4 GW de capacidad instalada, este país posee casi el 100% de su matriz energética en producción hidroeléctrica. La República Democrática Popular Lao añadió 540 MW a sus ya 9.8 GW de poder hidro-energético, se planea

en dicho país la finalización de la planta de energía de *Luang Prabang* de 1.46 GW, para el año 2030 (REN21, 2024).

En Colombia, la primera hidroeléctrica, data del año 1900 construida por Samper Brush y CIA, cerca de Bogotá llamada ‘El Charquito’ con una capacidad de 300kw,<sup>8</sup> aprovechando la caída del salto de Tequendama (Canal Institucional, 2022), desde entonces las presas, embalses y proyectos de estos tipos se han incrementado y sostienen la producción de energía del país.

Cabe resaltar el suceso histórico en 1992, donde Colombia vivió una grave crisis energética provocada por el fenómeno de ‘El Niño’,<sup>9</sup> que causó sequías extremas, lo que redujo drásticamente los niveles de los embalses que abastecían el sistema hidroeléctrico del país. En ese entonces, Colombia dependía en gran medida de la energía hidroeléctrica, que representaba el 70% de su producción energética. Entre el 2 de marzo de 1992 y el 7 de febrero de 1993, el Gobierno del Presidente César Augusto Gaviria Trujillo, el de la ‘apertura económica’, tomó medidas de racionamiento energético que incluyeron cortes de electricidad a nivel nacional.

En algunas ciudades como Bogotá, los cortes llegaban hasta 9 horas diarias. Ante la escasez de agua y energía, se lanzaron campañas de concienciación como ‘Cierre la llave’, que promovían el ahorro de agua. En ciudades como Cali, se impusieron sanciones severas para quienes desperdiciaban agua, y en Buenaventura, se impuso un racionamiento de energía por 2 días consecutivos. Como medida para mitigar los efectos del apagón, el gobierno adoptó la ‘Hora Gaviria’, un cambio de horario que consistió en adelantar una hora los relojes a partir del 2 de mayo de 1992, con el fin de aprovechar más la luz natural del día y reducir la demanda de electricidad en las horas de la tarde. Esta medida estuvo vigente durante nueve meses. Desde entonces, Colombia nunca volvió a adoptar el horario de verano y mantiene su horario oficial UTC−5 durante todo el año (Canal Institucional, 2022).

---

<sup>8</sup> Kw = Kilo-watio.

<sup>9</sup> Es un fenómeno específico del océano Pacífico. El nombre del ‘El Niño’ proviene de las costas de Perú y Ecuador, donde ocurrían grandes lluvias e inundaciones en época navideña mientras en Colombia se genera una fuerte sequía. Se desarrolla por fuerza de los vientos alisios que empujan las masas de aire caliente del océano pacífico al territorio de Colombia, es un fenómeno marino que tiene implicaciones en la climatología de Colombia. El cambio climático provoca que la superficie del océano se caliente lo que hace más frecuente los fenómenos extremos como ‘el Niño’ sean más recurrentes (UniAndes, 2024).

Las hidroeléctricas representan alrededor del 66.83% de la generación eléctrica en 2024, con 30 centrales hidroeléctricas ubicadas en las principales fuentes hídricas del país (Corficolombiana, 2023). Se destacan las 10 con mayor capacidad en la tabla 2.

**Tabla 2**

*Las 10 hidroeléctricas con mayor capacidad instalada corte 31 octubre 2024*

<b>Proyecto /Departamento</b>	<b>Capacidad Instalada/Altura presa</b>	<b>Empresa/ FOP</b>	<b>Capacidad máxima de Agua/Superficie</b>	<b>Curso de agua</b>
1. El Guavio/ Cundinamarca	1250 MW / 243m.	Enel/ 1992	1.140.000.000m <sup>3</sup> / 15.000 ha.	Río Guavio
2. San Carlos/ Antioquia	1240 MW/ 70m.	Isagen/ 1984- 1987	61.670.000m <sup>3</sup> / 340 ha.	Río San Carlos, Río Guatapé
3. Hidroituango/ Antioquia	1200MW/ 225m.	E.P.M./ 2022.	2.270.000.000m <sup>3</sup> / 3.800 ha.	Río Cauca
4. Chivor/ Boyacá	1000MW/ 237m.	AES Chivor / 1977	778.000.000m <sup>3</sup> / 4.400 ha.	Río Bata
5. Hidrosogamoso/ Boyacá	820 MW/ 190m.	Isagen/ 2014	4.800.000.000m <sup>3</sup> / 7000 ha.	Río Sogamoso
6. Porce III/ Antioquia	770MW/ 151m.	E.P.M./ 2010	170.000.000 m <sup>3</sup> / 460 ha.	Río Porce
7. Guatapé/ Antioquia	560MW/ 65m.	E.P.M./ 1979	1.070,210.000m <sup>3</sup> / 620 ha.	Río Nare y Guatapé
8. Betania/ Huila	540MW/ 91m.	Enel/ 1987	1,971,000,000m <sup>3</sup> / 7000 ha.	Río Magdalena, Yaguará
9. Cadena Guatrón <sup>10</sup> / Antioquia	512MW/ 86.6m.	E.P.M./ 1932	171.900.000m <sup>3</sup> / 7400 ha.	Río Concepción, Nechi, Pajarito
10. Alto y Bajo Anchicayá/ Valle del Cauca	429MW/ 60m.	Celsia/ 1955- 1974	48'000.000m <sup>3</sup> / 25.100 ha.	Río Anchicayá, Dagúa

<sup>10</sup> Consta de 5 sitios principales, el embalse Miraflores con 138.900.000m<sup>3</sup>, el embalse Troneras con 33.000.000m<sup>3</sup>, la central Troneras con 40 MW, la central Guadalupe III con 270 MW y la central Guadalupe IV con 202 MW (EPM, 2022).

---

Nota. FOP=Fecha de entrada de Operación. MW= Megavatio. M= metro. Ha=Hectárea. m<sup>3</sup> = metros cúbicos. Con datos de Argos, (2010); Universidad EAFIT, (2013); Santander Competitivo, (2014); ANLA, (2020); Enel, (2022); EPM, (2022); Aescol, (2024); ANLA, (2024); Celsia, (2024); EPM, (2024); Hidroituango, (2024); UNAL, (2024).

El principal desafío de las hidroeléctricas es el alto costo de la infraestructura y la necesidad de ubicaciones geográficas específicas para minimizar inversión. Las hidroeléctricas, presentan algunas vulnerabilidades, las cuales son propias del entorno o naturales, como fallas geológicas, cuencas jóvenes, inestabilidad de taludes, fuertes precipitaciones, derrumbes, exceso de sedimentos o residuos vegetales.

Entre las antrópicas está el efecto de la actividad humana en los caudales de los afluentes, incremento de la deforestación, ampliación de la frontera agriarria, ganadería y agricultura intensiva, actividad minera, entre otras. También existen otros aspectos, relacionados con riesgos ajenos a las centrales hidroeléctricas, como mala regulación de la tensión del servicio eléctrico, pérdidas en transmisión de fuentes lejanas, voladura de torres eléctricas derivados del conflicto de grupos al margen de la Ley, etc.

Las hidroeléctricas con más de 10 MW de potencia instalada deben transferir el 6% de sus ventas brutas: un 3% para Corporaciones Autónomas Regionales –CARs-, Parques Nacionales y conservación de páramos, y otro 3% para municipios de la cuenca hidrográfica, distribuidos en 1.5% para los que surten el embalse y 1.5% para los que lo albergan, con un 0.2% destinado a municipios donde se ubica la planta si no forman parte de la cuenca (Ley 99, 1993).

Por lo que, su construcción mantenimiento y sostenimiento en el tiempo son generadores de crecimiento económico y fuente de ingresos para los entes territoriales cercanos y las entidades ambientales garantizar recursos para mitigar los efectos negativos que traen estas grandes obras de ingeniería, además que se han potenciado como centros turísticos que han permitido desarrollar turismo de naturaleza y náutico.

### ***2.1.2 Tecnologías de energías de los océanos***

Las energías de los océanos integran diversas formas de aprovechamiento energéticos de los grandes cuerpos de agua, conceptualizan Quintero y Quintero (2015), que las energías

derivadas de mar engloban distintas tecnologías de aprovechamiento energético de los océanos mares o lagos, son una fuente renovable no convencional que convierte la energía potencial de las mareas, las diferencias de temperaturas o presiones, así como el flujo del movimiento superficial de las olas o en la profundidad de las corrientes marinas entre otras, para generar electricidad.

Su fuerza proviene de la energía gravitacional del Sol y de la Luna, que atraen las aguas de los océanos lo que provoca las mareas, se denominan mareas muertas (pocas mareas) cuando la Luna está en creciente y menguante, cuando la luna está llena o nueva las mareas se distinguen como mareas vivas (mayores mareas). En su punto de máxima altura de mareas se llama pleamar y en el de mínima, bajamar (Astronomía, 2024). Los movimientos físicos provocados por los efectos gravitatorios de los astros han sido estudiados por casi todas las tribus y civilizaciones de la humanidad, por lo que aprovechar sus efectos en las aguas para la producción energética representa una alternativa inagotable y que se renueva cada día.

Se reconocen principalmente cinco tipos de tecnologías utilizadas y una en fase experimental para el aprovechamiento de la energía proveniente de los océanos, mares y lagos como bien exponen González et al., (2016) estas distintas fuentes de energía comienzan con la maremo-térmica una forma de energía renovable que utiliza las diferencias entre las aguas oceánicas profundas, más frías, y las superficiales, más cálidas, para mover una máquina térmica y generar energía aprovechable, usualmente en forma de electricidad, se clasifican conforme su profundidad, en superficiales entre 100 y 200 metros, las intermedias de 200 a 400 metros y las profundas de entre 1000 y 5000 metros.

Una de las alternativas de las fuentes de energía es la generada por las corrientes marinas, las cuales presentan una alta previsibilidad, ya que tanto las corrientes de origen inercial como las mareales conservan caudales bien conocidos y prácticamente constantes a lo largo del año garantizando así una mayor eficiencia. La energía mareomotriz se obtiene a partir del aprovechamiento del movimiento de las mareas; mediante un alternador, este sistema permite convertir dicha energía en electricidad.

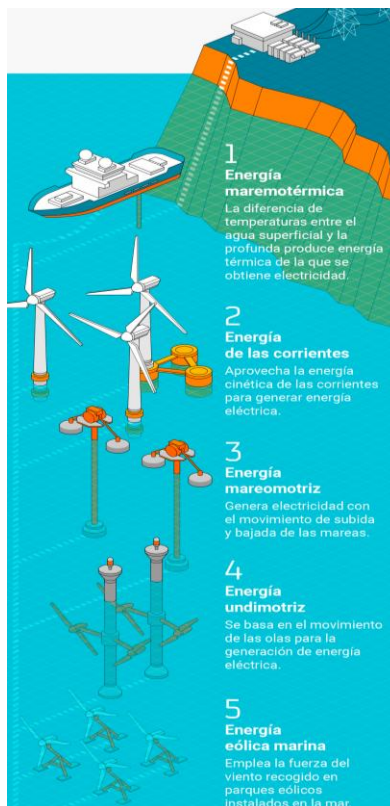
Otra forma de aprovechamiento es la energía undimotriz se obtiene mediante la captación de la energía cinética contenida en el movimiento de las aguas oceánicas y marinas. A nivel mundial, se reconocen tres sistemas principales para su aprovechamiento: el sistema *Vivace*, que convierte la energía de las corrientes marinas en electricidad mediante vibraciones inducidas por

vórtices, siendo ideal para flujos lentos; el sistema *Gesmey*, una boya sumergible diseñada para zonas profundas que transforma el movimiento de las olas en energía eléctrica; y el sistema *Thaw*, que emplea dispositivos flotantes para captar el movimiento vertical de las olas y generar energía, destacándose por su enfoque en la modularidad.

La energía eólica marina es aquella que aprovecha la fuerza del viento en zonas oceánicas para generar electricidad mediante aerogeneradores instalados en plataformas marinas resaltando Sebastiano (2014), que se utilizan tres tipos principales de tecnologías: (1) aerogeneradores de cimentación fija, anclados al lecho marino en profundidades menores a 50 metros; (2) estructuras flotantes, empleadas en aguas profundas y aseguradas con sistemas de amarre; y (3) sistemas híbridos, que combinan la energía eólica con otras fuentes renovables marinas, como la undimotriz (p. 47). Un ejemplo de las características y tecnologías se puede visualizar en la figura 9.

## Figura 9

### *Tipos energías oceánicas*



Nota. Tomado de Repsol, (2024).

De manera experimental se han realizado estudios sobre la energía osmótica la cual es obtenida por la diferencia en la concentración de la sal entre el agua de mar y el agua de río, que permite generar electricidad teniendo como residuo en este proceso únicamente agua salobre, según Yip y Elimelech (2012), esta tecnología prometedora se basa en dos sistemas principales que utilizan membranas especializadas: la ósmosis por presión retardada (PRO), que convierte la presión osmótica en energía mecánica, y la electrodiálisis inversa (RED), que genera corriente eléctrica directamente mediante el movimiento de iones. Aunque estos sistemas muestran potencial teórico significativo, aún enfrentan desafíos críticos en su desarrollo, incluyendo la baja eficiencia energética y la degradación prematura de las membranas, estas tecnologías aun se encuentran en fases de prototipos y desarrollos para hacerlas viables comercialmente.

Se expone en el ensayo de Rodríguez Cifuentes, (2022), que, entre los proyectos más destacados a nivel global de aprovechamiento de las energías oceánicas, está en Francia la Central *La Rance*, construida en 1966, con capacidad de 240 MW, generando electricidad a 130.000 hogares por año, siendo la primera del mundo, a través de 24 turbinas de bulbo, cada una de 10 MW para una cuenca de 2,2 km<sup>2</sup> y una marea media de 8,2 metros que aún sigue funcionando. Otro proyecto destacado es la mareomotriz *Annapolis Royal*, en Canadá, entro en operación en 1984 con 20 MW se divide en cuatro palas y compuertas de esclusa que retienen el agua en la parte baja del rio Annapolis, posterior a eso se abren las compuertas que impulsan la turbina.

También señalan, Quintero y Quintero (2015), a la planta mareomotriz de *Sihwa Lake*, ubicada en la costa occidental de Corea del Sur, se ha consolidado como la más grande del mundo en su tipo. Construida en el lago homónimo, aprovechando un dique existente en una cuenca de 30 km<sup>2</sup>, cuenta con diez turbinas de bulbo sumergidas de 25,4 MW cada una, lo que permite una capacidad de producción eléctrica de 254 MW. La central, que ocupa una superficie de 140.000 m<sup>2</sup> y alcanza los 15 pisos de altura, inició su construcción en 2004 con una inversión de US\$335 millones (Energías Renovables, 2011). El proyecto finalizó en septiembre de 2011 y comenzó a operar progresivamente en agosto del mismo año. Gracias a su generación diaria de 254 MV, puede abastecer de electricidad a 300.000 personas.

El medio aleman *Deutsche Welle* –DW- (2021), expuso la habilitación en 2021, en Reino Unido del *Orbital Marine Power*, con una capacidad de 2 MW capaz de abastecer a 2.000 hogares británicos. Está ubicada en el Centro Europeo de Energía Marina (EMEC), en las Islas Orcadas,

Escocia, y también alimenta un electrolizador terrestre para producir hidrógeno verde. La turbina pesa 680 toneladas, mide 74 metros de largo y cuenta con dos palas sumergidas de 20 metros de diámetro que aprovechan las corrientes mareales para generar electricidad. Se espera que opere durante 15 años.

La empresa Minesto, inauguró la central mareomotriz Dragón 12, a la red eléctrica de las Islas *Faroe*, (Dinamarca), el 9 de febrero de 2024, logrando una capacidad de 1.2 MW. Este cometa submarino,<sup>11</sup> de 12 metros y 28 toneladas aprovecha el flujo de las mareas para generar electricidad de manera continua y predecible (Roca R. , 2024).

Se sintetiza de lo anterior que a nivel global se han desarrollado diferentes esfuerzos para implementar estas tecnologías en especial en países industrializados como Francia y Corea del Sur, teniendo en cuenta las distintas energías conforme a las estructuras territoriales y la infraestructura de los países pioneros, lo que da espacio para que Colombia empiece a implementar estos proyectos ya que se poseen hoy día más madurez tecnológica que años atrás, además que ya se conocen las principales barreras y retos a la hora de usar estas tecnologías trayendo de presente que por el territorio colombiano estar colindando por dos océanos y una costa de más de 3200 kilómetros de los cuales 1760 kilómetros están en la costa sobre el Caribe y los 1300 sobre el Pacífico representa una oportunidad de llevar electricidad a territorios que por mucho tiempo han sido olvidados por el Estado y que hoy día representan dicho por extensas obras y estudios en la literatura como las zonas más pobres del país teniéndose los Departamentos del Choco y La Guajira como los más afectados, pero, también pueden ser los principales beneficiarios de estas tecnologías y de esa manera lograr cambios que beneficien y garanticen una mejor calidad de vida.

En esa línea, en Colombia, el estudio de Polo, et al., (2008) consideraron 45 bahías en el litoral pacífico, de las cuales resaltan las zonas más propicias para proyectos de generación por corrientes serían: Punta Catripe, Delta Chavica, Bocana Raposo, Boca Naya y Bocana Armerías, con los mayores potenciales de la energía mareomotriz, donde las mareas superan los 3 metros, resaltan como discusión, que hay variables a tener en cuenta pues en el territorio el consumo de energía es a base en diésel, pues la mayor parte de la Costa Pacífica no está interconectada al

---

<sup>11</sup> Cometa submarino = Se refiere a un dispositivo de energía mareomotriz que se asemeja a un cometa o una cometa de vuelo, pero que está anclado al lecho marino y se mueve bajo el agua siguiendo trayectorias en forma de ‘∞’ impulsado por las corrientes de marea. El movimiento genera energía mediante turbinas integradas, (Blain, 2024).

sistema eléctrico nacional, no hay disponibilidad de infraestructura para acceso a materiales, además de las necesidades básicas insatisfechas NBI<sup>12</sup> que es el común denominador económico de los habitantes del litoral. Aunque aún no existen proyectos operativos en el país, académicos de instituciones educativas están investigando cómo acelerar el desarrollo de estas tecnologías, ya que podría beneficiar a las poblaciones costeras con dificultades de acceso a la red eléctrica.

Como se evidencia las tecnologías de los océanos, mares y lagos, son emergentes y en su mayoría se han desarrollado en países industrializados que han adquirido experiencia la cual puede ser compartida con Colombia y de esa manera llegar a los territorios aislados con tecnologías que les permitiría acceder a la electricidad, cuestiones que darían flexibilidad al sistema eléctrico nacional, permitiéndole llegar a territorios sin la necesidad de una infraestructura, lo que a su vez daría mayor autonomía y autorreconocimiento a los territorios involucrados.

A continuación, se examinan el almacenamiento térmico, los intercambiadores de calor y las bombas de calor, tecnologías esenciales en su papel como estabilizadores energéticos y promovedores de eficiencias y aprovechamientos residuales que permite a las industrias ser más competitivas en el gasto de recursos reduciendo su impacto ambiental.

### ***2.1.3 Almacenamiento térmico, transferencia de calor***

El almacenamiento térmico de energía es un componente clave en la transición hacia energías renovables, al permitir la optimización de la gestión energética y la mitigación de la intermitencia en la generación eléctrica, especialmente en centrales termo-solares y procesos industriales con calor residual. Destaca por su capacidad para almacenar grandes cantidades de energía a un costo relativamente bajo, siendo aplicable en diversos sectores como la calefacción y refrigeración de viviendas y edificios, procesos industriales de calor o frío, e incluso como complemento al almacenamiento masivo de energía para la red eléctrica (Ortega y Gutiérrez, 2020).

Entre sus tecnologías destacan el almacenamiento de calor sensible, ampliamente utilizado en aplicaciones industriales con sales fundidas o agua; el almacenamiento de calor latente, que

---

<sup>12</sup> “La metodología de NBI busca determinar, con ayuda de algunos indicadores simples, si las necesidades básicas de la población se encuentran cubiertas. Los grupos que no alcancen un umbral mínimo fijado, son clasificados como pobres. Los indicadores simples seleccionados, son: Viviendas inadecuadas, hogares con hacinamiento crítico, viviendas con servicios inadecuados, hogares con alta dependencia económica y hogares con niños en edad escolar que no asisten a la escuela, ... (p.1)”, (DANE, 2005).

aprovecha cambios de fase en materiales (*Phase Change Materials* –PCM-), aunque enfrenta limitaciones en costos y estabilidad; y el almacenamiento termoquímico, que ofrece alta densidad energética, pero permanece en fase experimental. Entre los proyectos más destacados a nivel mundial está el proyecto *ReSlag*, financiado por el programa *H2020-WASTE* con la participación de 19 entidades de siete países europeos y Marruecos, con un presupuesto cercano a €10 millones, se enfoca en la valorización de los residuos de acería, específicamente las escorias negras, que alcanzan un volumen anual de 3 millones de toneladas, contribuyendo así al concepto de Economía Circular (CIC energi GUNE, 2019).

A principios de la década, Europa generaba 21,8 millones de toneladas de escoria, de las cuales el 24% (5,23 millones de toneladas) terminaba en vertederos. *ReSlag* propone cuatro aplicaciones tecnológicas principales, recuperación de calor residual en la industria, producción de materiales cerámicos refractarios, almacenamiento de energía térmica para plantas solares de concentración (CSP) y extracción de metales de alto valor añadido. Ha creado mapas con corrientes de residuos siderúrgicos logrando conectar compradores y vendedores, facilitando su comercialización, estas estrategias, reducen el impacto ambiental de las industrias europeas.

En Colombia, el almacenamiento térmico es el segundo mayor responsable de suplir la demanda de energía véase tabla 3, después del hidroeléctrico, con 16 plantas en funcionamiento que cubren los períodos de sequía, como durante el fenómeno del Niño. Bolívar alberga la central térmica más grande del país, representan alrededor del 30.56% de la generación de energía total producida en Colombia (Corficolombiana, 2023).

**Tabla 3**

*Centrales termoeléctricas en Colombia*

Nº	Departamento	Planta	Energético para operación	Capacidad Instalada (MW)
1	Bolívar	Candelaria (Termocandelaria)	Gas natural	1.283
2	Atlántico	Barranquilla (Tebsa)	Gas natural	918
3	Atlántico	Las Flores (Termoflores)	Gas natural	710
4	Bolívar	Caribe (Termocaribe)	GLP	400
5	Córdoba	Gecelca 3.2	Gas natural	273

6	Bolívar	Cartagena (Termocartagena)	Gas natural	208
7	Córdoba	Proeléctrica	Gas natural	198
8	Córdoba	Gecelca 3	Gas natural	164
9	La Guajira	Guajira 1	Carbón	145
10	La Guajira	Guajira 2	Carbón	145
11	Córdoba	Tesorito (Termosorito)	Gas natural	145
12	Casanare	Yopal (Termoyopal)	Gas natural	100
13	Magdalena	Norte (Termonorte)	Gas natural	93
14	Valle del Cauca	Valle (Termovalle)	Gas natural	40
15	Meta	Rubiales (TermoEBR)	Gas natural	20
16	Meta	Proyectos (Termoproyectos)	Gas natural	20
<b>Total Gas Natural</b>				<b>4.172</b>
<b>Total GLP</b>				<b>400</b>
<b>Total Carbón</b>				<b>290</b>
<b>Total</b>				<b>4.862</b>

Nota. Adaptado de López Suárez, (2022).

Durante la 11ª versión del Foro Energético de la Asociación Nacional de Empresas Generadoras ANDEG, se destacó el papel clave de las centrales térmicas en garantizar la estabilidad del sistema eléctrico colombiano, se resaltó la importancia de la planta de regasificación de Cartagena en el suministro de gas natural y la necesidad de ampliar la infraestructura energética para garantizar la seguridad del sistema.

Se subrayó el rol del Cargo por Confiabilidad,<sup>13</sup> como mecanismo de expansión del parque generador y la urgencia de asegurar nuevas fuentes de gas natural para la transición energética. Se enfatizó la relevancia de la región Caribe como epicentro de generación térmica en Colombia, albergando cerca del 60% de la capacidad térmica instalada (ANDEG, 2024). Para TEBSA, la segunda central térmica más grande de Colombia, la producción térmica es clave en la seguridad energética del país, especialmente durante fenómenos como El Niño, cuando las hidroeléctricas no pueden operar a plena capacidad. Esta central con una capacidad instalada de 960 MW, genera el 50 % de la electricidad de la región Caribe.

<sup>13</sup> “Remuneración que se paga a un agente generador por la disponibilidad de activos de generación con las características y parámetros declarados para el cálculo de la Enficc (máxima energía eléctrica que puede generar una planta)”. Es un mecanismo de mercado, que tiene como fin garantizar el suministro de energía cuando los recursos hídricos del país escasean, como consecuencia del fenómeno de El Niño. Tiene el objetivo de evitar apagones cuando los recursos hídricos de Colombia escasean (Salazar Sierra, 2023).

Su generación se basa en gas natural en lugar de combustibles líquidos, lo que reduce costos y minimiza el impacto ambiental. Dentro de los proyectos destacados en el sector térmico colombiano están las expansiones de Termovalle y Termoyopal, así como el montaje final de Termocandelaria, Tesorito y Termoeber. El país proyecta para 2030 la incorporación de 37 plantas adicionales con una capacidad de 7.353MW, reforzando la confiabilidad del sistema eléctrico (Castañeda, 2024).

En el caso de las centrales térmicas en los ingresos territoriales la transferencia es del 4%, repartida en 2.5% para protección ambiental y conservación de páramos, y 1.5% para el municipio donde opera la planta. Solo hasta un 10% de estos recursos puede usarse en gastos administrativos, debiendo priorizarse proyectos de saneamiento básico y mejoramiento ambiental, por lo que son proyectos que garantizan recursos a entes municipales y las CAR's (Ley 99, 1993). Los proyectos de generación térmica representan una estrategia de protección ante intervalos de otras fuentes de energía, adicional a esto, existen tecnologías en el territorio que se pueden implementar en estas industrias para reducir sus emisiones y aprovechar la energía residual del calor en otros procesos.

**2.1.3.1 Tecnologías de recuperación de calor.** La recuperación de calor residual en procesos industriales constituye una estrategia para maximizar la eficiencia energética y reducir los costos operativos. Aprovechar el calor residual generado por la combustión y otras actividades térmicas permite sustituir parcialmente la energía proveniente de combustibles fósiles. Estudios indican que es posible recuperar entre el 40% y el 60% de la energía contenida en fuentes de calor residual, alcanzando incluso eficiencias superiores al 95% cuando se emplean tecnologías avanzadas, como los intercambiadores de contraflujo y los recuperadores de calor regenerativos.

**Tabla 4**

*Tipos de recuperación de calor en distintas temperaturas*

<b>Alta Temperatura °C</b>	<b>Mediana Temperatura °C</b>	<b>Baja Temperatura °C</b>
Horno de fusión de aluminio 650–660°C	Humos de una caldera de vapor 230–480°C	Procesos de condensado de vapor 55–88°C
Horno de calentamiento de acero 925–1.050°C	Humos de una turbina a gas 370–540°C	Máquinas de inyección de moldes 32–88°C
Horno reverbero de cobre 900–1.100°C	Humos de un motor de combustión interna 315–600°C	Hornos de revenido 66–230°C

Horno de fundición de vidrio 1.000–1.550°C	Humos de un motor de combustión interna (turbo) 230–370°C	Compresores de aire 27–50°C
Incineradores de desechos sólidos 650–1.000°C	Horno de tratamientos térmicos 425–650°C	Hornos de secado, panadería y curado 93–230°C
Horno de refinado de níquel 1.370–1.650°C	Hornos de secado y panadería 230–600°C	Líquidos calientes procesados 32–232°C

Nota. Tomado de (p.12), Copete y Herrera, (2011).

Dichas mejoras pueden traducirse en un aumento de la eficiencia térmica del 4% al 8%, lo que resulta en ahorros energéticos sustanciales que justifican los costos de inversión, con períodos de retorno inferiores a dos años. Adicionalmente, el ahorro en combustible primario puede llegar al 40% cuando las fuentes de calor residual presentan temperaturas superiores a 300 °C (Copete y Herrera, 2011). La calidad del calor residual depende directamente de la temperatura de operación del sistema, siendo mayor el potencial de recuperación en procesos de alta temperatura, como los hornos de fusión de aluminio 650-760 °C, los hornos de calentamiento de acero 925-1.050 °C y los hornos de fundición de vidrio 1.000-1.550 °C.

Los sistemas de baja temperatura, como las máquinas de inyección de moldes 32-88 °C y los compresores de aire 27-50 °C, generan calor residual de baja calidad. Se puede recuperar mediante bombas de calor o intercambiadores específicos, pero su contribución al ahorro es limitada en comparación con los procesos de alta temperatura, el retorno de inversión en estos casos suele ser menos atractivo, ya que la eficiencia térmica lograda no compensa los costos asociados a la instalación y operación de los sistemas de recuperación.

Entre las principales áreas de aplicación de la recuperación de calor destacan el calentamiento de gases y líquidos, así como áreas más especializadas como el control de la contaminación y el precalentamiento de cargas en procesos industriales., el uso de tecnologías como bombas de calor y *heat pipes* permite optimizar el aprovechamiento del calor residual de baja temperatura, ampliando así las oportunidades de recuperación energética en distintos sectores industriales. Los principales tipos de recuperación de calor se pueden ver plasmados en la tabla 4. Dentro de estas tecnologías térmicas se resaltan los intercambiadores de calor y las bombas de calor, como aquellas con mayores impactos en la reducción de emisiones que se desarrollan brevemente a continuación.

**2.1.3.2 Intercambiadores de Calor.** Los intercambiadores de calor son dispositivos que se utilizan en la transferencia de energía térmica entre fluidos o entre una superficie sólida y fluidos. Han ganado importancia en los últimos años debido a su potencial para permitir la conversión y recuperación de energía. En Colombia, se utilizan en sectores como generación de energía, aire acondicionado, refrigeración, transporte, industrias manufactureras y combustibles alternativos (Copete y Herrera, 2011). La clasificación de los intercambiadores de calor se fundamenta en la disposición del flujo y el tipo de construcción, lo cual determina su eficiencia térmica y su aplicabilidad en distintos contextos industriales. El tipo más elemental corresponde al intercambiador de tubo concéntrico o de doble tubo, en el cual los fluidos caliente y frío se desplazan de manera paralela o en contraflujo.

Otro tipo es el arreglo de flujo paralelo, ambos fluidos ingresan por el mismo extremo del intercambiador, avanzan en la misma dirección y egresan por el mismo extremo, la aplicación, al contrario, en un esquema de flujo en contracorriente, los fluidos ingresan por extremos opuestos, se desplazan en direcciones contrarias y abandonan el sistema por extremos opuestos. Este último arreglo presenta mayores ventajas en términos de eficiencia térmica, dado que permite mantener una diferencia de temperatura promedio más alta a lo largo del intercambiador, maximizando la transferencia de calor. Los intercambiadores en contraflujo pueden alcanzar eficiencias térmicas superiores al 85%, en comparación con el 50-60% típico de los intercambiadores de flujo paralelo.

Otra configuración relevante es el intercambiador de flujo cruzado, donde el movimiento de los fluidos es perpendicular entre sí. Suelen estar provisto de aletas (*finned*) o no (*unfinned*). En las aletas, el movimiento transversal está restringido, lo que provoca variaciones de temperatura tanto en la dirección principal (x) como en la transversal (y). Los intercambiadores sin aletas permiten mayor mezcla transversal, lo que reduce la eficiencia térmica relativa. Se ha comprobado que los intercambiadores con aletas presentan coeficientes de transferencia de calor de hasta  $1000\text{W/m}^2\text{K}$ ,<sup>14</sup> mientras los intercambiadores sin aletas pueden alcanzar aproximadamente  $300\text{W/m}^2\text{K}$  (Incropera, et al., 2007).

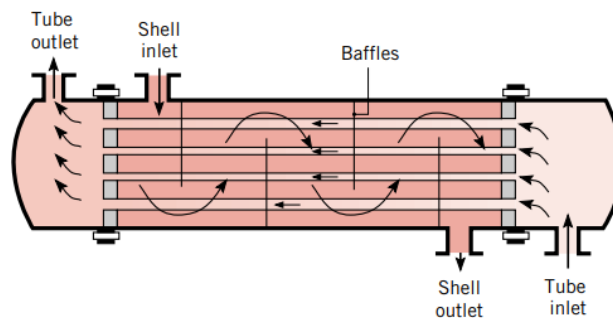
---

<sup>14</sup>  $\text{W/m}^2\text{K}$  es la unidad que mide la cantidad de calor transferido por metro cuadrado y por grado Kelvin de diferencia de temperatura. El vatio (W) representa la cantidad de energía transferida por segundo, el metro cuadrado ( $\text{m}^2$ ) mide el área sobre la cual ocurre la transferencia de calor, y el kelvin (K) indica la diferencia de temperatura entre dos superficies o fluidos. Así,  $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$  cuantifica la cantidad de calor transferido por cada metro cuadrado de área por cada grado de diferencia de temperatura entre los fluidos involucrados (Caneppele, 2021).

Una de las configuraciones industriales ampliamente utilizada es el intercambiador de calor de coraza y tubos (*shell-and-tube heat exchanger*), que permite soportar altas presiones y temperaturas uno de los tipos más utilizados y versátiles, este tipo de intercambiador es ampliamente empleado en la industria petroquímica, generación de energía y procesos industriales debido a su capacidad para manejar grandes volúmenes de fluidos a altas presiones y temperaturas. Su diseño modular permite configuraciones con múltiples pasos de tubo y carcasa, lo que incrementa su eficiencia térmica. Véase figura 10.

### Figura 10

*Intercambiador de calor tubular con un paso de coraza y un paso de tubos (modo de funcionamiento en contraflujo cruzado)*



Nota. Tomado de Incropera, et al., (p.671), (2007).

Otra razón de su relevancia es su robustez y facilidad de mantenimiento, así como la posibilidad de incorporar deflectores (*baffles*) que mejoran la turbulencia del flujo, aumentando el coeficiente de transferencia de calor. Pueden configurarse en diferentes arreglos, como uno o dos pasos en la coraza y varios pasos en los tubos, lo cual incrementa el coeficiente de transferencia de calor mediante la incorporación de deflectores que inducen turbulencia. El uso de deflectores puede incrementar el coeficiente de convección,<sup>15</sup> del lado de la coraza hasta en un 40 %, lo que resulta en un coeficiente global de transferencia de calor de alrededor de 2000-6000 W/m<sup>2</sup>K.

<sup>15</sup> El coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ) mide la tasa de transferencia de calor entre una superficie y un fluido, y depende de las condiciones de flujo y las propiedades del fluido. Se expresa como  $C_{\text{convección}} = h A (T_s - T_f)$  donde  $T_s$  es la temperatura de la superficie y  $T_f$  es la temperatura del fluido. La transferencia de calor por

Otro tipo relevante son los intercambiadores de calor compactos, que logran una elevada densidad de área de transferencia de calor (hasta  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ,<sup>16</sup> para gases y  $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$  para líquidos), gracias al uso de arreglos densos de tubos o placas aletadas. Estos dispositivos son adecuados para situaciones en las que al menos uno de los fluidos es un gas, dado que presentan coeficiente de convección relativamente bajo. El tamaño reducido de los pasos de flujo (generalmente de 5 milímetros de diámetro hidráulico) provoca un régimen de flujo laminar que maximiza el área de intercambio térmico en un volumen reducido.

Incropera, et al., (2007) destacan, que es fundamental considerar el impacto del fenómeno de ensuciamiento (*fouling*) en la eficiencia térmica de los intercambiadores debido al depósito de materiales en las superficies, como incrustaciones de sales minerales o residuos orgánicos. Complementa, Al-Haj, (2011), que este fenómeno representa una de sus principales vulnerabilidades, ya que genera costos elevados tanto en mantenimiento como en pérdida de eficiencia operativa. Los principales compuestos que causan incrustaciones incluyen carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ), óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_4$ ), dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y residuos de hidrocarburos pesados formando depósitos sólidos que reducen la transferencia de calor, lo cual incrementa el consumo energético y los costos de operación.

En las economías industrializadas, los costos derivados del ensuciamiento en intercambiadores de calor superan los \$4.400 millones usd anuales. El 15% de los costos de mantenimiento en instalaciones industriales corresponden a la limpieza y reparación de equipos afectados por incrustaciones, lo que subraya la necesidad de estrategias efectivas de mitigación y mantenimiento en estas industrias al implementarse en nuestro país.

Los intercambiadores de calor son fundamentales en la industrialización y la transición energética en Colombia, permiten optimizar el uso de la energía en sectores como generación eléctrica, transporte e industria petroquímica. Su capacidad para recuperar y transferir calor eficientemente contribuye a reducir el consumo energético y las emisiones, aspectos en sectores

---

convección está influenciada por la capa de contorno, una capa delgada de fluido que está en contacto directo con la superficie caliente o fría y se expresa en unidades de  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$  (Solidworks, 2011).

<sup>16</sup>  $\text{m}^2/\text{m}^3$ = La unidad  $\text{m}^2/\text{m}^3$  indica la superficie de transferencia de calor por volumen del intercambiador, donde  $\text{m}^2$  son metros cuadrados de área y  $\text{m}^3$  son metros cúbicos de volumen (Erica, 2024).

con altos consumos energéticos. Se presenta un caso de estudio para ejemplificar la mejora de procesos que permiten estas tecnologías.

**2.1.3.2.1 Caso estudio Cementera en Colombia.** En el estudio realizado por Robledo Gómez, (2019), se buscó determinar el potencial de cogeneración aprovechando la energía térmica que se desperdicia en una planta cementera en Colombia, señala que la energía calórica total del proceso de cemento, el calor se distribuye el 48% consumida en la producción de Clinker, el cual es un producto en forma de gránulos de 0,5 a 25 mm, de caliza, arcilla y otros componentes, producido a temperaturas de 1350 y 1450°C, estos gránulos triturados y mezclados con yeso y otros componentes permiten fabricar los distintos tipos de cementos e incluso hormigón, quedando un 52% disponible, de las cuales se estimó que el 36% era calor recuperable, principalmente en procesos de secado de materiales, generación de electricidad y el 16% restante en pérdidas térmicas (CEMEX, 2024).

Posteriormente con base en la evaluación financiera y operacional del proyecto resaltan que la implementación del sistema no solo trae beneficios ambientales sino un beneficio aproximado de US\$1.8 millones al año. En promedio entre las dos líneas de producción de la cementera, se lograrían recuperar el 71% de los gases emitidos al ambiente, por lo que este ejemplo es una estrategia adecuada para mitigar el efecto del cambio climático en una industria altamente dependiente de fósiles. Ahora se hablará de las bombas de calor sus principales características, importancia y sus tecnologías, clasificaciones y tipos, en su rol para la producción de agua sanitaria y climatización.

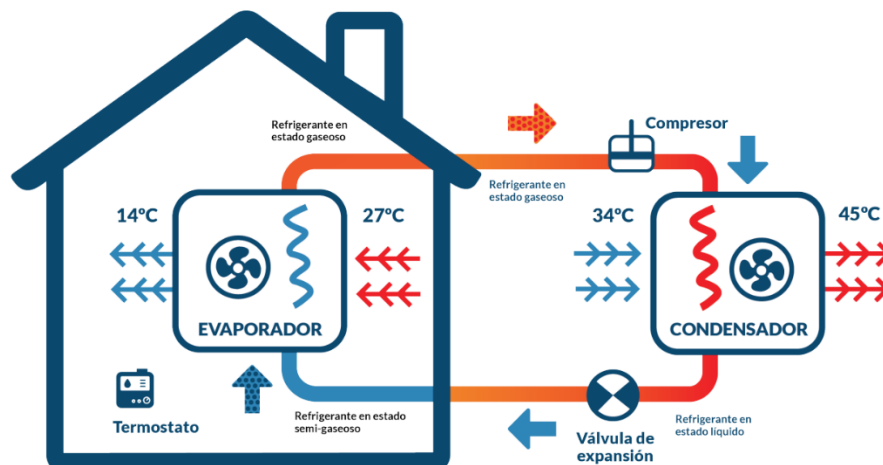
**2.1.3.3 Bombas de calor.** Son dispositivos térmicos-mecánico que transfiere calor de un lugar a otro, su nombre proviene del concepto de que estos equipos ‘bombean’ calor entre dos medios a diferentes temperaturas. proporcionando calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria (ACS), lo que las convierte en una alternativa competitiva en sectores residenciales, comerciales e industriales (NAMA, 2020). Funciona gracias segundo principio de la termodinámica o ‘Ley de la Entropía’, este principio fue formulado inicialmente en 1824, por Nicolás Léonard Sadi Carnot, pero recibió su formulación moderna en 1860, gracias a los trabajos de Rudolf Clausius y William Thomson. Establece que, en cualquier proceso espontáneo, la entropía total del universo tiende a aumentar con el tiempo.

El calor fluye espontáneamente desde un cuerpo caliente a uno frío y nunca al revés, a menos que se realice un trabajo externo para invertir el proceso. Esta irreversibilidad de los procesos naturales es fundamental en el estudio de la eficiencia de las máquinas térmicas y en la comprensión de la disipación de energía en sistemas físicos (Coluccio, 2024). Esto implica que los sistemas aislados evolucionan naturalmente hacia estados de mayor desorden o equilibrio térmico, en los cuales la energía se distribuye de manera uniforme y ya no puede realizar trabajo útil. Por sus fuentes de aprovechamiento se destacan dos tipos principales de bombas de calor, las del tipo Aero-térmicas y las Geo-térmicas.

**2.1.3.3.1 Bombas de Calor Aero-térmicas.** Captan el calor del aire exterior y son ideales para aplicaciones de pequeña y mediana escala como viviendas, locales comerciales y hostales, estas bombas constan de una unidad exterior con un compresor *Inverter* DC y un intercambiador aire-agua, y una unidad interior con un módulo hidráulico para climatización o ACS. Su bajo mantenimiento y menor carga de refrigerante reducen los riesgos de fuga y los costos operativos. Además, pueden combinarse con otros sistemas de calefacción, lo que maximiza la eficiencia energética y reduce el gasto en climatización (Arnabat, 2023).

**Figura 11**

*Proceso bomba Aero-térmica uso doméstico en modo refrigeración*



Nota. Tomado de (p.8), NAMA, (2020).

Su funcionamiento es reversible, permitiendo cambiar entre calefacción y refrigeración según la necesidad, véase figura 11. En modo calefacción, toman calor del aire exterior y lo transfieren a un circuito de agua que alimenta radiadores, suelo radiante o *fancoils*,<sup>17</sup> alcanzando temperaturas de 35°C a 45°C en invierno. En modo refrigeración, el sistema disipa el calor al aire, enfriando el agua a temperaturas de 12°C a 16°C en verano. Las tecnologías más utilizadas Aero-térmicas corresponden a equipos *Split*, bombas de calor compactas para ACS, reversibles para clima y ACS e industriales para la generación de calor.

**2.1.3.3.1.1 Equipos *Split*.** Son bombas de calor utilizadas principalmente para climatizar ambientes residenciales y, en algunos casos, comerciales. Estos dispositivos se caracterizan por ser sistemas fragmentados, ya que constan de una unidad interior instalada en el espacio a climatizar y una unidad exterior ubicada en una zona donde se realiza el intercambio de calor con el aire ambiente.

**2.1.3.3.1.2 Bombas de Calor Compactas para ACS.** Son sistemas altamente eficientes que aprovechan el calor presente en el aire para calentar agua destinada a usos domésticos, como duchas, lavado de ropa y loza. Existen tres configuraciones principales: compactas, semi-compactas y no-compactas. Las compactas integran bomba y acumulador en un solo equipo, lo que simplifica la instalación y reduce el espacio requerido. Las semi-compactas permiten separar ambos componentes, aumentando la flexibilidad de ubicación y posibilitando su uso en calefacción por loza radiante. Las no-compactas dividen el compresor y el evaporador, lo que facilita la integración con fuentes de energía renovable, como sistemas geotérmicos o solares térmicos.

**2.1.3.3.1.3 Bombas de Calor Reversibles para Clima y ACS.** Son dispositivos que permiten tanto calefacción como refrigeración, dependiendo de la demanda. Esto se logra gracias a una válvula de cuatro vías que invierte el ciclo de la bomba de calor según sea necesario. Estos equipos pueden generar agua caliente sanitaria para usos domésticos.

**2.1.3.3.1.4 Bombas de Calor Industriales para Generación de Calor.** Tienen como función principal producir agua caliente de proceso para uso industrial, alcanzando temperaturas cercanas a los 100°C. A diferencia de las bombas empleadas en aplicaciones residenciales y comerciales, estos equipos presentan mecanismos de operación más complejos para garantizar el

---

<sup>17</sup>“..., *Fancoils* es un equipo formado por un ventilador (*fan*) y una batería o un intercambiador de frío/calor (*coil*), de ahí su nombre. Se trata de equipos de climatización que utilizan agua para refrigerar o calentar, según la temperatura que tenga el agua que se le suministre,...(párr. 2)” (REHAU, 2024).

rendimiento a altas temperaturas. Sus capacidades varían ampliamente, desde potencias de 50-150kW térmicos hasta varios megavatios térmicos, lo que permite su aplicación en diversos sectores productivos.

**2.1.3.3.2 Bombas de Calor Geo-Térmicas.** Las geo-térmicas, aprovechan el calor del subsuelo y son más rentables en proyectos de gran escala o con demandas constantes de energía, como edificios de oficinas, centros comerciales y hospitales. A parte de la climatización, se emplean en procesos industriales de calentamiento de fluidos, refrigeración, congelación, secado y procesos deshumidificación, siendo las más comunes las de agua-agua (NAMA, 2020). Existen dos configuraciones principales en las geo-térmicas, las de circuito cerrado y abierto.

**2.1.3.3.2.1 Circuito Cerrado.** Utiliza una red de tuberías enterradas o sumergidas que intercambia calor mediante un fluido secundario. Las variantes incluyen:

- **Red Horizontal:** Instalación de baja profundidad (0.6-5m), de bajo costo, pero menor eficiencia.
- **Red Vertical:** Mayor profundidad (30-150m), alta eficiencia y menor espacio requerido, aunque con mayor inversión inicial.
- **Intercambiadores Sumergidos:** Aprovechan cuerpos de agua como lagos o ríos, evitando excavaciones.
- **Intercambiadores Slinky:** Tuberías en espiral que optimizan el uso del terreno, aunque aumentan los costos de instalación.
- **Sistemas Híbridos:** Combinan configuraciones anteriores o tecnologías para maximizar el rendimiento según las condiciones del lugar.

**2.1.3.3.2.2 Circuito Abierto.** Utiliza fuentes de agua superficial o subterránea directamente, aprovechando su energía térmica para calefacción o refrigeración. Son comunes en instalaciones a gran escala como hospitales o sistemas de calefacción. Estos sistemas representan oportunidades para el aprovechamiento de las energías geotérmicas, son tecnologías las cuales pueden ser utilizadas en Colombia, debido a sus costos no tan elevados, a los distintos pisos térmicos territoriales así como las tecnologías existentes lo que plantea mayor necesidad de voluntad política, en especial para las zonas de climas extremos y que se encuentran aisladas

territorialmente, dando la posibilidad de crear nuevos nichos comerciales, turísticos e industriales a regiones antes poco competitivas.

#### ***2.1.4 Almacenamiento a través de aire comprimido (CAES)***

Son una serie de tecnologías que permiten almacenar energía en forma de aire comprimido para su uso posterior, generalmente en momentos de alta demanda eléctrica. Aprovecha el principio de compresión y expansión de aire en turbinas de gas estándar, eliminando el uso de combustible para la compresión de aire y maximizando la eficiencia energética. Su funcionamiento se basa en la compresión de aire hasta unas presiones comprendidas entre los 60 y los 70 bar, y su posterior almacenado en momentos de exceso de energía eléctrica y liberándolo a través de una turbina para la generación de energía en momentos de déficit. Los sistemas CAES se clasifican en tres categorías según su gestión térmica.

1) Almacenamiento isotérmico. El aire se comprime lentamente para igualar la temperatura con el ambiente, ideal para sistemas pequeños donde la densidad de potencia no es prioritaria.

2) Almacenamiento adiabático. El calor generado durante la compresión se almacena y se reutiliza en la expansión, lo que requiere dispositivos adicionales para el almacenamiento térmico y complejiza el diseño.

3) Almacenamiento diabático. Utiliza fuentes externas para calentar o enfriar el aire, lo que permite mantener una temperatura constante del sistema. Es el tipo de sistema más implementado comercialmente debido a su alta densidad de potencia y flexibilidad operativa, aunque a costa de un mayor costo y menor eficiencia.

Los sistemas CAES se utilizan principalmente para el soporte de redes eléctricas en aplicaciones de nivelación de carga, almacenando energía en periodos de baja demanda y liberándola cuando la demanda aumenta. Los sistemas comerciales emplean cavernas subterráneas naturales como depósitos de aire, con capacidades instaladas que oscilan entre 35 y 300 MW.

##### **2.1.4.1 Proyectos CAES notables.**

**2.1.4.1.1 Planta Kraftwerk Huntorf (Alemania).** Fue la primera instalación de almacenamiento de energía en aire comprimido (CAES) del mundo, construida en 1978, por E.ON-Kraftwerk's, ubicada en Baja Sajonia, con una capacidad de 290 MW., diseñada inicialmente para servicios de arranque (back start), en centrales nucleares y suministro de potencia pico, fue

posteriormente adaptada para mejorar la estabilidad de la red ante el crecimiento de la energía eólica. Utiliza cavernas salinas de 310.000 m<sup>3</sup> con presiones operativas entre 46 y 66 bar. La compresión se realiza en dos etapas con un motor de 60 MW, mientras que la expansión consta de dos turbinas que generan hasta 320 MW durante dos horas, alcanzando una eficiencia del 42%. La planta ha demostrado alta fiabilidad con hasta 375 ciclos de compresión y 450 de expansión anuales., que comprimen aire en momentos de baja demanda y lo liberan durante picos de demanda.

**2.1.4.1.2 Planta Nengchu-1 (China).** China ha inaugurado en el año 2022, el mayor proyecto de almacenamiento de energía en aire comprimido (CAES) del mundo, desarrollado por *Zhongchu Guoneng Technology Co. (ZCGN)* en Yingcheng, Hubei. La planta, valorada en US\$207,8 millones, tiene una capacidad de 300 MW/1.800 MWh y utiliza una cueva subterránea de sal para almacenar gas (IPP Journal, 2024). Su eficiencia es del 72% y puede suministrar energía ininterrumpida hasta por seis horas, abasteciendo a 200.000-300.000 hogares en picos de demanda. Se espera que reduzca alrededor 490.000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año. El proyecto incluye servicios auxiliares para el mercado eléctrico chino y prevé una rentabilidad del 16,38% con un periodo de amortización de 7,1 años (Shaw, 2024). En Colombia, el CAES aún no está operativo a gran escala, pero su implementación sería clave para diversificar la matriz eléctrica del país en la transición energética global como estrategias alternativas a la generación eléctrica.

## 2.2 Energía Eólica

La energía eólica, utilizada desde la antigüedad en embarcaciones y molinos, ha evolucionado significativamente hasta convertirse en una de las principales fuentes de energía renovable. Incluso ha sido referenciada en obras literarias, como *Don Quijote de la Mancha* de Miguel de Cervantes. El desarrollo tecnológico permitió que, a finales del siglo XIX, se generara electricidad a partir del viento. En la actualidad, los aerogeneradores modernos convierten la energía cinética del viento en electricidad, y la energía eólica aporta aproximadamente el 5% de la electricidad mundial.

Barrero, (2024), estimó que la capacidad instalada a nivel global alcanzó los 1.017 GW, y continúa en constante crecimiento. A nivel nacional, la velocidad del viento varía diariamente debido a las diferencias de calentamiento entre tierra y mar, alcanzando picos entre las 10:00 UTC

y las 03:00 UTC. Los promedios multianuales permiten identificar patrones representativos al reducir la influencia de estos picos, las velocidades del viento presentan diferencias dependiendo de la altura a la que se midan, véase tabla 5.

**Tabla 5**

*Fuerza del Viento a 2 y 10 metros de altura regiones de Colombia año 2018*

<b>Altura (m)</b>	<b>Regiones</b>	<b>Rango de velocidad m/s</b>	<b>Principales características</b>
2	Cordilleras Central y Oriental	>3	Vientos predominantes en zonas montañosas y costeras, especialmente en el litoral Caribe y Pacífico
2	Caribe, Orinoquía, Andina	1 - 2.5	Vientos moderados en regiones planas y sectores montañosos de menor altitud
2	Amazonía	<1	Vientos débiles, especialmente en zonas bajas y selváticas
10	Mar Caribe, Norte de La Guajira	>6	Vientos fuertes, especialmente en la temporada de vientos alisios
10	Altiplano cundiboyacense, Tolima	~5	Vientos moderadamente fuertes en zonas altas y montañosas
10	Pacífica, Orinoquía, Amazonía	<3	Vientos débiles

Nota. Información del Atlas de Viento de Colombia IDEAM, (2018).

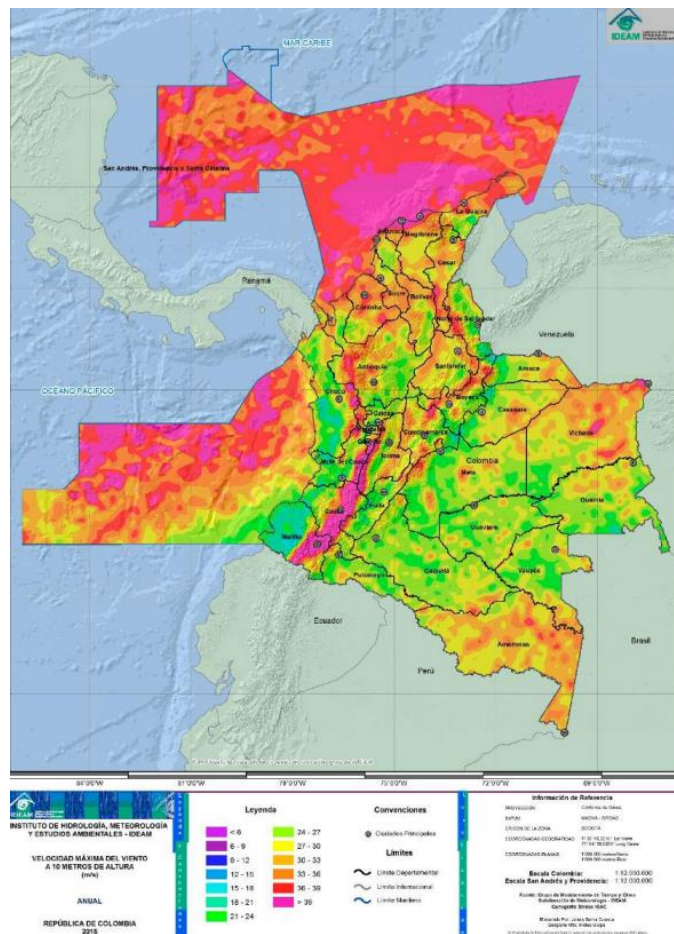
La tecnología consta principalmente en turbinas o aerogeneradores, los cuales constan de palas o aspas que se encuentran en las partes superiores del dispositivo, fabricadas en materiales livianos para poder girar con el viento, rotor, la parte que une a las palas y el buje (herramienta que facilita el giro), veleta, el equipo que permite la dirección y velocidad del viento, góndola, donde se encuentran diferentes dispositivos los cuales transforman la energía, multiplicador, que tiene la función de aumentar la velocidad del giro que llega el rotor y la torre donde se instala todo el dispositivo.

Los vientos más intensos, con velocidades superiores a 39 m/s, se presentan en las zonas montañosas más altas de los Andes, especialmente en la cordillera Central y el norte de la cordillera Occidental. También se destacan en el litoral Caribe, en el archipiélago de San Andrés y en algunas

áreas del litoral Pacífico. En la región Caribe, específicamente en Córdoba y La Guajira, se alcanzan velocidades superiores a 30 m/s, véase figura 12. La probabilidad de ocurrencia de estos vientos máximos es relativamente baja (4% - 8%) en la mayor parte del territorio nacional, en el litoral del Valle del Cauca, Casanare y Amazonas, esta probabilidad puede alcanzar el 16%. El periodo de retorno de los vientos máximos varía entre 20 y 30 años en zonas de baja elevación, mientras que en áreas montañosas ocurre con mayor frecuencia, cada 10 a 20 años.

**Figura 12**

*Mapa Fuerza máxima del viento Colombia año 2018*



Nota. Tomado de (p.56), IDEAM, (2018).

La tecnología *offshore* permite una mayor generación de energía en comparación con la *onshore*. Esto se debe a que, en las zonas marítimas, los vientos son considerablemente más rápidos que en el interior del territorio, velocidades de hasta 10 m/s,<sup>18</sup> según datos del Atlas de Vientos de Colombia. A pesar de su elevada productividad, la participación de proyectos offshore en el sector energético sigue siendo baja debido a los altos costos y la complejidad de su construcción, véase tabla 6. El comportamiento del viento en Colombia está altamente influenciado por factores geográficos y estacionales, lo que provoca variaciones significativas entre regiones a lo largo del año. En 2024, existían 74 proyectos de generación de energía eléctrica eólica registrados en el informe de generación de energía con corte al 31 de octubre (UPME, 2024). De estos, 36 se encuentran en fase 1 y 38 en fase 2. La capacidad instalada varía significativamente en cada proyecto, dependiendo del tamaño de los aerogeneradores utilizados.

**Tabla 6**

*Cantidad de Proyectos de generación de energía eólica a 31 de octubre de 2024*

Capacidad/MW. <sup>19</sup>	0-100.	100-500.	500+	Total.
<i>Off-shore.</i>	5	1	6	12
<i>On-shore.</i>	33	28	1	62
<b>Total.</b>	<b>38</b>	<b>29</b>	<b>7</b>	<b>74</b>

Nota. Datos de UPME Reg, (2024).

### **2.2.1 Proyectos de Generación de energía eléctrica: eólica**

La distribución de proyectos eólicos en el país a corte del 31 de octubre de 2024, fue de 48 en La Guajira, 6 en Atlántico, 8 en Magdalena, 5 en Cesar, 5 en Bolívar, 1 en Córdoba y 1 en Cesar. Esta concentración de proyectos en el nororiente se debe al alto potencial eólico de estos territorios. El tamaño de los aerogeneradores varía según la escala del proyecto. En Colombia, los proyectos previstos incluyen aerogeneradores tri-palas con aspas de entre 49 y 80 metros, con capacidad para generar entre 2 MW y 5,6 MW, respectivamente.

<sup>18</sup> m/s= metros por segundo.

<sup>19</sup> MV= Megavatio, 1 MW=1.000.000 de vatios.

### 2.2.2 Parques eólicos operativos

El primer parque eólico en Colombia, Jepírachi, operó desde 2004 en La Guajira con 15 generadores de 1,3 MW cada uno. Fue desarrollado por las Empresas Públicas de Medellín - E.P.M.-, pero, dejó de funcionar en octubre de 2023 debido a su incapacidad para cumplir con la normativa de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (C.R.E.G.) establecida en la Resolución 60 CREG, de 2019. Actualmente, se encuentra en proceso de desmantelamiento. En 2022, entró en operación el parque eólico Guajira 1 en Uribia, desarrollado por Isagen, con 10 aerogeneradores y una capacidad instalada de 20 MW. Posteriormente, se sumó el parque Wesp 01, con una capacidad adicional de 12 MW, alcanzando juntos 32 MW de capacidad instalada.

El parque eólico Windpeshi es un proyecto de Enel *Green Power*, que se desarrolla en el departamento de La Guajira. Este proyecto ocupará un área de 62 km<sup>2</sup> y contará con 41 aerogeneradores, con una capacidad instalada de 205 megavatios (MW). Además, incluirá un transformador de 220 megavoltamperios (MVA) y transportará la energía generada a través de una línea de alta tensión de 97 kilómetros (km), de los cuales 60 km serán construidos por Enel *Green Power* y los otros 37 km estarán a cargo de la empresa ISA.

Actualmente, existe un gran potencial para el desarrollo de la energía eólica en regiones como La Guajira y el nororiente del país, donde las condiciones de viento son óptimas y competitivas a nivel mundial. Este recurso renovable representa una oportunidad clave para diversificar la matriz energética, reducir la dependencia de fuentes fósiles y avanzar hacia un modelo más sostenible. No obstante, desafíos como los altos costos de los proyectos *offshore*, la necesidad de infraestructura avanzada y los conflictos sociales asociados a proyectos de gran escala pueden limitar su expansión.

Para maximizar este potencial, se recomienda priorizar la inversión en infraestructura que facilite la conexión de los parques eólicos a la red nacional, así como implementar incentivos fiscales que reduzcan los costos de desarrollo. Además, es fundamental fomentar la investigación local sobre tecnologías de aerogeneradores y sistemas de autogeneración, especialmente en comunidades indígenas y rurales del norte del país, que históricamente han enfrentado abandono estatal y falta de acceso a servicios básicos. Se debe promover la generación de empleo local, la implementación de programas de formación y educación en energía renovable, así como la distribución equitativa de los beneficios económicos de estos proyectos. No es aceptable que, a

pesar de la inversión en infraestructura energética, las comunidades vecinas a los parques eólicos en su mayoría marginadas y aisladas no tengan acceso a la electricidad que estos producen. Por ello, es necesario desarrollar la infraestructura que garantice el acceso a este servicio esencial, alineando la inversión en energía con principios de justicia social y ética.

En el siguiente capítulo, se explorarán aspectos esenciales de la energía solar, una de las tecnologías renovables con mayor crecimiento y avances a nivel mundial. La expansión de esta industria ha consolidado el liderazgo de ciertos países en la producción de paneles y células fotovoltaicas, lo que plantea retos para Colombia, dado que los elementos químicos necesarios para su fabricación son escasos o ‘tierras raras’. Esto genera desafíos en la implementación de estas tecnologías, requiriendo estrategias que eviten la dependencia exclusiva de importaciones, ya que, a largo plazo, esto podría resultar poco rentable y someter al país a las dinámicas de la geopolítica global, actualmente inestable.

### **2.3 Energía solar**

Se aborda el potencial y las características de la energía solar, destacando su importancia como una de las principales fuentes de energía renovable en el mundo y su creciente relevancia en Colombia. Inicialmente, se da un balance general del panorama a nivel global del comercio de los módulos fotovoltaicos se analizarán los elementos raros utilizados en la fabricación de paneles fotovoltaicos y otros materiales esenciales para la industria solar, mostrando que lugar ocupamos en este mercado global en auge y qué posibilidades hay de reindustrializar el país bajo la bandera de la transición o si solo Colombia será consumidora de tecnología en un mundo que en conjunto está comprando masivamente módulos fotovoltaicos a unos pocos protagonistas productores. Posteriormente, se presentará un panorama de los principales proyectos de generación eléctrica a partir de energía solar en el país, incluyendo algunos casos emblemáticos.

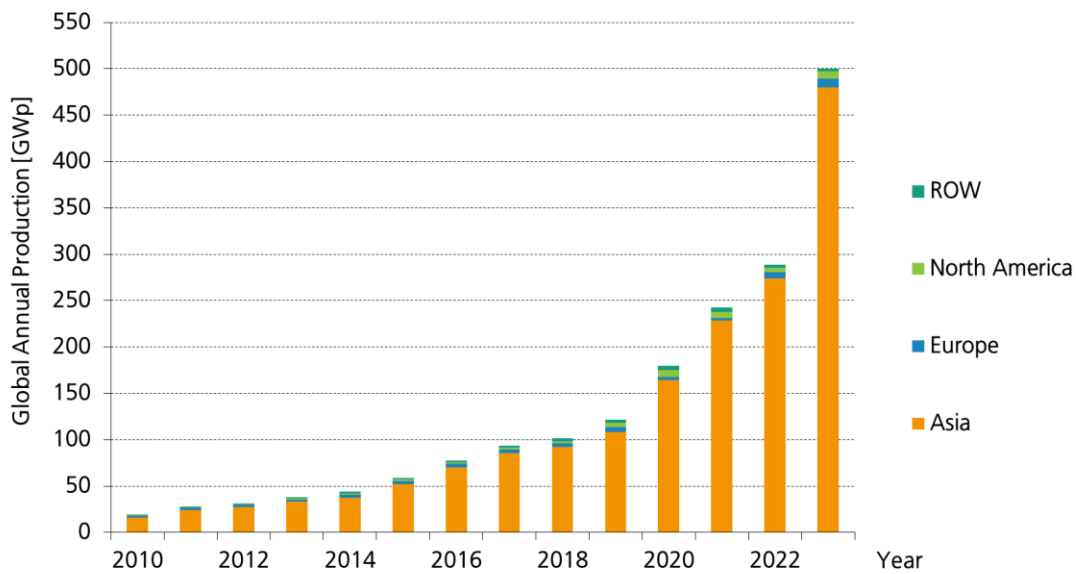
La energía solar es una fuente renovable limpia y abundante obtenida del sol, aprovechada mediante paneles solares compuestos por células fotovoltaicas, principalmente de silicio (Si). Estas células convierten la luz solar en electricidad a través del efecto fotovoltaico. Los paneles solares están compuestos por celdas o células solares, se encuentra conformado por diferentes materiales cristalinos oscuros con funciones fotovoltaicas, el vidrio templado es la capa de entre 2 a 4 milímetros que cubre los paneles actúa como aislante con color blanco distintivo, marcos de

aluminio, que mantienen unidas las partes, cajas de conexiones, con protecciones ante la humedad o polvo. Las tecnologías más recientes han alcanzado eficiencias del 26.7% en células monocristalinas y 22.3% en células policristalinas.

En 2023, la tecnología fotovoltaica basada en Si representó más del 95% de la producción total de células solares, con una participación del 84% para las celdas monocristalinas (IRENA, 2017). Durante la última década, la eficiencia de los módulos de Si ha aumentado del 15% al 20% o más, mientras que los módulos de telururo de cadmio (CdTe) han mejorado su eficiencia del 9% al 19%. El tiempo de recuperación energética de los sistemas fotovoltaicos varía según su ubicación geográfica. Fraunhofer ISE, (2024), señala que, en el norte de Europa, estos sistemas requieren aproximadamente 1.1 años para equilibrar la energía utilizada en su fabricación con la energía generada, mientras que en el sur de Europa el tiempo estimado es de 0.9 años.

**Figura 13**

*Producción de paneles solares por región del mundo año 2023*



Nota. ROW = *Rest Of the World*. Tomado de (p.12), Fraunhofer ISE, (2024).

A lo largo de su vida útil, estimada en 20 años, estos sistemas pueden generar hasta 20 veces la energía utilizada en su producción, no obstante, son vulnerables a eventos extremos climáticos como granizadas o relámpagos, por lo que sus componentes pueden terminar en el

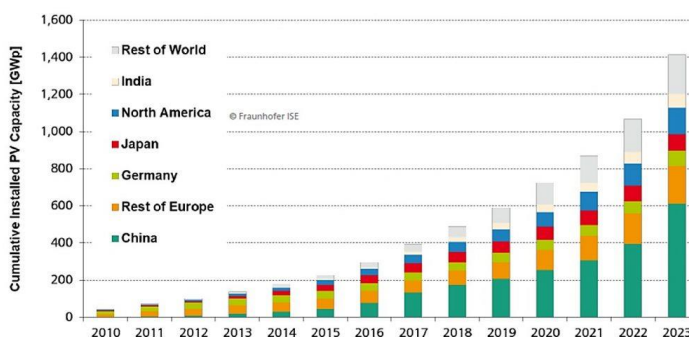
medio ambiente de manera indirecta, ocasionando contaminaciones graves y efectos nocivos y tóxicos en la fauna y flora.

La curva de aprendizaje muestra que, durante los últimos 40 años, el precio de los módulos fotovoltaicos ha disminuido en un 25% con cada duplicación de la producción global acumulada. Este descenso en los costos de producción ha favorecido la expansión de las tecnologías fotovoltaicas. No obstante, a pesar de las mejoras en eficiencia y desempeño, persisten desafíos como el agotamiento de los recursos base para la fabricación de paneles solares y el aumento en los precios, lo que ha propiciado la concentración de la producción en China principalmente y en menor medida en la Unión Europea y Estados Unidos.

En 2023, el comercio global de dispositivos fotovoltaicos alcanzó \$62,2MM,<sup>20</sup> creciendo el 16.4% frente al año anterior que fue de 55 MM, representando el 0.28% del comercio mundial. En la última década, la producción anual de módulos solares ha experimentado un crecimiento significativo, multiplicándose por 13, véase figura 13. Asía domina con una participación del 82 % en 2010, que se elevó al 93 % en 2021, para 2023, ya va alrededor del 95 % de los módulos solares y sus componentes provenientes de allí, siendo China el principal productor, con una participación del 80% en la fabricación de módulos con una capacidad instalada de alrededor de 600 GWp, para 2023, véase figura 14.

**Figura 14**

*Capacidad fotovoltaica Global instalada año 2023*



Nota. Tomado de (p.15), Fraunhofer ISE, (2024).<sup>21</sup>

<sup>20</sup> MM: Miles de Millones de dólares.

<sup>21</sup> Gigavatio pico: 1 GW = 1.000.000.000 de vatios (W). Pico (p): Se refiere a la capacidad máxima que un sistema solar puede alcanzar bajo condiciones óptimas, como una irradiación solar de 1.000 W/m<sup>2</sup> (vatios por metro cuadrado) y una temperatura de 25 °C.

China domina más del 95 % del mercado de ciertos componentes clave, como lingotes y obleas. En apenas once años, la producción anual se ha multiplicado por 9.7, consolidando el liderazgo asiático en la transición hacia las energías renovables (Fraunhofer ISE, 2024). En 2023, los principales exportadores de módulos fotovoltaicos fueron China US\$33,9MM,<sup>22</sup> Vietnam \$6,66MM, Tailandia \$4,08MM, Malasia \$3,21MM, y Camboya \$2,2MM, consolidando a Asia como el epicentro de la producción global, con más del 90 % de la cuota mundial. China, en particular, dominó el mercado con un 80 % de las exportaciones globales, reforzando su control sobre la cadena de suministro, incluidos componentes clave como celdas de Si y obleas, donde ostenta más del 95 % del mercado. Por el lado de los importadores, Estados Unidos lidera con US\$18,8MM, Brasil \$3,9MM, Países Bajos \$3,25MM, India \$3,11MM, y España \$2,74MM. lideraron la demanda, reflejando su compromiso con la transición energética.

Colombia importó US\$385 millones, en paneles solares, en el 2023 el comercio del país fue del 99.8% de origen de China creciendo inclusive un 21.3% frente al 2022 cuando se importaron US\$316 millones de esta tecnología de dicho país, Colombia no exporta ningún tipo de modulo o panel solar, por lo que los avances en energía solar dependen exclusivamente del mantenimiento y consolidación de las relaciones geopolíticas con China y de sus avances tecnológicos, lo que hace al país del café extremadamente vulnerable y dependiente del país asiático.

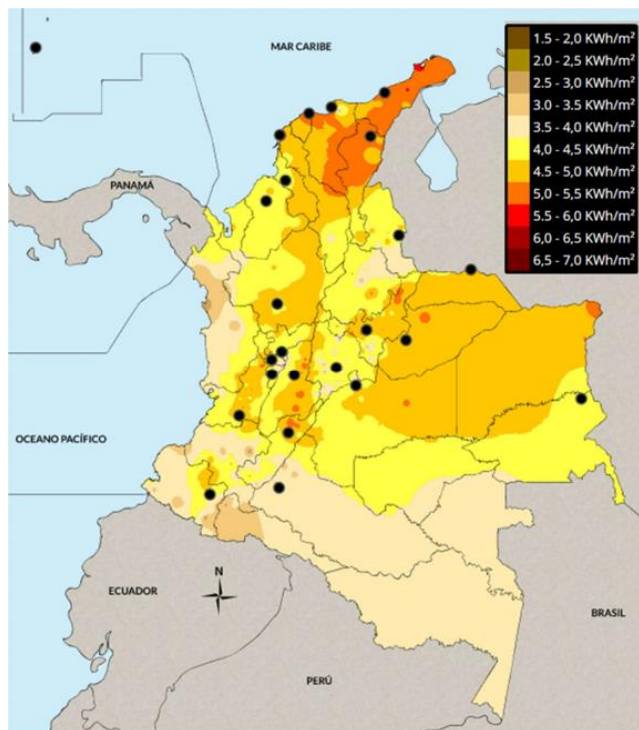
Frente a la radiación solar, en el Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica -PIEC- 2019-2023 (UPME Plan, 2023), planteó que la radiación solar promedio para la región Caribe es cercana a los 5 kWh/m<sup>2</sup>; para la región de los Llanos orientales promedia entre los 4.5 y 5 kWh/m<sup>2</sup>; para la región de la Amazonía entre los 4 y 4.5 kWh/m<sup>2</sup>; para la región andina entre los 3.5 y 4.5 kWh/m<sup>2</sup>; y para la región pacífica entre los 3.5 y 4 kWh/m<sup>2</sup>, lo que refleja al nororiente Colombiano como la zona con mayor potencial para la producción de energía solar como se puede observar en la figura 15.

### **Figura 15**

*Mapa Radiación Solar kWh/m<sup>2</sup>*

---

<sup>22</sup> MM=Miles de Millones de dólares. M= Millones de dólares. K = Miles de dólares.



Nota. kWh/m<sup>2</sup>= Kilovatio hora por metro cuadrado. Tomado de (P.35), UPME, (2023).

Bajo todo este contexto, se analizarán los principales elementos necesarios para la fabricación de paneles solares y células fotovoltaicas, dado que su disponibilidad es un factor clave para el desarrollo de la industria a nivel local. En ausencia de estos elementos o ‘tierras raras’, la producción dependería de la importación, lo que representa un desafío para países como Colombia en un contexto geopolítico global tan volátil y que se aleja del libre mercado para embarcarse en una era de proteccionismo, aranceles y deportaciones. Finalmente, se presentará un panorama del contexto nacional en cuanto a los proyectos de generación eléctrica basados en energía solar.

### ***2.3.1 Elementos o tierras ‘raras’ necesarios en la energía fotovoltaica***

La producción de paneles solares está estrechamente vinculada al uso de elementos raros de difícil obtención en la naturaleza, los cuales desempeñan un papel fundamental en la fabricación de células solares y otros componentes esenciales. Según Bleiwas (2010), los elementos clave en esta industria son el cadmio (Cd), galio (Ga), germanio (Ge), indio (In), silicio (Si) y telurio (Te). Estos materiales permiten mejorar la eficiencia y el rendimiento de las células solares al capturar diferentes longitudes de onda de luz y minimizar la recombinación de portadores de carga.

El comercio de estos elementos resulta crucial en el contexto de la transición energética, ya que su disponibilidad y acceso pueden influir directamente en la capacidad de los países para

desarrollar y expandir su infraestructura fotovoltaica. Además, la dependencia de fuentes externas plantea desafíos en términos de seguridad del suministro y volatilidad en los precios de estos materiales. Estos elementos, moléculas y tierras son estratégicos para la producción de energía solar, ya que facilitan la captura y conversión de la radiación solar en electricidad. Entre sus características destacan su alta conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión. No obstante, algunos de estos materiales presentan toxicidad ambiental, y su extracción requiere grandes extensiones de remoción de tierra, lo que genera un impacto ambiental significativo en los ecosistemas. A pesar del creciente interés en el reciclaje de estos materiales debido a su escasez, las tasas de recuperación siguen siendo bajas y concentradas en países industrializados, derivado de la necesidad de técnicas y tecnologías específicas para su posible recuperación dada temperaturas o presiones necesarios para ello.

En este contexto, se presentan cinco de los principales ‘tierras raras’ utilizadas en la industria fotovoltaica y su impacto, así como la dependencia de Colombia para su suministro de naciones extranjera y lejanas como China. La intención de ser productores de paneles solares, requiere de medidas para la obtención de los minerales que mantengan el suministro local autosuficiente para el establecimiento de industrias que puedan competir frente a países que no solo son líderes, sino que ya de tantos años siendo masivos distribuidores de paneles y módulos fotovoltaicos. Sus tecnologías e industrias son más avanzadas y han abaratado costos y mejorado procesos, lo que deja un camino difícil de competir para una posible industria local sino se impulsa con seriedad en la inversión, investigación científica, transferencia de conocimiento y promoción de lo local como estrategia industrializadora.

**2.3.1.1 Óxido de germanio  $\text{GeO}_2$  y dióxido de circonio  $\text{ZrO}_2$ .** El óxido de germanio  $\text{GeO}_2$  véase figura 16 fue descubierto en 1886 por el químico alemán Clemens Alexander Winkler, aunque el germanio (Ge) fue predicho su existencia por Dimitri Mendeléyev ya en 1869 y el dióxido de circonio  $\text{ZrO}_2$ . Véase figura 17, que fue descubierto por el químico alemán Martin Heinrich Klaproth en 1789, son materiales esenciales para mejorar la eficiencia de las tecnologías fotovoltaicas avanzadas.

### Figura 16

*Germanio GeO<sub>2</sub>*

Nota. Tomado de Bing Word Office 2021.

En particular, el Ge desempeña un papel clave en las células solares de concentración y multiunión, debido a su capacidad para absorber luz en el espectro del infrarrojo cercano, lo que permite captar longitudes de onda que otros materiales no pueden aprovechar (Reacciona Explora, 2013). Por otro lado, el Zr se emplea en los contactos metálicos de las células solares de Si cristalino debido a sus propiedades de resistencia a la corrosión y estabilidad química. Su uso optimiza el transporte de corriente y la extracción de electricidad, lo que mejora la eficiencia del sistema fotovoltaico (Haran, 2008).

**Figura 17***Circonio ZrO<sub>2</sub>*

Nota. Tomado de Bing Word Office 2021.

Dado el papel fundamental del Ge y el Zr en las tecnologías fotovoltaicas avanzadas, resulta relevante analizar los tipos de células o paneles solares en las que estos materiales son necesarios.

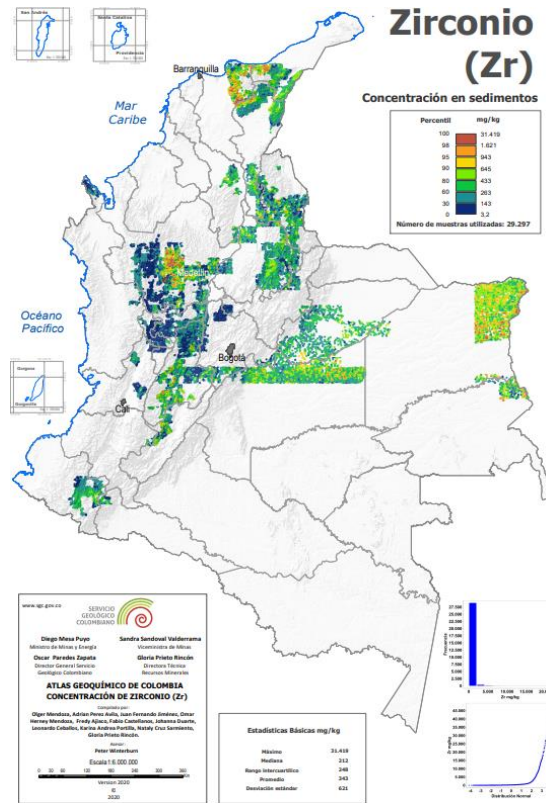
**2.3.1.1.1 Células solares de concentración.** Usan sistemas ópticos para concentrar la luz solar en áreas pequeñas de células altamente eficientes. Se aplican principalmente en plantas solares industriales, especialmente en regiones con alta radiación solar, como la planta Cerro Dominador, ubicada en el desierto de Atacama, Chile (Cerro Dominador, 2022).

**2.3.1.1.2 Células solares multiunión.** Incorporan múltiples capas de semiconductores para captar diversas longitudes de onda, maximizando la eficiencia. Debido a su alto rendimiento, se utilizan en paneles solares para satélites y en sistemas especializados, como vehículos eléctricos de alto rendimiento y misiones espaciales, incluyendo *rovers* en Marte (NASA, 2019).

Frente a la ubicación en el territorio nacional exponen Mendoza y Rincón (2020), que identificaron zonas con valores elevados y medios de zirconio principalmente en el Oriente colombiano (Vichada, Guainía, Casanare y Meta), la Sierra Nevada de Santa Marta, la Serranía de Perijá y sectores de la región andina central, así como en Acandí. En la Provincia Rio Negro – Juruena, al oriente del país, se observan concentraciones intermedias a elevadas de hasta 23.830,3 mg/kg, especialmente en el Granito de Parguaza y en depósitos en el río Vichada de zirconio. En la Guainía presenta concentraciones altas relacionadas con el Complejo Migmatítico de Mitú.

## **Figura 18**

*Concentración sedimentos Zirconio, (Zr)*



Nota. Extraído de (p.1), Mendoza y Rincón, (2020).

En Meta y Casanare, las concentraciones tienden a ser menores, con picos aislados de hasta 13.777,2 mg/kg. En la Sierra Nevada de Santa Marta, se distinguen zonas anómalas con valores elevados, alcanzando 18.058,7 mg/kg, asociados a metamorfitas Precámbricas y batolitos locales. La Serranía de Perijá presenta concentraciones menores, con valores máximos de 314 mg/kg. En la Cordillera Oriental, la tendencia es baja, predominando valores empobrecidos en zirconio, especialmente en los departamentos de Cesar, Norte de Santander, Santander, Boyacá y Cundinamarca, vinculados a sedimentitas cretácicas y metamorfitas paleozoicas. En la Cordillera Central, la tendencia varía entre zonas con valores elevados, como el Batolito Antioqueño, y áreas empobrecidas en zirconio en cuerpos ígneos intermedios y volcanoclásticos, véase figura 18.

En Quebradagrande, en Antioquia, Caldas, Risaralda y Quindío, muestra tendencia homogénea y baja, con valores alrededor de 180 mg/kg. En el sur del país, en Putumayo y Nariño, se observan concentraciones bajas, con media de 54,96 mg/kg, asociadas a metavulcanitas y sedimentitas cretácicas. En el Caribe (Acandí), también presenta valores empobrecidos, mientras

que la Cordillera Occidental predominan concentraciones bajas, con algunos picos locales. Finalmente, en La Guajira, los valores son heterogéneos, con concentraciones máximas de 6.307,9 mg/kg en plutonitas y esquistos del suroeste (Mendoza y Rincón, 2020).

Por el lado comercial, en 2023, el comercio global de  $\text{GeO}_2$  y  $\text{ZrO}_2$  alcanzó los US\$393 M.,<sup>23</sup> lo que representó una caída del 15.9% frente al 2022 cuando se comercializó 467 M. Los principales exportadores en 2023 fueron China \$156M, Japón \$69,9M, Estados Unidos \$34,6M, Reino Unido \$28,4M, y Francia \$26,7M. Por otro lado, los principales importadores fueron Estados Unidos \$51,5M, Alemania \$41,5M, Corea del Sur \$39,7M, India \$30M, y Japón \$29, 3M. siendo las principales potencias industriales del mundo las mayores participaciones del mercado global. En cuanto a Colombia, el país importó en 2023 el 50.2% de los \$316.000 totales que comercializó de  $\text{GeO}_2$  y  $\text{ZrO}_2$  desde China, luego Alemania y en menor medida países como Corea del sur, Francia y Estados Unidos. Actualmente, Colombia no registra exportaciones significativas de estos compuestos químicos, por lo que se considera un país netamente importador (OEC Ge y Zr, 2024).

**2.3.1.2 Dióxido de Silicio  $\text{SiO}_2$ .** La sílice se conoce desde la antigüedad, pero, no fue reportado como elemento químico hasta 1824 por Jöns Jacob Berzelius en Suecia, el dióxido de silicio  $\text{SiO}_2$  es un compuesto de silicio (Si) y oxígeno (O), llamado comúnmente sílice, se encuentra en forma de arena, cuarzo, sílice y otros minerales de Si, desempeña un papel fundamental en la producción de energía fotovoltaica debido a sus propiedades semiconductoras y su capacidad para convertir la luz solar en electricidad (Reacciona Explora, 2013).

La *Deutsche Welle* –DW- (2023) resalta el preocupante hecho de que a nivel global el consumo de arena va a un ritmo desproporcionado, se estima que se necesitan alrededor de 50.000 millones de toneladas de arena al año a nivel mundial, equivalente a aproximadamente 17 kilogramos por persona al día, para mantener los niveles actuales de producción. Esta demanda voraz supera con creces la capacidad de recuperación natural de este recurso vital, sumiendo el mundo en una situación desafiante con consecuencias irremediables para el presente y el futuro

---

<sup>23</sup> M = Millones de dólares.

En el sector fotovoltaico se utiliza principalmente en la fabricación de células solares de Si monocristalino, policristalino y amorfo, las cuales son las más comunes en los paneles solares comerciales. Una capa delgada de  $\text{SiO}_2$  se aplica sobre la superficie de las células solares como material antirreflejante, lo que reduce la pérdida de luz reflejada y mejora la eficiencia de conversión.

**2.3.1.2.1 Los paneles solares monocristalinos.** Tienen un rendimiento en laboratorio de 24% y un rendimiento directo que varía entre el 15% y el 18%. Estos paneles se fabrican con Si puro fundido y dopado con boro (B),<sup>24</sup> lo que los hace ideales para aplicaciones residenciales y comerciales que requieren alta eficiencia. Sin embargo, son más costosos en comparación con otros tipos de paneles.

**2.3.1.2.2 Los paneles solares policristalinos.** Presentan un rendimiento en laboratorio de entre 19% y 20% y un rendimiento directo que oscila entre 12% y 14%. Su fabricación es similar a la de los paneles monocristalinos, pero con menos fases de cristalización, lo que reduce su costo por kWp.<sup>25</sup> Estos paneles son más económicos y se utilizan comúnmente en aplicaciones residenciales y comerciales.

**2.3.1.2.3 Los paneles de silicio amorfo.** Presentan un rendimiento en laboratorio del 16% y un rendimiento directo inferior al 10%. Se fabrican depositando una capa delgada de Si sobre un sustrato flexible. Debido a su menor eficiencia, se utilizan principalmente en aplicaciones de baja potencia, como cargadores solares portátiles y luces solares de jardín. En términos de eficiencia, el Instituto Fraunhofer ISE, (2024), reporta que las celdas de Si monocristalino alcanzan una eficiencia récord del 26.7%, mientras que las de Si policristalino logran un 24.4%, siendo un nivel comercialmente aceptable y de los más altos del mercado. En 2023, el  $\text{SiO}_2$  fue comercializado por un total de \$3,42 MM,<sup>26</sup> siendo exportado principalmente por China \$854M, Alemania \$561M, Japón \$290M, Estados Unidos \$259M, y Francia \$188M.

---

<sup>24</sup> Dopado de Boro. Proceso que utiliza sobre materiales, como el Si, el diamante, entre otros, para mejorar su conductividad u otras propiedades, se utiliza elementos como el boro (B) para introducir impurezas en los materiales cristalinos, porque se difunde a una velocidad que permite controlar fácilmente la profundidad, este proceso es fundamental en la industria de los conductores, semiconductores y circuitos integrados.

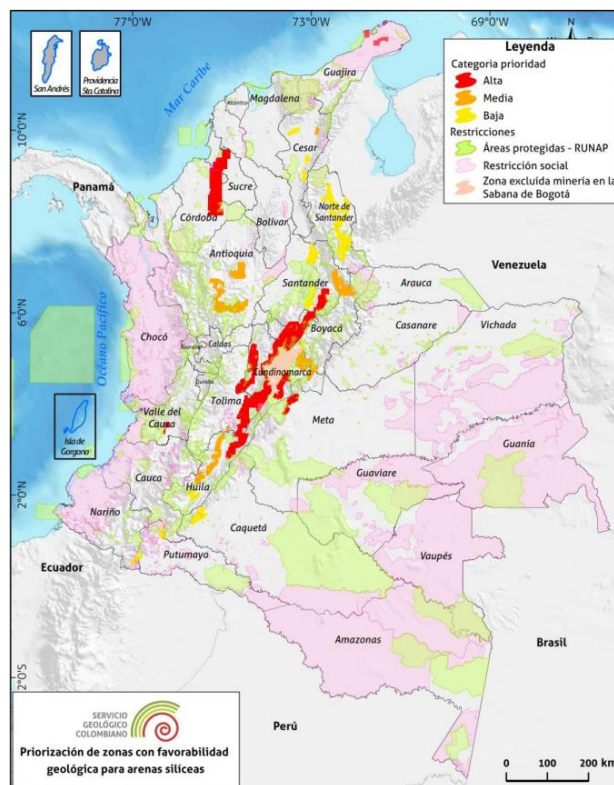
<sup>25</sup> kWp (kilovatio pico): Unidad que mide la potencia máxima de un sistema fotovoltaico en condiciones ideales de radiación solar ( $1.000 \text{ W/m}^2$ ).

<sup>26</sup> MM= Miles de Millones de dólares. M=Millones de dólares.

Por otro lado, los principales importadores fueron Estados Unidos \$220M, China \$200M, Alemania \$196M., Francia \$172M., y Japón \$161M. Colombia exportó \$526,000 usd de SiO<sub>2</sub> en 2023. Los principales destinos de las exportaciones fueron Nicaragua 32.8% de la participación, con \$172,000, seguido de Ecuador \$115.000, Venezuela \$84,000, Costa Rica \$63.000 y Guatemala \$31.400. En cuanto a las importaciones, Colombia adquirió \$20.7 M. en SiO<sub>2</sub> en 2023 sus orígenes fueron Estados Unidos 43.6% de la cuota, totalizando \$9.04 M, Brasil \$4.65 M. seguido por China \$3.77 M., Alemania \$1.13 M. y Japón \$794,000 (OEC, 2024). Esto implica que Colombia importa 39.3 veces más SiO<sub>2</sub> de lo que exporta, lo que la hace dependiente de las principales potencias del mundo para garantizar el suministro de este material. Dicha dependencia está vinculada al actual orden geopolítico global, que se estructura como un sistema multipolar y volátil.

### Figura 19

*Mapa de zonas con favorabilidad geológica para arenas silíceas*



Nota. Tomado de (p.65), UPME Anexo 4, (2024).

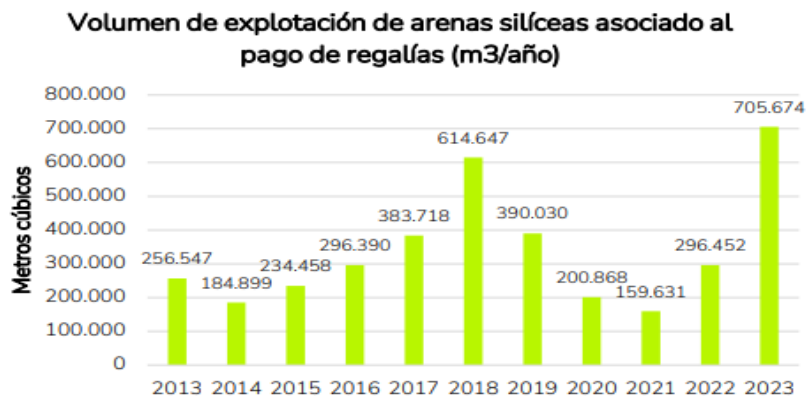
El SiO<sub>2</sub> es un insumo estratégico para el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas, un componente clave en la transición energética de países como Colombia. De acuerdo con el visor geográfico del Sistema Integral de Gestión Minera - Anna Minería (UPME Anexo 4, 2024). Para el 31 de octubre de 2024, existían 932 títulos mineros vigentes relacionados con arenas silíceas, que abarcan aproximadamente 234.752 hectáreas, véase figura 19.

Entre 2013 y 2023, la producción de arenas silíceas estuvo en promedio en el orden de los 338.400 metros cúbicos al año, se produce principalmente para el consumo nacional en vidrios, construcción e infraestructura, véase figura 20. La mayoría de estos títulos corresponden a pequeña minería (52%) y mediana minería (22%), distribuyéndose principalmente en la etapa de explotación (86%), mientras que el resto se encuentra en construcción y montaje (5%) o en exploración (9%). Colombia, gracias a su ubicación geológica en la intersección de las placas tectónicas de Nazca, Caribe y Sudamericana, cuenta con depósitos de arenas silíceas de alta pureza en diversas regiones.

Entre las más destacadas se encuentra la Cordillera Oriental, donde las formaciones de areniscas cuarzosas presentan elevadas concentraciones de SiO<sub>2</sub>. Asimismo, en los departamentos de Antioquia y Valle del Cauca existen amplias llanuras sedimentarias que contienen yacimientos significativos de arenas silíceas, producto de procesos fluviales, eólicos y sedimentarios que han favorecido su acumulación y preservación (UPME Anexo 4, 2024).

## Figura 20

*Volumen de explotación de arenas silíceas asociado al pago de regalías*



Nota. Tomado de UPME Anexo 4 (P.68.), (2024).

Se debe aprovechar los recursos naturales, como la arena y el cuarzo, para desarrollar capacidades que permitan extraer y procesar  $\text{SiO}_2$  de alta pureza, sin comprometer la salud de nuestros ríos y afluentes. Esto requiere una inversión en infraestructura tecnológica, la formación de talento especializado y la creación de alianzas internacionales que faciliten la transferencia de conocimiento. Es fundamental implementar políticas para las prácticas sostenibles que aseguren un suministro competitivo y responsable, respaldando así la transición energética, pues nuestras playas, lechos de los ríos y afluentes, son también territorios que hay que proteger de las nuevas necesidades de las nuevas tendencias globales.

**2.3.1.3 El cadmio, (Cd).** A principios del siglo XIX, el óxido de zinc se obtenía mediante el calentamiento del carbonato de zinc, conocido como ‘cadmia’ en latín. En ocasiones, se obtenía una sustancia amarilla en lugar del compuesto blanco, lo que llevó al profesor Friedrich Stromeyer a deducir la presencia de un elemento desconocido. En 1817, Stromeyer aisló este elemento y lo nombró cadmio, véase figura 21. El Cd es un metal tóxico y bio-acumulable. El primer caso documentado de intoxicación masiva por Cd ocurrió en la cuenca del río *Jinzu*, en Japón, entre 1910-1960, la contaminación por Cd de las compañías mineras se acumuló en el agua y el lecho del río, lo que provocó que el metal fuera absorbido por las plantaciones de arroz.

### Figura 21

*Cadmio, (Cd)*



Nota. Tomado de Bing Word Office 2021.

Esto causó el debilitamiento de los huesos y problemas renales en la población local, lo que dio lugar a la enfermedad conocida como ‘*itai-itai*’ (‘¡ay, ay!’ en japonés), inspirada en los gritos de dolor, el riñón es el órgano críticamente afectado después de la exposición a largo plazo al Cd. Se ha encontrado disfunción tubular proximal (DTR) entre los habitantes de la cuenca del río Jinzu, atendándose 19 mujeres y un hombre entre el año 2000 y 2008, demostrando los efectos ambientales negativos que trasciende generaciones (Aoshima, 2012).

El Cd a pesar de su toxicidad se usa para la fabricación de baterías recargables (Ni-Cd), en aditivos para productos como el plástico o vidrio para evitar la corrosión, el estereato de Cd que les da estabilidad a los materiales de policloruro de vinilo –PVC-, también se utiliza en aleaciones de bajo punto de fusión (Mendoza, et al., 2020). El Cd juega un papel crucial en la tecnología fotovoltaica, una de las principales razones por las que el Cd es importante es su alta capacidad de absorción de luz solar. Especialmente en la fabricación de células solares de película delgada basadas en telururo de cadmio (CdTe) y sulfuro de cadmio (CdS), debido a su naturaleza dúctil, semiconductor transforma la luz solar en electricidad además de resistencia a la corrosión, es similar al zinc.

Estas células solares son más flexibles y ligeras que las convencionales de Si, lo que las hace adecuadas para aplicaciones versátiles, como la integración en edificios y dispositivos portátiles, en baterías como las de Níquel-Cadmio poseen bajo punto de fusión por lo que el Cd también es utilizado en soldaduras, su capacidad para absorber neutrones hace que sea empleado en las barras de control de los reactores nucleares, contribuyendo a evitar la reacción en cadena, así como en procesos de electrolisis y producción de plástico, por lo que sus usos van más allá de la energía fotovoltaica. Los paneles solares fabricados con CdTe son más eficientes en términos de costes que los basados en Si.

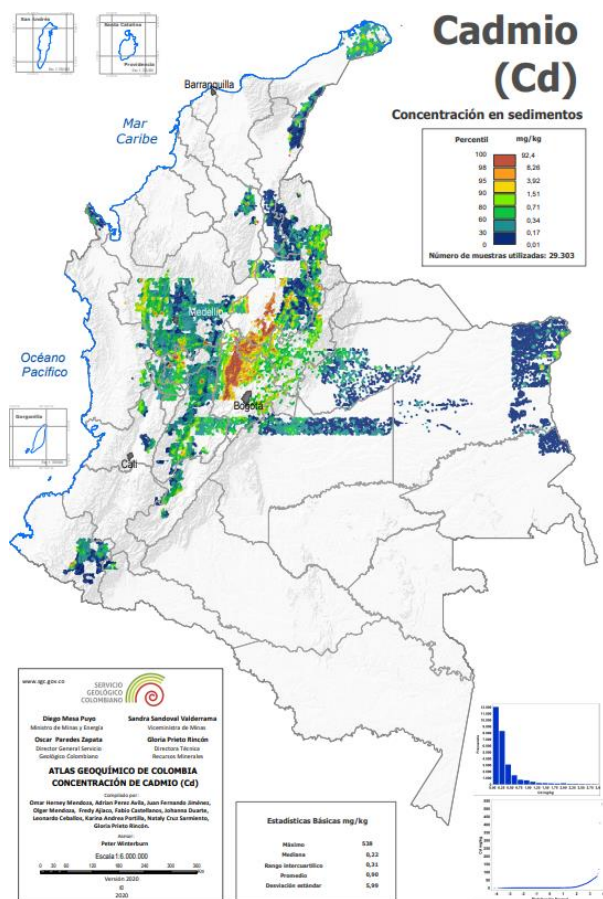
**2.3.1.3.1 Las células solares de telururo de cadmio (CdTe).** Estas células tienen un rango de eficiencia de entre el 9% y el 11%, aunque se ha logrado un rendimiento de hasta el 18.7%. El principal inconveniente de los paneles de CdTe es su contenido de Cd, y su baja eficiencia en condiciones de luz solar indirecta debido a su sensibilidad a la luz azul. A pesar de estos inconvenientes, las células de CdTe siguen siendo ampliamente utilizadas en países como Estados Unidos donde representan casi el 21% de la cuota de mercado y el 4% a nivel mundial debido a su alta eficiencia y costos relativamente bajos de producción (SETO, 2024).

**2.3.1.3.2 Células solares de sulfuro de cadmio (CdS).** El sulfuro de Cadmio (CdS) permite poseer en las células propiedades optoelectrónicas superiores. La transparencia óptica de la película se puede controlar fácilmente mediante la variación del espesor. Por lo que tienen una fuerte absorción óptica, suelen tener una eficiencia menor que los paneles solares convencionales, que varía entre el 6% y el 16.5% (Kapadnis, et al., 2020). Aunque su eficiencia es inferior a la de las células de CdTe, las células de CdS se destacan por su capacidad para absorber una amplia gama de longitudes de onda, lo que las hace efectivas en condiciones de baja luminosidad y altas temperaturas. Su bajo costo de fabricación es otra ventaja significativa, aunque su eficiencia limitada sigue siendo una de sus principales desventajas.

Desde su ubicación en el territorio nacional, la concentración de Cd se distribuye de manera desigual, dividiéndose en tres áreas principales: en territorio Chibcha, la Cordillera Central y la Cordillera Occidental. El territorio Chibcha, que cubre gran parte del centro del país, presenta las concentraciones más altas, especialmente en zonas como Santander, Boyacá y Cundinamarca, con valores superiores al percentil 98 (8,26 mg/kg). Este patrón está asociado a formaciones geológicas del Mesozoico y Cenozoico, caracterizadas por sedimentos calcáreos y rocas metamórficas que favorecen la acumulación de metales pesados. Además, en esta región se observa una fuerte correlación con otros metales como el zinc (Zn), el arsénico (As) y el plomo (Pb), lo que sugiere una posible relación con actividades extractivas, particularmente minería (Mendoza, et al., 2020).

## **Figura 22**

*Concentraciones de sedimentos Cadmio (Cd) año 2020*



Nota. Extraído de (p.1) Mendoza, et al., (2020).

En varias regiones, como la provincia Río Negro-Juruena y algunos departamentos como Vichada, Casanare y Meta, se observan concentraciones bajas a moderadas, aunque en algunos puntos puntuales se superan los percentiles altos, relacionados con afloramientos magmáticos. En la zona occidental de la Cordillera Oriental, asociadas a rocas sedimentarias del Mesozoico y Cenozoico. En otras zonas del país, como el Tahamí en el Departamento de La Guajira, se observa una ligera abundancia de Cd con valores inferiores al percentil 80 (0,71 mg/kg), para más observe la figura 22.

En 2023, el Cd se comercializó a nivel mundial por un total de US\$85.7 M.,<sup>27</sup> las exportaciones crecieron un 35.5% en comparación con 2022. Los principales exportadores fueron Corea del Sur \$18,9 M., China \$16,1M, Kazajistán \$11M, Canadá \$8,53M, y Japón \$6,89M. En

<sup>27</sup> M= Millones de dólares.

cuanto a los importadores, India fue el mayor receptor con 44.3 M. seguida por China 15 M., Letonia \$4,04M., Francia \$3,84M., y Hong Kong \$3,74M. Colombia importó US\$27.2 mil de Cd en 2023, principalmente en un 99.2% de Estados Unidos, sin exportar Cd de manera significativa (OEC Cadmio, 2024).

Para un país como Colombia, es fundamental invertir en investigación y desarrollo de alternativas más seguras y sostenibles al Cd en la fabricación de paneles solares. Esto implica fortalecer las capacidades de investigación científicas y tecnológicas, fomentar alianzas internacionales en innovación y establecer políticas públicas que promuevan el uso de materiales menos tóxicos. Además, es imperativo implementar regulaciones ambientales rigurosas que mitiguen los riesgos asociados al uso de elementos peligrosos, como el Cd. Estas regulaciones podrían incluir límites en la importación de módulos fotovoltaicos que contengan Cd, asegurando que su concentración no supere umbrales que representen un riesgo para la salud humana o el medio ambiente.

**2.3.1.4 Indio (In).** Fue descubierto en 1863, por Ferdinand Reich y Hieronymous Richter, en la Escuela de Minas de *Freiberg*, Alemania, mientras investigaban la blenda de zinc (Mmta, 2024). Su rareza en la corteza terrestre, con una abundancia de aproximadamente 0.1 partes por millón, hacen a este metal el 69° más abundante en la corteza terrestre por lo que es muy raro encontrarlo de forma natural, aunque se encuentra principalmente como un subproducto en la fundición de plomo (Pb) y zinc (Zn).

El indio (In) es un metal plateado, véase figura 23, suave y altamente dúctil, lo que lo hace inusual entre los metales. Es un excelente conductor eléctrico, con un punto de fusión relativamente bajo de 156.6 °C, se adhiere firmemente al vidrio y posee una notable transparencia en capas delgadas. Su resistencia a la corrosión y su capacidad de formar aleaciones útiles lo hacen valioso en la industria electrónica y de pantallas se utiliza en la producción de diodos emisores de luz (LED) y pantallas OLED, que son más eficientes energéticamente que las tecnologías anteriores, como las pantallas LCD (Connor, 2020). Una gran cantidad de In se recicla en países como China, Japón y Corea del Sur a través de procesos como la pulverización catódica<sup>28</sup> de óxido

---

<sup>28</sup> La pulverización catódica es una técnica de deposición de película fina, realizada en una cámara de vacío, en la que los átomos o iones de un material objetivo son expulsados de un objetivo sólido y depositados sobre un sustrato

de indio y estaño  $\text{In}_2\text{O}_5\text{Sn}$  (ITO), este proceso ha permitido, cuando los precios del In suben, recuperar el elemento de paneles LCD desechados (MMTA, 2024).

### Figura 23

*Indio (In)*



Nota. Tomado de Bing Word Office 2021.

El auge de las tecnologías de quinta generación (5G),<sup>29</sup> ha seguido aumentando la demanda de In. Los sustratos basados en In se utilizan en redes de telecomunicaciones de fibra óptica 5G, donde los láseres y receptores de In envían datos a través de líneas de fibra óptica, lo que permite una menor latencia, menor pérdida de señal y mayores velocidades (USGS, 2024). La principal célula solar que requiere de este elemento es las CIGS ( $\text{CuInGaSe}_2$ ), un material semiconductor compuesto de Cobre (Cu), indio (In), Galio (Ga) y Selenio (Se).

**2.3.1.4.1 Las células solares (CIGS).** Compuestas por telurio de indio, seleniuro de cobre y galio, estas son una tecnología fotovoltaica de capa delgada con eficiencias que varían entre el 15% y el 22%, lo que las hace competitivas con otras tecnologías solares. Estas células tienen la ventaja de poder fabricarse en sustratos flexibles como plástico o láminas delgadas de metal, lo que las hace aptas para aplicaciones en superficies curvas o irregulares.

---

(objeto que recibe el material) para formar una capa fina. Este proceso es esencial en la industria fotovoltaica, de sensores, decorativos entre otros, (Korvus Technology, 2022).

<sup>29</sup> 5G = La quinta generación de redes móviles, que ofrece mayor velocidad, menor latencia y mayor capacidad que tecnologías anteriores. Soporta más dispositivos conectados, impulsando el *IoT*, la automatización y aplicaciones como la realidad aumentada o IA superiores. Utiliza un espectro más amplio, incluyendo bandas de alta frecuencia para transmisiones rápidas, (Amazon, 2024).

Las eficiencias de estas celdas varían según el sustrato utilizado: alcanzan hasta un 22,9% en vidrio, 17,7% en acero, 16,2% en aluminio y 20,4% en polímero. Las celdas CIGS también requieren menos material que las celdas solares de Si, lo que reduce los costos de producción. A pesar de su bajo costo, enfrentan desafíos en cuanto a estabilidad a largo plazo y una fuerte competencia con tecnologías más establecidas (HISOUR, 2018).

En 2022, China lideró la producción mundial de In con 650 ton.,<sup>30</sup> seguida por Corea del Sur con 200 ton., en un total global de 990 ton. El In aumentó 620 CNY/Kg<sup>31</sup> o 30.92% desde principios de 2024 (USGS, 2024). Los futuros están disponibles para negociar en el Mercado de Metales de Shanghái (SMM). Históricamente, el precio del In alcanzó un máximo de 3075 CNY/kg (US\$423.53), entre mayo y Julio de 2024 viene en descenso estando actualmente a 5 de diciembre de 2024 en 2575 CNY/kg (US\$354.81) (Trading Economics In, 2024).

Colombia tiene limitaciones serias en el acceso al In, dado que es principalmente extraído como subproducto en países como China y Corea del Sur; el país depende de estos mercados globales, donde el precio y la oferta son altamente volátiles ya que en esos territorios hay muchos competidores tecnológicos como Malasia, Taiwán o Japón que por cercanía y disponibilidad absorben la oferta de los principales productores en el auge de las telecomunicaciones 5G. Esta situación resalta la necesidad de estrategias nacionales para diversificar fuentes de suministro, explorar opciones de reciclaje y fomentar la inversión en innovación tecnológica para asegurar un acceso estable, reduciendo así la vulnerabilidad a las fluctuaciones del mercado internacional.

**2.3.1.5 Telurio Te.** El telurio (Te) véase figura 24, descubierto en 1782 por Franz-Joseph Müller Von Reichenstein, es un elemento raro en la corteza terrestre con una abundancia de solo 1 µg/kg,<sup>32</sup> comparable con el platino. El Te se encuentra en su forma nativa y como telururos de oro, como calaverita y krennerita (polimorfos de AuTe<sub>2</sub>), petzita, Ag<sub>3</sub>AuTe<sub>2</sub> y silvinita, AgAuTe<sub>4</sub>. El Te es un elemento relativamente estable, insoluble en agua (Rock Identifier, 2024).

Hoy en día, el Te tiene aplicaciones fundamentales en la tecnología moderna se emplea en la industria de semiconductores, detectores de rayos X, dispositivos termoeléctricos, y chips de memoria, especialmente en la energía solar, donde se utiliza en la fabricación de paneles solares de telururo de cadmio (CdTe), que tienen altas eficiencias de conversión. Según el Servicio

---

<sup>30</sup> Ton= Toneladas.

<sup>31</sup> CNY/Kg= yuanes chinos por kilogramo.

<sup>32</sup> 1 µg/kg = microgramo por kilogramo de materia de la corteza terrestre.

Geológico de Estados Unidos, Alrededor del 40% del consumo global de Te se destina a la producción de energía solar, un 30% a la producción termoeléctrica y un 15% a la metalurgia y el restante en otros sectores. La demanda de Te sigue en aumento, impulsada por su uso en tecnologías emergentes y la creciente producción de energía solar (USGS Te, 2023).

### **Figura 24**

*Telurio (Te)*



Nota. Tomado de Bing Word Office 2021.

Los principales productores de Te son Suecia, Japón, Rusia, China, Estados Unidos y Perú. Los futuros de Te se negocian en el Mercado de Metales de Shanghái. A finales de 2023, el precio se situó en \$564,86 CNY/kg (US\$78,79), mientras que el 5 de diciembre de 2024 alcanzó los \$655 CNY/kg (US\$90,22). El precio máximo histórico fue de \$780 CNY/kg (US\$07,44) entre el 2 y el 14 de agosto de 2024, y el mínimo registrado fue de \$330 CNY/kg (\$US46,01) en enero de 2020, se espera un crecimiento del precio a nivel general debido a la creciente demanda impulsada por tecnologías emergentes (Trading Economics Te, 2024).

Colombia tiene una significativa dependencia internacional para acceder al Te. Aunque este mineral se encuentra principalmente en países como China, Japón y Rusia, la oferta global es volátil debido a su limitada disponibilidad, regiones como la Unión Europea y países asiáticos ejercen presión sobre la oferta de este recurso. Lo anterior subraya la necesidad de que Colombia diversifique sus fuentes de suministro y explore alternativas locales o alianzas estratégicas, con el fin de reducir su vulnerabilidad frente a las fluctuaciones del mercado internacional. Una vez conociendo los principales elementos necesarios y que se deben tener en cuenta tanto por sus condiciones de escasez o 'rareza' sino además por su impacto en el medio ambiente, en ese sentido

teniendo de presente los distintos tipos de paneles solares se ofrece un análisis nacional de producción eléctrica con base en esta energía.

### 2.3.2 Proyectos de Generación de energía eléctrica: Solar

De un total de 1120 proyectos registrados en la UPME a nivel nacional, 419 de ellos se encuentran en el nororiente colombiano, siendo el Cesar, la Guajira y Santander véase Tabla 7, aquellos departamentos con el mayor número de proyectos con una capacidad instalada que supera los 100 MW. Al comparar la capacidad instalada de los proyectos solares con la de los eólicos, se puede ver una notable diferencia. Si bien los promedios de la capacidad instalada de los proyectos solares son menores que en las tecnologías eólicas, los menores costos permiten compensar esta capacidad por medio de una cantidad mucho mayor de proyectos.

**Tabla 7**

*Proyectos Generación de electricidad proveniente de la Energía Solar registrados en UPME nororiente colombiano a 31 oct-2024*

<b>Dto./MW</b>	<b>0-10.</b>	<b>10-100.</b>	<b>100+.</b>	<b>Total.</b>
Atlántico	63	17	5	85
Santander	34	23	7	64
Norte de Santander	23	6	1	30
Bolívar	50	18	1	69
Magdalena	16	8	0	24
Cesar	17	41	13	71
La Guajira	2	9	8	19
Arauca	4	1	0	5
Boyacá	23	20	4	47
Casanare	13	2	0	17
<b>Total</b>	<b>245</b>	<b>145</b>	<b>39</b>	<b>419</b>

Nota. Datos de UPME Reg, (2024).

Actualmente, Colombia cuenta con importantes avances en energía solar, que ocupa el segundo lugar entre las fuentes renovables. Entre estos proyectos se destacan 3 debido a su tamaño.

**2.3.2.1 Parque Solar La Unión (Córdoba).** Inaugurado en septiembre de 2024 con una inversión de más de US\$200 millones, este parque tiene 221,000 paneles en 230 hectáreas y una capacidad de 100 MW. Abastece las necesidades energéticas de 172,000 hogares (600,000 personas) y evita 168,000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año, equivalente a 16.8 millones de árboles. Durante su construcción se vincularon 1.276 empleados al proyecto, dando prioridad a las comunidades del área de influencia, con un total de 648 personas, de las cuales 170 son mujeres (Colorado, 2024).

**2.3.2.2 Parque Solar El Paso (Cesar).** Aunque inaugurado en 2019, inició operaciones comerciales en marzo de 2024 tras una ampliación en 2023 Enel *Green Power*, aportando 67,92 MW de capacidad efectiva neta al sistema eléctrico del país. Con 274,320 paneles en 240 hectáreas y 99 MW de capacidad máxima, genera 203.5 GWh/año, suficiente para 290,000 personas (Enel, 2024).

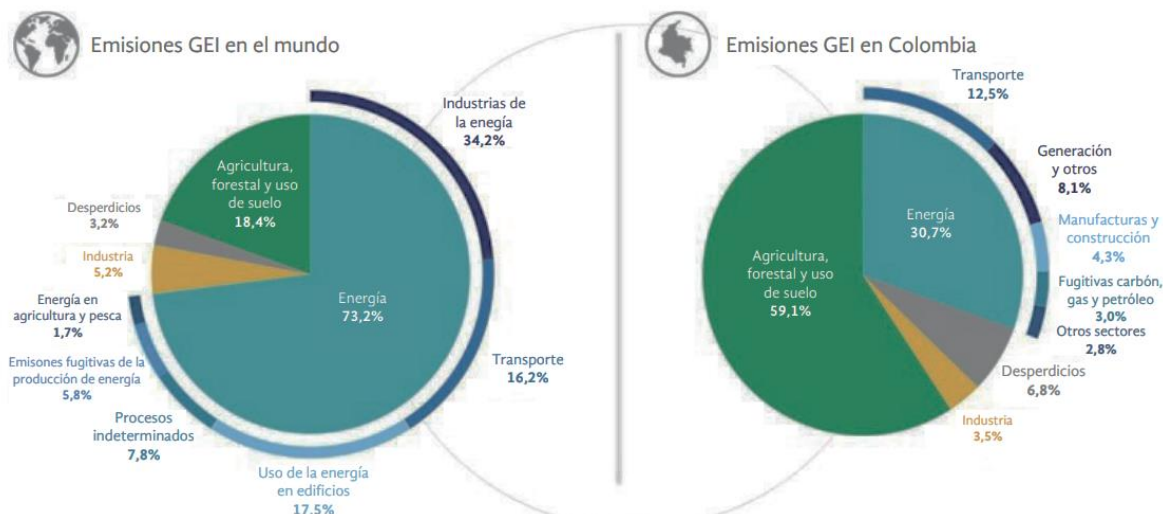
**2.3.2.3 Parque Solar Fundación (Magdalena).** Operativo desde junio de 2024, este parque de 90 MW, con 244,800 paneles en un terreno de 237 hectáreas y una inversión de US\$109 millones, genera 267GWh/año, cubriendo la demanda de 380,000 personas. Además, creó más de 1.500 empleos durante su construcción y operación (Enel, 2023). En este contexto, Colombia, aunque es un gran importador y usuario de estas tecnologías, está progresando en proyectos de gran envergadura que están diversificando la oferta eléctrica del país desde las renovables, gracias a su enorme potencial para la generación de energía solar debido a sus condiciones geográficas y territoriales, pero, la dependencia de los mercados internacionales en el mediano y largo plazo puede ser perjudicial. Esto pone de manifiesto la necesidad de la transferencia de conocimiento, fortalecer las capacidades nacionales en el diseño, producción y mantenimiento de sistemas solares, así como en el desarrollo de cadenas de suministro locales y regionales, para que la transición energética y las transformaciones diversificadoras de la matriz energética vayan de la mano con la industrialización del país.

## **2.4 La Biomasa**

La biomasa, considerada una fuente de energía renovable, proviene de procesos naturales como la fotosíntesis y está compuesta principalmente por carbono (C), oxígeno (O) e hidrógeno (H), elementos que almacenan energía de manera natural. La principal fuente de biomasa aprovechable o residual tiene origen en la producción agrícola y pecuaria, así como de los residuos sólidos de disposición final.

### **Figura 25**

*Emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) año 2021*



Nota. Tomado (p.4), CREE, (2023).

Estos se desagregan a continuación con el fin de resaltar la gran oportunidad que existe actualmente para expandir los sistemas agropecuarios, especialmente a través de aprovechamiento de residuos, diversidad de especies entre otras posibles estrategias, para reducir su impacto medioambiental pues la producción agropecuaria es la de las mayores causantes a nivel nacional de emisiones de efecto invernadero G.E.I. véase figura 25, luego estaría el sector energías, a diferencia de como ocurre en el resto del mundo donde son las energías las mayores contaminantes, lo que refleja un panorama de interés si se desean lograr cambios objetivos en Colombia siendo el agro un eje para ello.

#### 2.4.1 Producción Agrícola

La producción agrícola en Colombia, además de ser un pilar fundamental para la seguridad alimentaria, representa una de las principales fuentes de biomasa aprovechable para la transición energética, pero, también es uno de los mayores emisores de contaminantes de Colombia. En el informe de IDEAM-2, (2022), resaltan que este sector ha mostrado un incremento significativo en las emisiones GEI durante el período 1990-2018, principalmente debido a la gestión de suelos y el uso de fertilizantes sintéticos. Las principales fuentes de emisiones agrícolas corresponden a las emisiones directas 60,47% e indirectas 28,17% de óxido nítrico ( $N_2O$ ) derivadas de suelos gestionados.

Las emisiones provenientes de la quema de biomasa alcanzan el 4,33% de las fuentes agregadas, destacándose la quema en tierras forestales. En cuanto a las tierras de cultivo, se

observan dos categorías principales: cultivos permanentes y tierras convertidas en cultivos. Los cultivos permanentes, como el café y la palma de aceite, han aumentado su potencial de captura de CO<sub>2</sub> eq., con el café liderando en absorciones en un 69,24%. No obstante, la conversión de bosques naturales a tierras agrícolas sigue representando una fuente significativa de emisiones, aunque con una tendencia descendente en los últimos años.

El cultivo de arroz aporta el 8,70% de las emisiones, destacándose el sistema de arroz riego como el principal emisor de metano (CH<sub>4</sub>) por descomposición anaeróbica del material orgánico en arrozales inundados. Pese al impacto ambiental, los acuerdos de cero deforestaciones y la implementación de sistemas agroforestales han permitido mejorar la captura de carbono y mitigar las emisiones en ciertos cultivos estratégicos.

El panorama del sector durante el primer semestre de 2024, mostraron en las áreas sembradas y cosechadas variaciones significativas, según el reporte de UPRA Base Agrícola, (2024), se sembraron un total de 1.247.498 hectáreas, lo que refleja una reducción del 2,1 % en comparación con 2023. Entre los cultivos más destacados se encuentran el arroz (493.932 ha., +6,4 %) y las hortalizas (73.163 ha., +1,6 %), mientras que otros, como el maíz (-8,8 %) y la yuca (-7,7 %), registraron disminuciones. En términos de grupos de cultivos, los cereales, raíces y tubérculos dominaron las áreas sembradas, aunque algunos, como las leguminosas (-6,4 %) y las oleaginosas (-14,8 %), presentaron caídas significativas. Respecto a las áreas cosechadas, se reportaron 7.021.673 hectáreas, con un rendimiento promedio de 9,89 toneladas por hectárea, reflejando un crecimiento del 1,1 % en comparación con 2023. Sobresalieron las raíces y tubérculos, con 3.851.737 toneladas (14,5 %), y las hortalizas, con 1.556.786 toneladas (2,9 %), siendo el tomate el cultivo de mayor rendimiento (59,24 toneladas por hectárea). Ciertos cultivos, como las leguminosas (-24,6 %) y la arveja (-41,1 %), registraron disminuciones significativas tanto en producción como en rendimiento (UPRA, 2024).

A pesar de las variaciones en las áreas sembradas y cosechadas durante el primer semestre de 2024, cultivos como el arroz, las hortalizas, el maíz y las oleaginosas generaron residuos que, en lugar de ser desechados, habrían podido convertirse en insumos clave para la generación de energía renovable. Aunque algunas empresas, especialmente en el sector alimenticio como los ingenios azucareros, ya están aprovechando sus residuos y desechos en procesos de cogeneración

ya sea de calor o directamente de energía eléctrica, aún se requieren mayores esfuerzos para maximizar su impacto en emisiones en un sector comunitario y popular.

#### **2.4.2 Producción Pecuaria**

El sector pecuario en Colombia desempeña un papel fundamental en la economía y el desarrollo rural del país, el objetivo principal de este sector dentro de la transición energética, está vinculado a su papel en la bioenergía y reducción de emisiones. Señala Ortiz, (1999), que los bovinos fueron introducidos a América por los conquistadores españoles en 1493, es decir, antes no había ganado en este lado del mundo, pues bien exponía Pinto, (2013), que gran parte de la dieta occidental que hoy prevalece fue traída e importada desde Europa y Asia, a medida que los flujos migratorios fueron extinguiendo y destruyendo los legados de los pueblos originarios de las llamadas ‘Indias Occidentales’ ya sea por la fuerza o por intermediación de plagas y pestes a los cuales los nativos no tenían defensas naturales.

Estos pueblos poseían otras formas de alimentación, que incluían insectos, una gran variedad de granos y hortalizas, así como animales de selva, lo que representa una clara disparidad entre lo que se comía en Europa y lo que había disponible en America, cuestiones que con los cambios poblaciones que redujo a los nativos a sus mínimas expresiones, produjo que en su mayoría se asimiló la dieta y los alimentos del viejo mundo como propios y las costumbres indígenas fueron olvidadas y solo viven hoy día en algunas tribus aisladas.

Complementa Márquez, (2024), que la entrada de bovinos fue impulsada por Marcelo Villalobos a través de Venezuela y en los Llanos y Santanderes, en esa misma senda expone Vásquez, (2009), que fueron los hermanos Heredia en la costa Atlántica y Alonso Luis de Lugo en el Cesar y Santander, por lo que la influencia bovina en el nororiente del país es casi un símbolo de identidad territorial, heredado desde los primeros animales traídos de Europa, véase figura 26.

#### **Figura 26**

*Rutas llegadas de ganados españoles durante la conquista española*



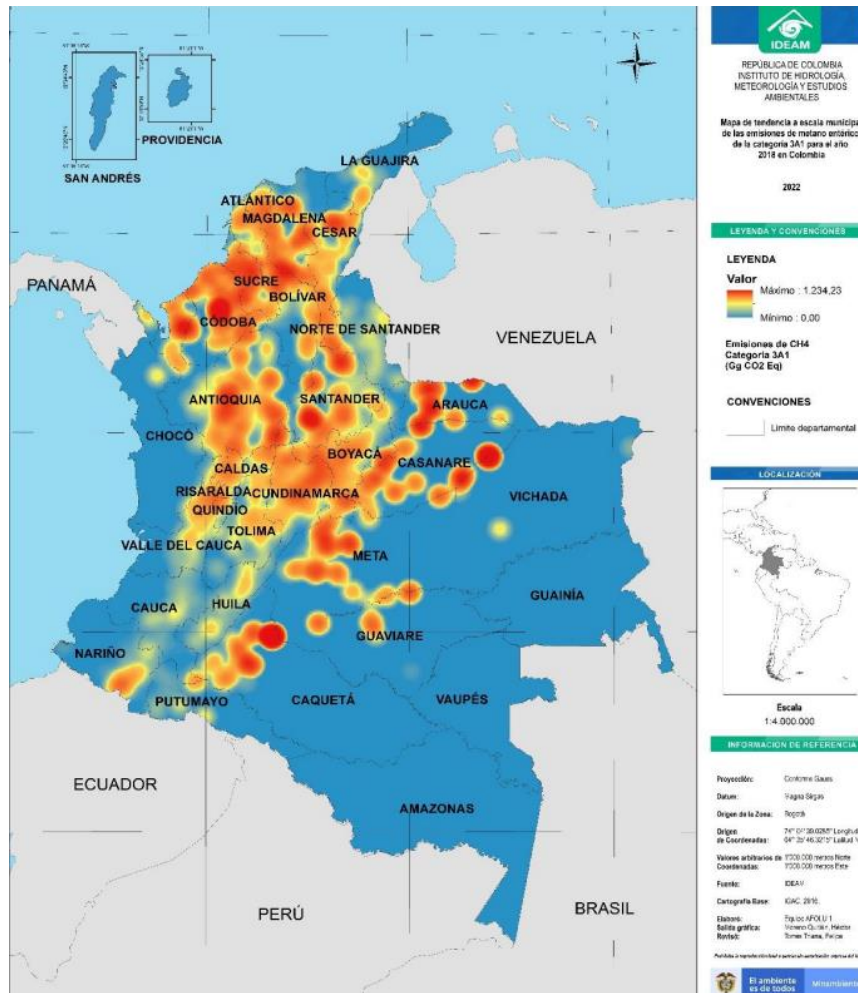
Nota. Extraído de (p.6), Vásquez, et al., (2006).

Cabe resaltar que el sector pecuario es señalado como uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero (G.E.I.) a nivel global. Constituye una fuente relevante de emisiones de GEI, representando el 79,70% de las emisiones del sector agropecuario. Las principales fuentes de estas emisiones provienen de la fermentación entérica y la gestión del estiércol, siendo la fermentación entérica la mayor contribuyente con un 74,95% del total pecuario entre 1990-2018.

La especie que presenta las mayores emisiones de CH<sub>4</sub> y de N<sub>2</sub>O directo en promedio es la especie porcina (36,51%), seguida por los bovinos (28,01%) y las aves (22,04%), especialmente en animales de engorde y vacas de producción de carne. La gestión del estiércol ha mostrado un incremento del 24,54% en la última década, impulsado por el aumento en la población de porcinos y aves, debido al crecimiento en el consumo de carne y huevo (IDEAM-2, 2022). En este sentido, Colombia, al poseer uno de los hatos ganaderos más grandes del mundo, enfrenta un desafío significativo en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), siendo la fermentación entérica la principal fuente de estas emisiones, siendo las regiones andina y caribe, las más afectadas véase figura 27.

**Figura 27**

*Emisiones de Metano CH<sub>4</sub> entérico producido ganado bovino Colombia años 1990- 2018*



Nota. Tomado de (p.308), IDEAM-2, (2022).

Por ello, implementar estrategias sostenibles y fomentar la diversidad pecuaria no solo reduciría la huella ambiental del sector, sino que también generaría impactos positivos en la economía rural. En este proceso, el campesinado emerge como un actor clave, protagonista de los cambios necesarios para avanzar hacia una ganadería más sostenible y resiliente. En 2024, Colombia poseía el 12.º hato bovino mundial y el 5.º en América, representando el 26 % del PIB agropecuario en 2023 y empleando a 634 mil personas (BBVA, 2024). En 2024, el país registró

29.2 millones de bovinos en 615,072 fincas, con Antioquia liderando con 3.1 millones de cabezas (ICA, 2024).

El nororiente colombiano alberga el 41.81 % del inventario bovino con 12.2 millones de cabezas en 236,649 predios. Santander tiene el mayor número de predios (41,961) y Boyacá la mayor proporción de predios ganaderos (13.61%). En 2023 se sacrificaron 2.9 millones de bovinos a nivel nacional, lo que resalta la necesidad de modernizar la cadena de producción y procesamiento para reducir desperdicios, mejorar la trazabilidad y maximizar el aprovechamiento de subproductos desarrollando sistemas de biogás y bio-fertilizantes, fortaleciendo posibles economías circulares.

El búfalo es una alternativa al bovino por su eficiencia y resistencia. Introducido en 1960 por el extinto Instituto Colombiano de la Reforma Agraria –INCORA-, se ha adaptado exitosamente (Buelvas, 2024). En 2023, Colombia registró 485,141 búfalos, un aumento del 7.38% respecto a 2022, distribuidos en 6,033 predios. Córdoba lidera con 89,408 búfalos, seguido de Santander (68,440) y Antioquia (59,905). El nororiente concentra el 49.22% del inventario, con Puerto Wilches como el segundo municipio con mayor cantidad de búfalos (22,849, 14.11% del total nacional) (Eastman, 2023). La promoción de esta especie podría integrarse en estrategias de diversificación pecuaria para mejorar la competitividad del sector impulsando nuevas cadenas de valor, fortaleciendo la industria láctea y cárnica y promoviendo modelos productivos resilientes al cambio climático.

Las cabras representan una opción sostenible por su baja emisión GEI y eficiencia alimenticia. En 2023, Colombia contó con 1,155,721 caprinos, concentrados en un 95.72 % en el nororiente del país, con La Guajira como el departamento líder (900,448) y Uribe con la mayor población caprina municipal (503,148). La cultura Wayuu ha integrado la cabra en su sistema de pastoreo, en Santander, la cabra santandereana es altamente valorada por su carne y leche (Bustamante, 2019).

Su crianza a gran escala podría representar una oportunidad para el desarrollo de cadenas de valor más sostenibles y eficientes, favorecería la generación de empleo y el fortalecimiento de la economía rural, integrando las comunidades aisladas de grupos étnicos e indígenas en un modelo agropecuario más sostenible teniendo de presente las tradiciones y técnicas ancestrales que han

permitido el sostenimiento de esta actividad pecuaria en la región en terrenos tan áridos y desérticos.

El sector pecuario equino en 2024, se posicionó como el noveno país con mayor población equina a nivel mundial, registrando 1,482,286 unidades, lo que representa una disminución del 6.29 % respecto a 2023. Antioquia lideró con 255,370 equinos, seguida por Córdoba, Cauca, Cundinamarca y Bolívar, que en conjunto concentraron el 44.52 % del inventario nacional (Echeverri, 2023). Estos animales no solo tienen un valor cultural y económico, sino que también ofrecen una oportunidad para la sostenibilidad: sus residuos pueden ser transformados en biomasa y biogás, contribuyendo a la generación de energía y apoyando los objetivos de transición energética y reducción de emisiones del país.

Es necesario fortalecer la tecnificación rural con acceso a tecnologías de biogás y capacitación para pequeños y medianos productores. El desarrollo de infraestructuras para la recolección y aprovechamiento de estos residuos podría generar nuevos empleos e impulsar la reindustrialización del sector. El apoyo estatal en prevención de plagas, diversidad genética, mercados, centros de acopio, mejora de dietas y reforestación en territorios ganaderos es necesario para lograr una transformación rural que devore nuestros bosques y selvas. La adopción de especies de menor impacto ambiental, como búfalos y caprinos, contribuirá a la preservación de recursos naturales y la reducción del impacto ambiental del sector pecuario, diversificando sus posibilidades en el mercado de alimentos y derivados.

#### ***2.4.3 Producción de Residuos Sólidos de Disposición Final***

La gestión sostenible de los residuos sólidos de disposición final es un componente clave en la transición hacia un modelo energético más eficiente y sostenible. Su aprovechamiento no solo contribuye a la reducción del impacto ambiental, sino que también impulsa la reindustrialización mediante la valorización de desechos. Este análisis examina la importancia de los procesos de reciclaje, reúso y reutilización, centrándose en los desafíos asociados con la infraestructura de disposición, las desigualdades regionales, las consecuencias de las prácticas no autorizadas y lo fragmentado del marco regulatorio.

Según la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2023), Colombia produjo 11.98 millones de toneladas de residuos sólidos en 2022, lo que representó un incremento del

0.26% con respecto a 2021. De este total, el 98.11% fue gestionado en sitios autorizados, mientras que el 1.89% se destinó a sistemas no autorizados, como botaderos a cielo abierto.

**Tabla 8**

*Disposición final 2022 por Departamentos del Nororiente Colombiano*

<b>Departamento</b>	<b>Promedio Ton/Día 2021</b>	<b>Promedio Ton/Día 2022</b>	<b>Porcentaje De Cambio</b>	<b>%Autorizado</b>
Atlántico	2669,14	2 715,81	1,75%	100%
Bolívar	1921,34	2 026,39	5,47%	63.04%
Santander	1637,65	1 448,42	-11,55%	94,25%
Norte de Santander	1095,45	1 094,74	-0,06%	100,00%
Magdalena	972,22	1 527,18	57,08%	80.00%
Cesar	885,18	861,04	-2,73%	100,00%
La Guajira	553,07	510,83	-7,64%	93,33%
Boyacá	529,6	601,73	13,62%	100,00%
Casanare	225,14	249,3	10,73%	100,00%
Arauca	162	118,41	-26,91%	100,00%
<b>Total Nororiente</b>	<b>10650,79.</b>	<b>11153,85</b>	<b>3.97%</b>	<b>98,45%</b>
<b>Total Nacional</b>	<b>33968,59</b>	<b>34.556,31</b>	<b>1.73%</b>	<b>87.30%</b>

Nota. Datos Superintendencia Servicios Públicos Domiciliarios, (2023).<sup>33</sup>

En el nororiente colombiano, como se visualiza en la Tabla 8, generó el 32.28% de los residuos del país, con los departamentos de Atlántico, Bolívar y Magdalena destacándose por sus altas tasas de generación y deficiencias en la disposición adecuada. En Bolívar, por ejemplo, solo el 63.04% de los residuos fueron manejados en sitios autorizados, lo que resalta la urgencia de fortalecer la infraestructura y las políticas públicas en estas regiones para garantizar un manejo más sostenible de los residuos.

Este escenario resalta la necesidad de integrar estrategias efectivas para la valorización de los residuos, en particular, los residuos de aparatos tecnológicos y dispositivos electrónicos que contienen elementos valiosos y estratégicos para la transición energética como plata (Ag), oro (Au), cobre (Cu), paladio (Pd) y estaño (Sn), los cuales pueden ser recuperados y reintegrados en

<sup>33</sup> Número de municipios por departamento que poseen disposición final autorizada ya sea en botadero a cielo abierto, celda de contingencia, celda transitoria, relleno sanitario. Entre menos municipios sin sitios de disposición final menor desempeño.

la industria, reduciendo la necesidad de extracción de nuevos materiales y minimizando el impacto ambiental. Además, estos desechos informáticos suelen incluir elementos clasificados como ‘tierras raras’, esenciales para la fabricación de dispositivos modernos. Entre ellos destacan el neodimio (Nd), disprosio (Dy), terbio (Tb), Galio (Ga), Silicio (Si), lantano (La) y praseodimio (Pr), utilizados en la producción de imanes, baterías y pantallas, por lo que su recuperación es clave en un mundo digital como el de hoy día.

El informe de Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, (2023), también evidencia una distribución desigual de la infraestructura para la disposición final de residuos en Colombia. A nivel nacional, existen 160 rellenos sanitarios, 79 botaderos a cielo abierto, 13 celdas de contingencia y 10 celdas transitorias, con una mayor concentración de sitios autorizados en el centro del país. En contraste, regiones como la Caribe y la Pacífica enfrentan deficiencias significativas. Chocó, por ejemplo, cuenta con 25 municipios que aún disponen sus residuos en botaderos a cielo abierto, seguido por Bolívar con 17 municipios y Magdalena con 6, lo que resalta las marcadas desigualdades en la capacidad de gestión de residuos en el territorio nacional.

Entre los sitios críticos de disposición final de residuos en Colombia, uno de los casos más alarmantes es el relleno sanitario El Carrasco, ubicado en Bucaramanga, Santander. En operación desde 1994, este sitio continúa funcionando a pesar de una orden de cierre emitida en 2011 debido a la falta de alternativas viables para su reemplazo. En 2022, El Carrasco atendió la disposición de residuos de 10 municipios de Santander, gestionando un total de 37,215.31 toneladas anuales, con un promedio diario de 102.18 toneladas. Aunque la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) aprobó los diseños para su clausura, la infraestructura sustitutiva aún no ha sido implementada, lo que ha generado numerosas denuncias por sus impactos ambientales y los riesgos que representa para la salud pública. A nivel nacional, los tres sitios regionales que atienden el mayor número de municipios son:

- Relleno Sanitario Parque Ambiental Pírgua (Tunja, Boyacá). Atiende 109 municipios y recibe un volumen de 432.36 toneladas diarias.
- Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo (Boyacá, Cundinamarca). Gestiona residuos de 79 municipios, con un flujo diario de 1,688.25 toneladas.

- Relleno Sanitario La Pradera (Don Matías, Antioquia). Recibe los desechos de 49 municipios, con una disposición diaria de 3,305.98 toneladas.

La regulación del sector de disposición final de residuos en Colombia está estructurada a través de diversas normativas que establecen directrices técnicas y operativas. La Resolución 1390 de 2005 Min. Ambiente, define los lineamientos para el cierre, clausura y restauración de sitios de disposición final que no cumplen con las exigencias normativas. Posteriormente, la Resolución 1274 de 2006 Min. Ambiente, introduce los términos de referencia para la construcción y operación de rellenos sanitarios, con el objetivo de garantizar estándares ambientales adecuados.

La gestión de sitios no autorizados se aborda en la Resolución 1684 de 2008 Min. Ambiente, la cual modifica parcialmente disposiciones previas y establece pautas para la regulación de celdas transitorias. En esta línea, la Resolución 1822 de 2009 Min. Ambiente, refuerza las condiciones para la transición de celdas transitorias a sistemas autorizados de disposición final. Complementariamente, la Resolución 1529 de 2010 Min. Ambiente, introduce parámetros adicionales para la gestión de estas infraestructuras. La Resolución 1890 Min. Ambiente de 2011, establece la posibilidad de integrar celdas transitorias dentro de proyectos de rellenos sanitarios como parte de los planes de contingencia municipales. Finalmente, el Decreto 1077 de 2015, consolida las disposiciones generales sobre la gestión técnica, ambiental y operativa de los rellenos sanitarios en el país.

Aunque estas normativas buscan garantizar una gestión adecuada de los residuos sólidos, su enfoque fragmentado y la falta de una implementación uniforme han limitado su efectividad. Persisten problemas críticos como la insuficiencia de infraestructura, el uso de sitios no autorizados y la ausencia de mecanismos de monitoreo y cumplimiento estrictos. Esto evidencia la necesidad de una reforma integral y más coordinada en la regulación del sector, que contemple la creación de un estatuto o código que unifique la legislación existente en materia de residuos sólidos actualizando las normativas a los nuevos propósitos de la transición energética que convierta los residuos en nuevos materiales o cogeneración de energía eléctrica. La consolidación de un marco normativo único permitiría actualizar y armonizar las diferentes disposiciones vigentes tanto locales, departamentales con las nacionales, asegurando su aplicación efectiva y homogénea a nivel general, lo que requiere la intervención del poder legislativo.

La integración intensiva de las tres R (Reducir, Reutilizar y Reciclar) en las políticas y prácticas de gestión de residuos es esencial para avanzar hacia un modelo de economía circular. La reducción en la generación de residuos mediante la optimización de procesos productivos y cambios en los patrones de consumo debe ser una prioridad desde todos los sectores, para poder alcanzar las metas ambientales. Para ello, es fundamental establecer controles desde el origen, incentivar a la población a adoptar prácticas de reciclaje obligatorias responsabilidad de los alcaldes municipales y diseñar mecanismos de estímulos y subvenciones que fomenten estos comportamientos. A continuación de hablará acerca de los proyectos de biomasa, así como sus variaciones con base en los principales recursos de biomasa aprovechados.

#### ***2.4.4 Proyectos de Generación de Energía Eléctrica en Colombia de Biomasa***

En Colombia, la generación de electricidad a partir de biomasa está respaldada por 32 proyectos registrados, que en conjunto suman una potencia instalada de 399.3 MW. Estos proyectos emplean distintos recursos, como biogás, bagazo, residuos agrícolas, residuos sólidos urbanos y cultivos energéticos, los cuales permiten el aprovechamiento energético de la biomasa. Para la conversión de biomasa en electricidad, se utilizan tres principales tecnologías.

**2.4.4.1 Cogeneración.** Permite la producción simultánea de electricidad y calor útil en un solo proceso, maximizando la eficiencia energética al aprovechar el calor residual de la combustión o gasificación de biomasa para procesos industriales o calefacción.

**2.4.4.2 Ciclo abierto.** En este sistema, un fluido de trabajo (como aire o vapor) pasa por un solo ciclo para generar electricidad. Aunque su eficiencia es menor en comparación con otras tecnologías, su implementación es más sencilla y económica.

**2.4.4.3 Tecnologías termoquímicas.** Incluyen procesos térmicos como la combustión (generación de calor para producir electricidad), la gasificación (conversión de biomasa en gases combustibles para motores o turbinas) y la pirolisis (descomposición de biomasa en ausencia de oxígeno, obteniendo bio-aceite, carbón vegetal y gas).

En 2024, en el país había alrededor de 29 proyectos de generación eléctrica con base en biomasa. De estos, (19) se encuentran en fase 1, (7) en fase 2 y (3) en fase 3. El proyecto de biomasa más antiguo según el Informe de la UPME Reg, (2024), es Cogeneración IPSA, ubicado en el municipio de El Cerrito, Valle del Cauca. Este proyecto, operado por Ingenio Providencia

S.A. desde 2009, utiliza bagazo como recurso y emplea tecnología de cogeneración, con una capacidad instalada de 19.9 MW.

Como se observa en la Figura 28, los proyectos de biomasa en Colombia se concentran principalmente en el centro y suroccidente del país, donde predominan las industrias agrícolas y alimenticias. A partir de esto, en las siguientes secciones se examina brevemente el panorama de los proyectos registrados en función de los recursos empleados, incluyendo bagazo, biogás, cultivos energéticos, residuos sólidos y agrícolas.

### Figura 28

*Mapa Proyectos de energía eléctrica del tipo Biomasa*



Nota. Tomado de (P.8), UPME BI, (2024).

#### ***2.4.5 Proyectos de biomasa por recursos utilizado***

**2.4.5.1 Proyectos de Biomasa de Generación Eléctrica con Base en Bagazo.** El bagazo es el residuo orgánico resultante de la extracción de jugos de frutos, semillas y tallos mediante procesos como trituración, maceración o presión. Tradicionalmente, este material vegetal se desechaba al perder sus propiedades esenciales, en la actualidad, se aprovecha como biomasa

residual en procesos exotérmicos para la generación de energía eléctrica, lo que representa una estrategia clave para la reducción de emisiones en industrias alimenticias.

Este proceso aprovecha el bagazo de caña, un subproducto de la producción de azúcar, como combustible. La cogeneración es un ejemplo claro de economía circular, ya que transforma un residuo agrícola en energía limpia, beneficiando tanto al sector industrial como al medio ambiente. En este contexto, a corte de 31 de octubre de 2024, en Colombia operan 13 proyectos de cogeneración que emplean tecnología de ciclo abierto y utilizan bagazo proveniente de residuos de arroz, palma de aceite y, principalmente, caña de azúcar. Estos proyectos están distribuidos en distintas regiones (UPME Reg, 2024).

- Valle del Cauca: 4 proyectos.
- Bogotá, Santander, Risaralda y Cauca: 1 proyecto cada uno.
- Meta: 3 proyectos.
- Tolima: 2 proyectos.

La concentración de estos proyectos en dichas regiones responde a la presencia de importantes actores industriales en el sector alimenticio, como ingenios azucareros, industrias arroceras y transformadores de palma de aceite. La cogeneración de energía en los ingenios azucareros de Colombia en 2023, produjeron 1.800 GWh de energía eléctrica, lo que representó un aumento del 3,2% respecto al año anterior. De esta cantidad, 811GWh fueron excedentes inyectados al Sistema Interconectado Nacional (SIN), consolidando a la cogeneración agroindustrial como una fuente renovable y estable de energía para el país.

Desde 2018, el sector ha invertido en investigación para producir biogás a partir de la vinaza, un subproducto del proceso de obtención de alcohol carburante. Se estima que esta iniciativa podría generar hasta 80 millones de m<sup>3</sup> de biogás, equivalente al 40% del consumo de gas residencial en el Valle del Cauca. Este biogás tiene múltiples aplicaciones, como su uso en calderas, en el transporte de caña y su inyección en la red de gas natural domiciliario, lo que reduce aún más la huella de carbono del sector (Asocaña, 2024).

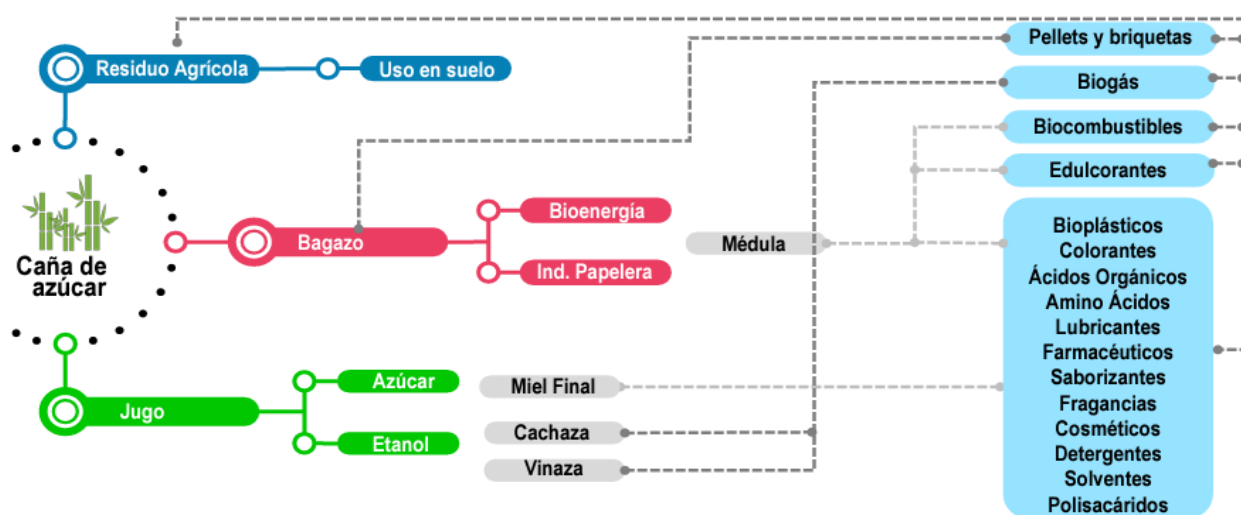
En promedio el sector utiliza 5.9 millones de toneladas de bagazo, utilizado para la generación de energía eléctrica, térmica y mecánica. 415,000 toneladas de carbón, empleadas en

calderas de *co-firing*, los ingenios azucareros produjeron 1.800 GWh,<sup>34</sup> de energía eléctrica en el 2023, un aumento del 3,2% respecto a 2022, con 811 GWh de excedentes al Sistema Interconectado Nacional SIN, dando mayor robustez al sistema.

Según CeniCaña (2021), si se sustituyeran 415,000 toneladas de carbón utilizadas en la industria azucarera por 680,000 toneladas de RAC de caña de azúcar (con 15% de humedad), se lograría reducir emisiones de CO<sub>2</sub> de 935,410 toneladas a 23,868 toneladas equivalentes. Colombia ocupa el puesto (15) de producción azucarera en el mundo y fue el (9) exportador de azúcar, entre los años 2018 a 2022; este sector representó el 2.4% del PIB agrícola, y el 2.0% del PIB industrial, para representar el 0.6% del PIB total durante 2023.

**Figura 29**

*Proceso aprovechamiento caña de azúcar insumo*



Nota. Tomado de (p.5), CeniCaña, (2021).

<sup>34</sup> GWh= Gigavatio-hora, unidad de medida de energía equivalente a mil millones de vatios-hora. 1 GWh = 1,000 MWh = 1,000,000 kWh.

Por ello, el aprovechamiento energético de los residuos de caña de azúcar es una estrategia para el carbono neutralidad, la mitigación del impacto ambiental y la consolidación de Colombia como actor fundamental en el mercado global de alimentos, ya que en la actualidad destaca como país con mejor rendimiento respecto a la caña cercanos incluso al 100% del aprovechamiento de la planta (UPME, 2024). Este subsector constituye un pilar económico para más de 51 municipios del suroccidente de Colombia en 6 departamentos, cuyos ingresos tributarios dependen en gran medida de la industria de la caña de azúcar. Como se observa en la figura 29, este subproducto tiene múltiples aplicaciones más allá de la refinación azucarera.

**2.4.5.2 Proyectos de biomasa de generación eléctrica con base en Biogás.** El biogás es una mezcla de gases generada durante la digestión anaerobia, un proceso en el que la materia orgánica como restos de alimentos, estiércol y otros desechos biodegradables, la producción de biogás se realiza mediante biodigestores, que descomponen la materia orgánica y generan biogás y bio-fertilizantes, se descompone sin oxígeno, realizado por bacterias metanógenas, por lo cual su uso y aprovechamiento resulta crucial para reducir las emisiones y evitar el uso de hidrocarburos.

Los principales componentes del biogás son el metano ( $\text{CH}_4$ ) que representa entre el 50% y 70%, y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que varía entre el 40% y 20%. Además, contiene pequeñas cantidades de otros gases como sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). A excepción del metano ( $\text{CH}_4$ ), los demás gases son impurezas, por lo que es necesario eliminarlos para obtener biogás de alta calidad.

En Colombia, el 59% del potencial de biogás aún no se ha aprovechado, lo que presenta una gran oportunidad para el desarrollo de proyectos energéticos. En nuestro país existen 7 proyectos en operación de biomasa registrados con base en biogás, todos utilizan tecnologías de ciclo abierto, encontrándose 3 en Meta, 2 en Bogotá y en Norte de Santander y Cundinamarca 1 proyecto, de todos estos 3 se encuentran en fase 2 y 4 en fase 1. Ofrecen una capacidad conjunta de 26,16 MW.

Se destacan promotores como la empresa de cárnicos, La Fazenda, desde el área porcina, Aceites Manuelita, entre otras, que son industriales alimenticios pecuarios y agrícolas de gran peso en nuestro país. Los beneficios del aprovechamiento del biogás incluyen la sustitución de fuentes de energía contaminantes, la reducción de emisiones y la creación de bio-fertilizantes.

**2.4.5.3 Proyectos de biomasa de generación eléctrica en Cultivos energéticos.** Los cultivos energéticos pueden considerarse una estrategia sostenible y de gran interés en el proceso de transición energética, ya que son cultivos plantados y gestionados específicamente para la producción de energía a partir de biomasa. Entre ellos destacan la caña de azúcar, el sorgo dulce, la *Jatropha curcas*, la higuera, la yuca amarga y la remolacha forrajera, según Corredor, (2008), los cultivos energéticos incluyen residuos como cáscaras, semillas y raíces.

Estos cultivos se caracterizan por su alta predictibilidad y concentración, lo que garantiza un suministro constante de materia prima y facilita una gestión eficiente y económica. Según su finalidad, se clasifican en tres categorías principales: oleaginosos, empleados en la producción de biodiesel a partir de aceites; alcoholígenos, destinados a la obtención de bioetanol mediante la fermentación de azúcares; y lignocelulósicos, utilizados para generar biomasa sólida en aplicaciones térmicas, fabricación de combustibles como pellets, cogeneración de energía y producción de biocarburantes avanzados (IDAE, 2007).

En el territorio nacional, existen dos proyectos registrados que utilizan este recurso, con una capacidad conjunta de 25.14 MW. La mayor parte de esta capacidad corresponde al proyecto operado por *Refoenergy Villanueva S.A.S. E.S.P.*, con 25 MW, ubicado en el municipio de Villanueva, Casanare. Este proyecto, que emplea tecnología de ciclo abierto y se encuentra en fase 2, tiene una posible fecha de entrada en operación en febrero de 2025.

El segundo proyecto está a cargo de Aceites del Magdalena Medio S.A.S., en el municipio de San Vicente de Chucurí, Santander, con una capacidad de 0.14 MW. Este último, en fase 1,

utiliza tecnología de ciclo abierto y opera desde enero de 2018 (UPME Inscripción, 2024-2). El nororiente colombiano se posiciona como la región pionera en la implementación de cultivos energéticos para la producción eléctrica sostenible. Esta estrategia permite aprovechar productos vegetales no comestibles, que de otro modo serían descartados por su toxicidad para el consumo humano y su bajo interés comercial en la industria alimentaria.

**2.4.5.4 Proyectos de biomasa con base en Residuos agrícolas.** Actualmente, en Colombia se encuentran registrados cinco proyectos de aprovechamiento de residuos agrícolas para la generación eléctrica. De estos, cuatro se encuentran en fase 1 y uno en fase 2. Se proyecta que, una vez en operación, estos proyectos alcancen una capacidad instalada conjunta de 10.8 MW, utilizando residuos del sector avícola y agrícola, específicamente de la palma de aceite y el arroz. Entre los principales promotores privados destacan la Incubadora de Santander S.A. y Diana Corporación S.A.S., ambas empresas líderes en la industria alimentaria del país.

Si bien el número de proyectos registrados es aún reducido, la masificación de este tipo de iniciativas representaría importantes beneficios para comunidades y territorios aislados. Su impulso desde el sector privado, particularmente a nivel de pequeñas y medianas empresas, ofrecería una alternativa sostenible para la provisión de electricidad y gas de uso doméstico, contribuyendo así a la mejora de la calidad de vida de numerosos colombianos.

**2.4.5.5 Proyectos biomasa de generación eléctrica Residuos Sólidos Urbanos.** Los proyectos de generación eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos permiten la valorización de desechos. Estos proyectos no solo contribuyen a la reducción de la cantidad de residuos en vertederos, sino que promueven la diversificación de las fuentes energéticas y disminuyen la dependencia de combustibles fósiles.

En Colombia, se encuentran registrados cinco proyectos en fase 1 para la generación eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos. De estos, tres utilizan residuos sólidos como recurso y aplican tecnología termoquímica. Estos proyectos, promovidos por BCCY Colombia  *Holding*

S.A.S., se ubican en Yotoco (Valle del Cauca), Galapa (Atlántico) y Don Matías (Antioquia), con fechas de entrada en operación previstas para marzo de 2024 en los dos primeros casos y diciembre de 2025 para el tercero, con una capacidad conjunta de 17.7 MW.

Los otros dos proyectos emplean tecnología de ciclo abierto y no tienen vigencia actual. Uno de ellos es el Proyecto Sopó, promovido por Energía Pura S.A.S., con una potencia de 2 MW en operación desde 2017 en el municipio de Sopó (Cundinamarca). El otro, promovido por TCIS S.A., se localiza en Sibaté (Cundinamarca), tiene una capacidad de 166 MW y está en funcionamiento desde 2019. Para fomentar la implementación de proyectos de generación eléctrica a partir de biomasa en Colombia, es fundamental mejorar la infraestructura y estimular la inversión en tecnologías más eficientes y sostenibles. En primer lugar, se requiere una mayor colaboración entre el sector público y el privado para incentivar la investigación y el desarrollo de tecnologías avanzadas, especialmente en los campos de la gasificación y la pirolisis, que podrían optimizar el aprovechamiento de la biomasa residual. Además, es prioritario fortalecer los sistemas de recolección y tratamiento de residuos orgánicos, estableciendo modelos de gestión más eficientes y accesibles de la mano con las normativas ISO,<sup>35</sup> particularmente en regiones con alta producción de residuos, como el nororiente del país.

Asimismo, la implementación de un marco normativo más claro y robusto es esencial para incentivar el desarrollo de proyectos de biomasa la creación de un código que regule el sector es crucial. Se recomienda la creación de subsidios o beneficios fiscales que faciliten la adopción de estas tecnologías, así como la simplificación de los trámites administrativos para su implementación. Finalmente, es crucial fortalecer la educación y la sensibilización sobre los beneficios de la biomasa, promoviendo el apoyo comunitario mediante procesos de consulta previa. Para ver una expansión sobre biomasa residual, un ejercicio de transformación energética examinar el Apéndice A.

---

<sup>35</sup> ISO=*International Organization for Standardization*.

### 3. Tecnologías de gas, captura y almacenamiento de Carbono

Este capítulo se adentra en el análisis del gas natural en el contexto colombiano, desde sus antecedentes históricos y reservas, hasta su exploración, producción y demanda en diversos sectores económicos. Se exploran proyectos clave, tanto nacionales como internacionales, que están marcando el rumbo de esta industria en el país. Se abordan las principales necesidades del sector, ofreciendo una visión integral sobre los desafíos y oportunidades que enfrenta Colombia en el aprovechamiento y gestión del gas natural, y su papel en la transición energética hacia un futuro más limpio.

#### 3.1 Gas natural

Como se expone en MinEnergía, (2024), el gas natural es una mixtura de gases de gran poder calorífico –PCI- que se formó en el subsuelo producto de la desintegración de materia orgánica proveniente de los microorganismos y hasta de fauna y flora del pasado, que con las presiones y temperaturas fueron creando espacios acumulados de gas que en muchas ocasiones está acompañado de otros hidrocarburos como el petróleo o el carbón. El principal componente de esta mezcla es el gas metano. Los demás componentes, en pequeñas cantidades, son otros gases como el etanol, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y vapor de agua. El gas natural se considera una opción más limpia en comparación con otros combustibles fósiles, como el carbón y el petróleo, debido a que produce menos emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes cuando se quema (ONU, 2023).

Alcanos de Colombia, (2024), afirma que “...El gas natural es el combustible que menos contamina el ambiente, debido a que en su combustión no se generan gases tóxicos, cenizas, ni residuos...(párr.4)”. La empresa Shell, (2020), complementa al exponer que este hidrocarburo emite entre un 45% y un 55% menos de G.E.I. que el carbon para generar electricidad, también señala que en el sector industrial ligero como el textil, se puede dar el paso de las calderas a carbón

a las de gas reduciendo costos y contaminantes. En la industria pesada, como la del hierro, cemento, productos químicos, el cambio de carbon a gas puede reducir significativamente las emisiones.

La sustitución de la biomasa para calefacción y cocina pueden reducir el impacto a la salud, ya el número de hogares que emplean este combustible para la cocción de alimentos y el calentamiento de agua supera los 10 millones, siendo un servicio que ha mejorado la calidad de vida de quienes los perciben pero, aun falta muchos territorios que no tienen acceso al gas.

### ***3.1.1 Antecedentes del Gas Natural en Colombia***

El desarrollo del gas natural en Colombia comenzó en 1961 con la promulgación de la Ley 10, firmada por el expresidente Alberto Lleras Camargo, que estableció la obligación de evitar el desperdicio de gas en los yacimientos petrolíferos (Ley 10, 1961). En 1962, se inauguró la primera planta de tratamiento de gas de Cicuco y se construyó el primer gasoducto que conectaba con Barranquilla. En 1964, se completó otro gasoducto que transportaba gas del Campo Jobo Tablón al complejo industrial de Mamonal en Cartagena (Acosta, 2022).

A mediados de los años 70, en el contexto de la crisis petrolera global donde los países miembros de la OAPEC (Organización de Países Árabes Exportadores de Petróleo),<sup>36</sup> decidieron no exportar crudo a los países aliados de Israel durante la guerra del *Yom Kippur*,<sup>37</sup> entre los que se encontraban EEUU y países de Europa Occidental, generó aumento de los precios del petróleo

---

<sup>36</sup> En 1982 el número de miembros de la Organización aumentó a once países árabes exportadores de petróleo, a saber: Argelia (1970), Bahrein (1970) (ahora Reino de Bahrein), Egipto (1973), Iraq (1972), Kuwait (1968), Libia (1968), Qatar (1970), Reino de Arabia Saudita (1968), Siria (1972), Túnez (1982) y Emiratos Árabes Unidos (1970). En 1986, Túnez presentó su solicitud de retiro de la Organización. El Consejo Ministerial deliberó sobre la solicitud y acordó suspender los derechos y obligaciones de Túnez (OPAEP, 2024).

<sup>37</sup> ...Fue una guerra peleada por una coalición de los estados árabes liderada por Egipto y Siria en contra de Israel en 1973. Comenzó en *Yom Kipur*, un sábado 6 de octubre, cuando Egipto y Siria lanzaron y coordinaron un ataque sorpresa contra Israel. La guerra terminó 18 días después, el 24 de octubre de 1973, cuando se declaró el cese al fuego. La guerra comenzó cuando tropas egipcias cruzaron el Canal de Suez en el sur de Israel y fuerzas sirias entraron los Altos del Golán en el norte de Israel. Después de tres semanas de pelea intensa, las Fuerzas de Defensa Israelí -FDI- superaron las conquistas iniciales de Egipto y Siria y avanzaron hacia el lado oeste del Canal de Suez y la vecindad de la capital siria, Damasco. Esto forzó, tanto a los egipcios como a los sirios, a aceptar los nuevos acuerdos del cese de fuego... (Fuerzas de Defensa Israelí FDI, 2022).

a niveles nunca antes vistos, lo cual produjo un revolcón a nivel mundial replanteando las políticas energéticas en aras de evitar la dependencia de países productores de ese combustible.

En Colombia, este escenario impulsó la exploración del gas natural realizándose estudios que no fueron muy concluyentes. Durante el gobierno de Alfonso López Michelsen, en 1977, inauguró la estación de producción de gas natural libre en La Guajira, y el gasoducto de Promigas para transportar el gas hasta La heroica, marcando un hito en la infraestructura energética del país (CREG, 2023).

A finales de los años 80, bajo el liderazgo del Ministro de Minas Guillermo Perry, se impulsó el programa ‘Gas para el Cambio’, que amplió la infraestructura, el suministro y el consumo de gas en las ciudades, permitió la interconexión nacional y facilitó nuevos hallazgos de reservas. En la década de los 90, los descubrimientos de los yacimientos de Cusiana y Cupiagua impulsaron aún más la expansión del consumo de gas natural en el país (Benavides C. A., 2016).

En 1991, se propuso la masificación del gas y estableció metas ambiciosas, como la de llevar gas a 3.7 millones de familias (CONPES 2571, 1991). Mientras en 1993, promovió una expansión de la infraestructura y se establecieron prioridades para el esquema de contratos para los gasoductos de Sebastopol-N el ramal a Bucaramanga desde Barrancabermeja y en el Tolima y licitaciones para el viejo Caldas, el Valle y Bogotá con lo que lograron ampliar en cerca del 95% de cobertura en Bucaramanga y Neiva y resaltando que en Bogotá se había logrado suministrar el recurso a más de 130.000 familias de bajos recursos (CONPES 2646, 1993).

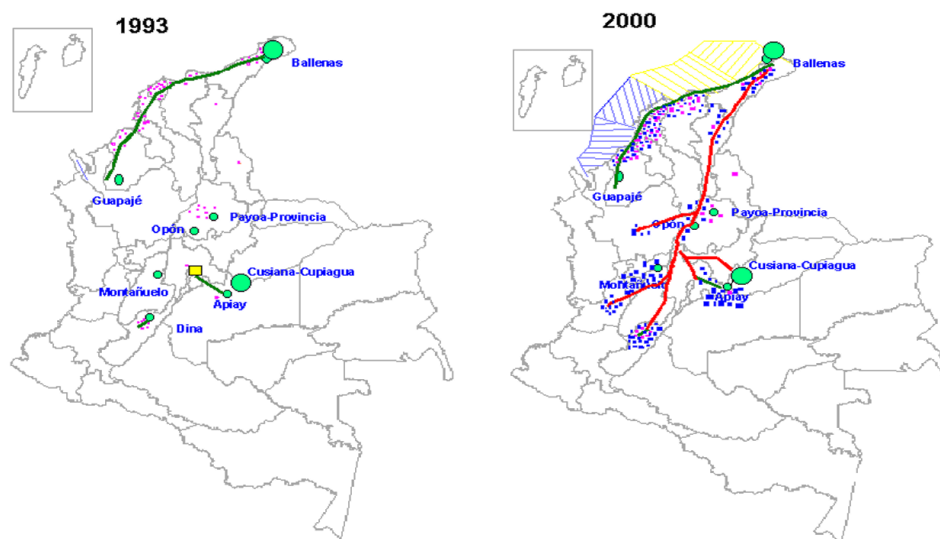
En el año 1991 se prestaba los servicios de gas a 31 municipios, a 400.000 usuarios, con 1810 km. de redes de extensión de gasoductos, 7 empresas de distribución y una transportadora. En 1994, se aprobó la Ley 142, que en su artículo 174 definió al gas como un servicio público esencial para los estratos 1, 2 y 3, y creó la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), (Ley 142, 1994). En 1996, comenzó a operar el gasoducto de Transportadora de Gas Internacional (TGI), conectando los campos de traslado el gas desde Ballena, hasta empalmarse con el

gaseoducto que conecta a Barrancabermeja con el centro del país, y en 1997, se separó la actividad de transporte de gas de Ecopetrol, formando la Empresa Colombiana de Gas, (ECOGAS).

En 1998, se otorgaron áreas de distribución exclusiva para ampliar la cobertura de gas en Quindío, Caldas, Risaralda, Valle y Tolima. En el año 2001, se atendía 201 municipios, a más de 2'492.010 usuarios, con 5632 km de gasoductos, 20 empresas de distribución y 8 transportadores, construyéndose más de 3600 km de gasoductos en 10 años (Benavides C. A., 2016). Todos estos cambios se pueden visualizar en la figura 30.

### Figura 30

*Mapas de gasoductos en Colombia 1993 y 2000*



Nota. Extraído de (p.3), Documento CONPES 3190 de 2002, Min. Minas, (2022).

En 2003, bajo el gobierno de Álvaro Uribe Vélez, se lanzó el CONPES 3244, para dinamizar el sector, incluyendo la conversión a gasoducto del poliducto entre Cusiana y El Porvenir y la instalación de una planta de deshidratación en el campo Cusiana, con una inversión

estimada de US\$143 millones (Benavides, 2022), beneficiando a Bogotá y el Altiplano Cundiboyacense. En el 2007, Ecopetrol, a través de *Chevron Petroleum Company*, firma con Petróleos de Venezuela S.A. –PDVSA- un acuerdo bilateral para la compra y venta de gas natural entre las Colombia y Venezuela con una vigencia hasta el año 2027.

En 2020, había 10.25 millones de usuarios de gas natural, lo que representa el 65% de la población (Acosta, 2022). En la Ley 2128 de 2021 promovió el abastecimiento y uso del gas combustible, otorgando incentivos fiscales, como exenciones de impuestos y subsidios para estratos 1 y 2 en el consumo del gas (Ley 2128, 2021). Por último y de acuerdo con la UPME, (2024), en 2021 entraron en operación seis proyectos de generación eléctrica a gas, y en 2022, ocho, pero para 2023 solo uno entró en operación, con la mayoría de los nuevos proyectos proyectados con base en gas proyectados para operar entre 2025 y 2027, concentrados en la Costa Atlántica en Cartagena, Santa Marta y Barranquilla (UPME Inscripción, 2024-2). Conforme a la Hoja de ruta del Gas Natural se cuenta hoy con más de 7500 km de gasoductos, que cubren el 65% de la población.

### **3.1.2 Reservas de gas**

Conocer las reservas de gas natural es crucial para asegurar la estabilidad energética de Colombia, ya que permite planificar el suministro a largo plazo, optimizar la exploración y producción, y gestionar la transición hacia fuentes de energía más sostenibles. Las reservas de gas natural en Colombia han experimentado un descenso significativo desde su pico más alto en 2007, cuando se alcanzaron 14.1 años de reservas, cayendo a 6.1 años en 2023.

Según el informe de la Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH (2023), las reservas probadas 1P,<sup>38</sup> pasaron de 2.817 Gpc,<sup>39</sup> en 2022 a 2.373 Gpc en 2023. Las reservas 2P (mejor estimación), que incluyen tanto probadas como probables, se redujeron de 3.464 Gpc en 2022 a

---

<sup>38</sup> 1P: Indica la estimación baja de Reservas (Igual a P1) 2P: Mejor estimación de Reservas (P1+P2) 3P: Estimación alta de Reservas (P1+P2+P3).

<sup>39</sup> Gpc: Giga pies cúbicos.

2.973 Gpc en 2023, con 2.373 Gpc probadas y 600 Gpc probables. En cuanto a las reservas 3P (estimación alta), pasaron de 4.211 Gpc en 2022 a 3.692 Gpc en 2023. A pesar de esta disminución, el 80% de las reservas 2P son probadas, lo que indica que la mayor parte de las reservas están en la categoría más confiable.

Por otro lado, los recursos contingentes han mostrado un incremento del 29% entre 2022 y 2023. Los recursos 1C,<sup>40</sup> pasaron de 655 Gpc en 2022 a 1.289 Gpc en 2023; los 2C aumentaron de 4.221 Gpc a 5.326 Gpc, y los 3C subieron de 5.806 Gpc a 7.506 Gpc en el mismo período. En cuanto a la exploración, entre 2014 y 2022 se descubrieron yacimientos de gas a un ritmo promedio de 3.6 por año, mientras que entre sept. de 2022 y mayo de 2024, esa tasa aumentó a 7.6 por año. En 2023, se realizaron 8 descubrimientos de gas, 1 de petróleo y gas, y 7 de petróleo, lo que resalta el potencial de reservas aún no descubiertas en el territorio colombiano.

### 3.1.3 Exploración

En el país las 4 primeras cuencas sedimentarias son responsables de 90.4% de todas las reservas probadas 1P como se observa en la Tabla 9. La exploración es el primer eslabón de la cadena de valor para Ecopetrol, la cual ha encontrado potencialidades de recursos de aceite en los Llanos, también hay potencialidad de aceite en el Magdalena Medio, Putumayo, Magdalena Medio Superior, respecto a potencialidad en aceite-gas está el Catatumbo y Piedemonte y de gas principalmente en Colombia norte (Ecopetrol, 2024).

**Tabla 9**

*Reservas 1P. Gas Natural por Cuenta Sedimentaria*

<b>Id.</b>	<b>Cuenca</b>	<b>1P Gpc</b>	<b>%</b>
1	Cordillera Oriental	1031	43.5%
2	Guajira Off-Shore	456	19.2%
3	Valle Inferior del Magdalena	386	16.3%
4	Llanos Orientales	270	11.4%
5	Valle Medio del Magdalena	126	5.3%

<sup>40</sup> Recursos contingentes: 3 grados de incertidumbre 1C = C1, 2C=C1+C2 y 3C=C1+C2+C3.

6	SINU San Jacinto	81	3.4%
7	Catatumbo	11	0.4%
8	Valle Superior del Magdalena	18	0.3%
9	Cesar Ranchería	4	0.2%
<b>Totales</b>		<b>2373</b>	<b>100%</b>

Nota. Tomado de (P.15), Agencia Nacional de Hidrocarburos, (2023).<sup>41</sup>

**3.1.3.1 Llanos Orientales.** Ecopetrol ha centrado su actividad exploratoria en dos principales áreas de los Llanos Orientales y zona norte de Arauca, en esta área, se han llevado a cabo proyectos para la exploración y perforación de crudos livianos, con un enfoque en yacimientos de alta productividad asociados al tren Arauca-Caño Limón. En 2024, Ecopetrol reportó éxitos significativos con la perforación de los pozos Arauca-8 y Rex NE N-01. Áreas cercanas a los trenes productores Chichimene-Acacias-Lorito y Castilla en las que Ecopetrol se ha enfocado en la exploración y delimitación de oportunidades para crudos pesados. Entre los éxitos recientes se destacan los pozos Tinamu-Magnus y Kimera. La empresa Hocol también ha tenido un papel importante en esta región, en asociación con *Geopark*, ha trabajado en los bloques LLA-86, LLA-87, LLA-109, LLA-123, y LLA-124. En estos bloques, durante 2023 y 2024, Hocol reportó éxitos exploratorios con los pozos Toritos, Bisbita Norte, Saltador y Zorzal.

**3.1.3.2 Valle Medio del Magdalena –VMM.** Ecopetrol ha intensificado su actividad exploratoria desde 2023, retomando la adquisición de información sísmica, alcanzando niveles no registrados desde 2016. Esta actividad se complementa con la adquisición de información a través de tecnologías como *Integrated Full Tensor Gradiometry (iFTG)*.<sup>42</sup> Para fortalecer su portafolio en esta región, Ecopetrol adquirió los TEA's,<sup>43</sup> VMM 4-1, VMM 14-1 y VMM-65, donde actualmente se están llevando a cabo análisis de prospectividad. Adicionalmente, la empresa está

<sup>41</sup> Gpc=Giga-pies Cúbicos.

<sup>42</sup> La gradiometría de gravedad tensorial completa es una forma de medir los cambios en la densidad del subsuelo causados por la geología del subsuelo. Los buscadores de recursos naturales y minerales la utilizan para medir y mapear los cambios en la densidad del subsuelo. Esta información se utiliza para construir una imagen de las fallas, estructuras y lineamientos del subsuelo, que luego puede usarse para identificar con precisión una variedad de objetivos de petróleo, gas, aguas subterráneas y minerales (Metatek, 2024).

<sup>43</sup> TEA = Títulos de Exploración y Explotación de Áreas.

involucrada en proyectos *Near Field Exploration*,<sup>44</sup> de bajo riesgo geológico, cerca de campos como Cira Infantas, Llanito, Casabe y Provincia.

**3.1.3.3 Valle Inferior del Magdalena –VIM.** En esta región, la empresa Hocol ha destacado con la comercialización del Campo de gas Arrecife, ubicado en el departamento de Córdoba. Este campo, con una producción inicial de entre 5 y 10 MPCD, fue un hito importante en el I trimestre de 2024. Hocol planteó intensificar su actividad exploratoria en el VIM, con la perforación del pozo Milonga-1 que resultó ‘seco’, es decir, a pesar de la presencia de hidrocarburos, no existían cantidades suficientes para su viabilidad económica,

**3.1.3.4 Valle Superior del Magdalena - VSM.** La empresa Hocol en el Valle Superior del Magdalena, ha adquirido el bloque COR-9, donde tiene una participación del 100%. Actualmente, se está realizando la adquisición de sísmica en COR-9\_3D. Además, en alineación con la estrategia de *Near Field Exploration*, en 2022 y 2023 se comercializó el campo Ibamaca ubicado a 13 kilómetros al este del municipio de Chaparral, fortaleciendo aún más su portafolio en la región del Tolima.

### **Figura 31**

*Ubicación proyectos Costa afuera con recursos potenciales gas natural*

---

<sup>44</sup> En la actualidad, aproximadamente el 80 % de la actividad de exploración y evaluación en todo el mundo se centra en la exploración de yacimientos cercanos, lo que ayuda a los operadores a explorar reservas sin explotar en sus propios territorios y a conectarse con la infraestructura existente. Este enfoque, también conocido como exploración basada en infraestructura, permite a los operadores producir más con menos riesgo, menor costo y menor intensidad de carbono (SLB, 2024).



Nota. Tomado de (p.11), MinEnergía FMJ, (2024).

**3.1.3.5 Proyecto Sirius.** Se destacó en Prensa Presidencia, (2024), el exitoso hallazgo de gas en el Proyecto Sirius (anteriormente Uchuva-2), descubierto en 2022 con el pozo Uchuva-1, tiene un potencial de 6.000 Gpc, lo que representa aproximadamente 2.5 veces las reservas 1P actuales del país 2.373 Gpc. El pozo está ubicado en el bloque Tayrona, a 31 km de la costa y en aguas ultra profundas a 804 metros de profundidad, con perforación iniciada en junio de 2024. Se prevé que la explotación comience en 2029-2030 en dos etapas, con una producción inicial de 13.3 MMCD durante 10 años, y una segunda etapa con 15 MMCD. El campo, operado por Petrobras (44.44%) y Ecopetrol (55.56%), es comparable en importancia al proyecto Chuchupa, clave para el suministro de gas desde 1979. Para más ampliación, ver figura 31.

### 3.1.4 Producción de gas en Colombia (Oferta)

Entre ene-ago. de 2024, la producción comercializada de gas ha registrado un promedio de 981 MPCD,<sup>45</sup> lo cual es un 7,7% inferior a lo evidenciado en el mismo periodo en el año anterior,

<sup>45</sup> MPCD = Millones de Pies Cúbicos por Día.

82 MPCD menos. De ene. a dic. de 2023 se observó una producción comercializada promedio de 1.059 MPCD, lo que evidencia una disminución del 1,4% respecto al mismo periodo del año 2022 (14,9 MPCD menos).

**3.1.4.1 Producción fiscalizada de gas.** En promedio, de ene-sept. de 2024, la producción fue de 1.442 MMPC, un 7,74% menos que en el mismo periodo de 2023 (121 MPC menos). Durante todo el año 2023, la producción fiscalizada de gas alcanzó los 1.546 MMPCD. En ese año, Colombia contó con alrededor de 288 campos productores de gas. En su informe, Campetrol, (2024), destacó que, en ago. 2024, cinco departamentos productores de gas (Casanare, Córdoba, La Guajira, Sucre y Santander) concentraron el 87% de la producción total del país, con Casanare liderando con una participación del 62,4%.

Cinco municipios productores de gas contribuyeron con el 73% del total nacional, destacándose Yopal, Aguazul, Manaure, Tauramena y Pueblo Nuevo. Los cinco principales campos productores representaron el 53% de la producción total, siendo el Campo Pauto Sur el más significativo, con una participación del 26% y un crecimiento del 16% respecto a 2023. También se destacaron los campos de gas Cupiagua, Cupiagua Sur, Clarinete y Chuchupa (Campetrol, 2024).

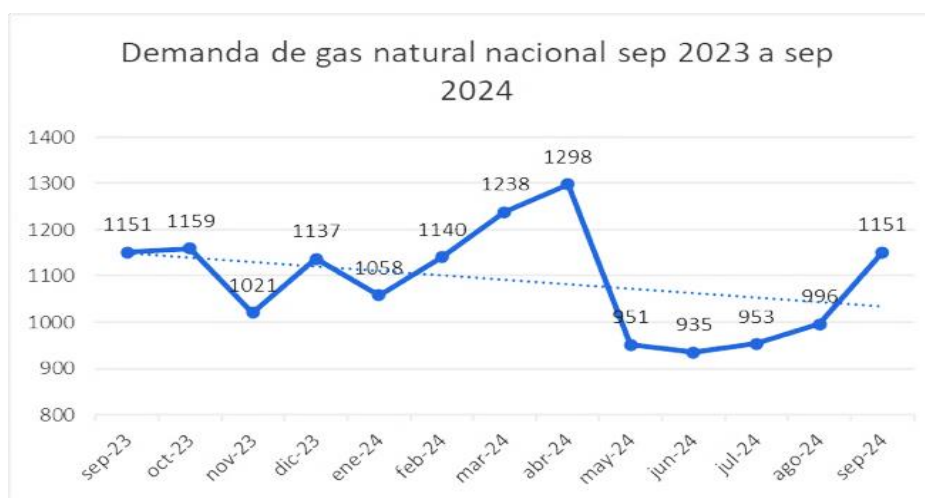
Por lo que se depende de estos territorios los cuales deben ser considerados como estratégicos y deben tener todo el apoyo estatal, en seguridad, sistema de salud, educación entre otros de las poblaciones implicadas, dado que el autosuministro nacional principalmente se encuentra concentrado en esos departamentos siendo Casanare el eje principal del gas natural en Colombia. La producción está concentrada en cinco empresas operadoras: Ecopetrol (69%), Canacol (12%), Hocol (11%), Parex (3%) y *LNG Energy Group Corp* (2%). Juntas, estas empresas representaron el 97% de la producción total, con una suma de 1.371 MPC de la producción fiscalizada de agosto de 2024, que fue de 1.434 MPCD. Por lo que es casi un sistema oligopolístico.

### 3.1.5 Demanda de gas en Colombia

La demanda, entre sep. de 2023 y sep. de 2024, fue de un aproximado de 14188 MPCD de gas natural con un promedio mensual de 1091 MPCD, teniendo al mes con más demanda en abril de 2024 con 1298 MPCD y el de menos junio 2024 con 935 MPCD véase figura 32. En septiembre la demanda fue de 1151 MPCD, un aumento de 15.56% frente a agosto que fue de 996 MPCD y una disminución del 0.3% frente al mismo del año anterior con 3.2 MPCD menos.

#### Figura 32

*Demanda Total de Gas Natural en Colombia sep. 2023 a sep. 2024*



Nota. Datos de ANH Campetrol, (2024).

Este crecimiento estuvo liderado por el sector de generación térmica, que incrementó su consumo en 157,9 MPCD (+64,1%). Dada la vulnerabilidad de las fuentes renovables a los fenómenos climáticos, como las sequías en los sistemas hidroeléctricos, el aumento en la demanda de gas natural para la generación térmica se configura como una estrategia clave para garantizar el suministro estable energético en el país y mitigar riesgos de desabastecimiento en el país.

Entre septiembre de 2023 y septiembre de 2024, la demanda total de gas natural en Colombia alcanzó aproximadamente 14.188 MPCD, con un promedio mensual de 1.091 MPCD. El sector de generación térmica lideró el consumo con 4.315 MPCD, impulsado por la

vulnerabilidad de las fuentes renovables ante fenómenos climáticos como el fenómeno de El Niño, que afectó gravemente los embalses y aumentó la dependencia del gas para garantizar la estabilidad energética.

Uno de los aspectos más críticos durante este período fue el incremento significativo de las importaciones de gas natural, que alcanzaron un promedio de 208,4 MPCD, con un pico de 433,3 MPCD en abril de 2024. Este aumento refleja la insuficiencia de la oferta nacional para cubrir la demanda interna, especialmente durante los meses de sequía extrema.

Las importaciones de gas, gestionadas principalmente a través de la Sociedad Portuaria El Cayao (SPEC), representaron una respuesta inmediata a la caída de las reservas de los embalses, que pasaron del 60% en julio a 49,98% en septiembre de 2024. Este escenario no solo evidenció la dependencia de Colombia de fuentes externas para suplir la demanda energética, sino también la urgencia de fortalecer la infraestructura y explorar nuevas reservas nacionales para reducir esta vulnerabilidad. Además, el aumento en las importaciones estuvo directamente ligado al incremento en la demanda de gas para generación térmica, lo que subraya su papel clave en la estabilidad del sistema eléctrico.

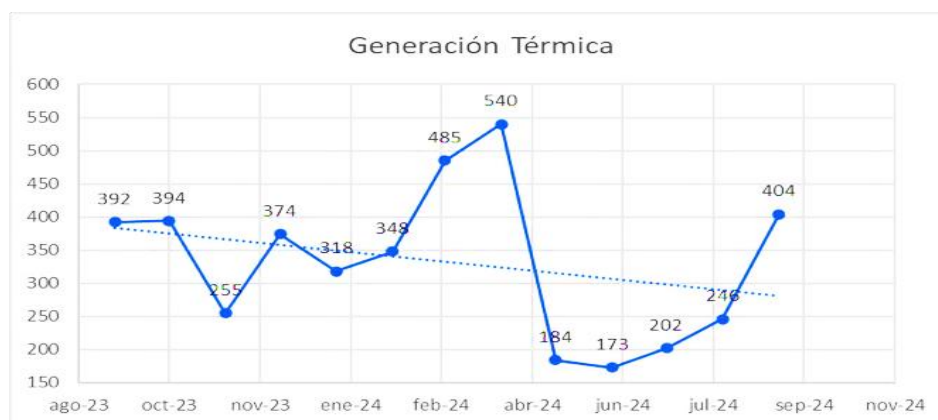
### **3.1.5.1 Análisis por sectores Gas Natural Colombia de sep-23-sep-24.**

**3.1.5.1.1 Sector de Generación Térmica.** La generación térmica ha sido el sector de mayor demanda de gas en Colombia, alcanzando una cifra de 4.315 MPCD, con un promedio de 331,92 MPCD en los 13 meses examinados. La demanda térmica presenta una alta volatilidad, variando entre 173 MPCD en junio de 2024 y 540 MPCD en abril de 2024, véase figura 33.

Estos picos coinciden con las bajas lluvias del fenómeno de El Niño, que afectó al país a principios de ese año, poniendo en riesgo los embalses y el sistema hidroeléctrico. Ante esta situación, se incrementó el uso del sistema térmico para asegurar la estabilidad de la generación eléctrica, suministrando por medio de la importación de gas subsector que se desarrolla más adelante.

### **Figura 33**

*Demanda gas Generación Térmica Colombia sep. 2023 a sep. 2024*



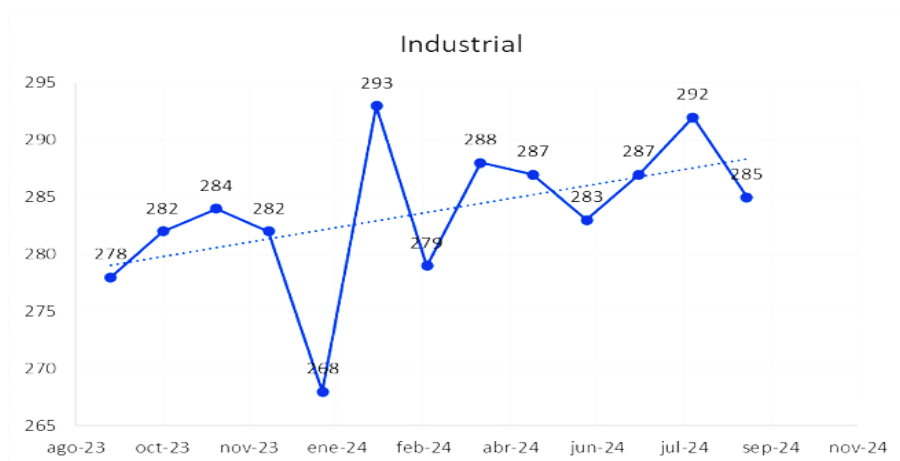
Nota. Datos de ANH Campetrol, (2024).

Se subrayaba en Medina, (2024), que entre mar-abr de 2024, el país vivió su punto crítico de sequía, lo que llevó a la implementación de racionamientos por turnos en ciudades como Santa fe de Bogotá desde el 11 de abril de 2024, con el fin de reducir el consumo de agua y permitir la recuperación de los embalses. A noviembre de 2024, estas medidas aún seguían vigentes.

**3.1.5.1.2 Sector industrial.** La demanda total del sector industrial véase figura 34, fue la segunda mayor en Colombia de los 13 meses analizados rondando alrededor de 3688 MPCD, con un promedio de 283.69 MPCD, se destaca que la demanda industrial es poco volátil oscila en un rango estable entre 268 (ene 2024) y 293 (feb 2024) MPCD, siendo los meses de abril, mayo, julio y agosto de 2024 donde se presentó mayor volatilidad, el mes de sept. 2024 cerró con 285 MPDC una reducción de 2.46% frente al mes anterior (7 MPCD menos).

**Figura 34**

*Demanda gas sector industrial en Colombia sep. 2023 a sep. 2024*

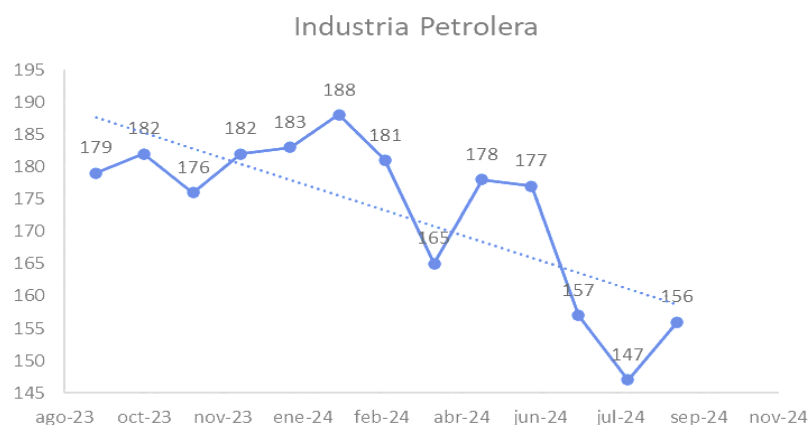


Nota. Datos de ANH Campetrol (2024).

**3.1.5.1.3 Sector Industria Petrolera.** Es el tercer sector con mayor consumo de gas véase figura 35, con más de 2251 MPCD, con un promedio de los 13 meses analizados de 173.15 MPCD, posee una demanda poco volátil de entre 147 MPCD (ago. 2024) y 188 MPCD (feb. 2024), el mes de sept. de 2024 se tuvo una demanda de 156 MPCD un aumento de 5.77% frente al mes anterior (9 MPCD menos).

### Figura 35

*Demanda gas sector industria petrolera Colombia sep. 2023 a sep. 2024*

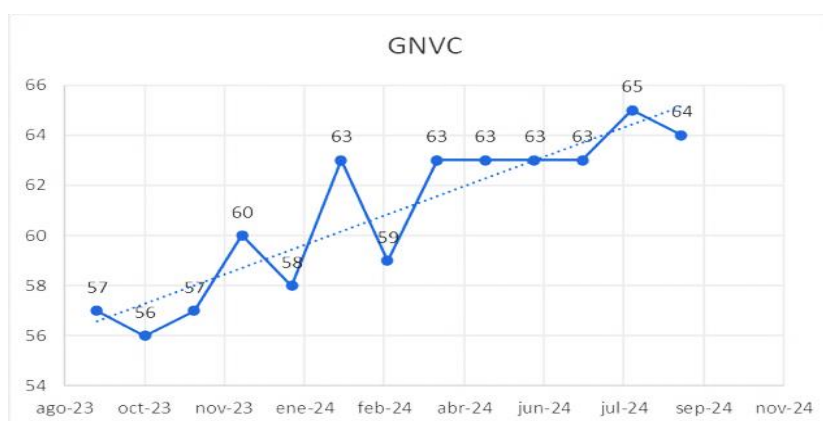


Nota. Datos de ANH Campetrol (2024).

**3.1.5.1.4 Sector GNVC.** Este sector demandó un total de 791 MPCD en los 13 meses con un promedio de 60.84 MPCD, con una variación entre 57 MPCD (Sep. -Nov 2023) a 65 MPDC (ago. 2024). El mes de sept. 2024 tuvo una demanda de 64 MPCD, un aumento de 1.56% (1 MPCD más) frente al mes anterior, véase figura 36.

### Figura 36

*Demanda de gas del sector GNVC en Colombia sep. 2023 a sep. 2024*

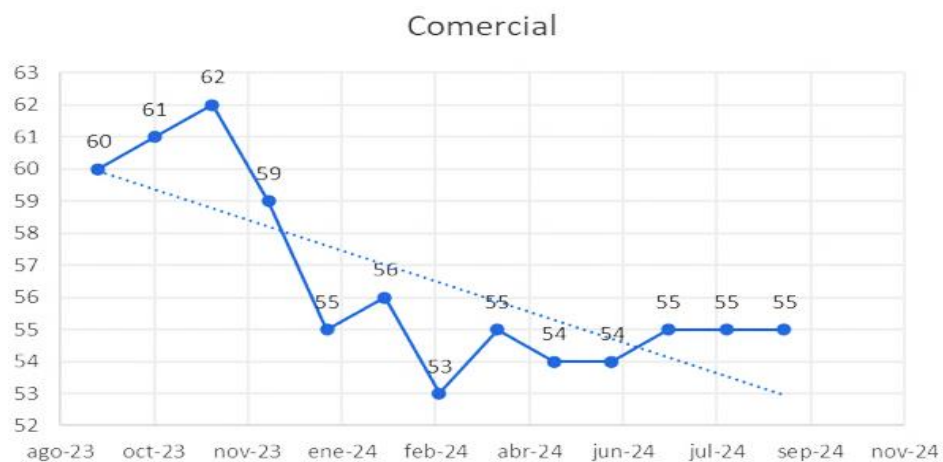


Nota. Datos de ANH Campetrol, (2024).

**3.1.5.1.5 Sector comercial.** Tuvo una demanda acumulada de 734 MPCD, con un promedio de 56.46 MPCD, posee una volatilidad baja de entre 53 MPCD (mar. 2024) y 62 MPCD (nov. 2023). El mes de septiembre con 55 MPCD tuvo un comportamiento idéntico frente a los dos meses anteriores, véase figura 37.

### Figura 37

*Demanda de gas del sector Comercial en Colombia sep. 2023 a sep. 2024*

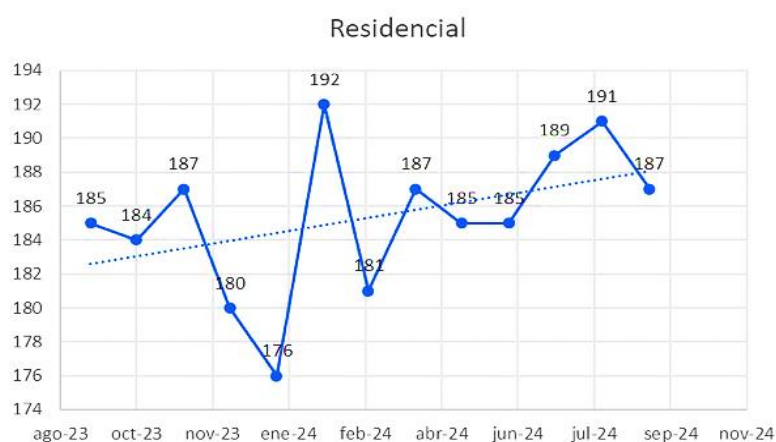


Nota. Datos de ANH Campetrol, (2024).

**3.1.5.1.6 Sector residencial.** Este sector durante los 13 meses analizados, su demanda total fue de 2409 MPCD, con un promedio de 185.30 MPCD, teniendo una volatilidad muy estable de demandas entre 176 MPCD (ene. 2024) y 192 MPCD (Feb. 2024). En el mes de septiembre se demandaron 187 MPCD un -2.14% que el mes anterior (4 MPCD menos), véase figura 38.

### Figura 38

*Demanda gas sector Residencial en Colombia sep. 2023 a sep. 2024*



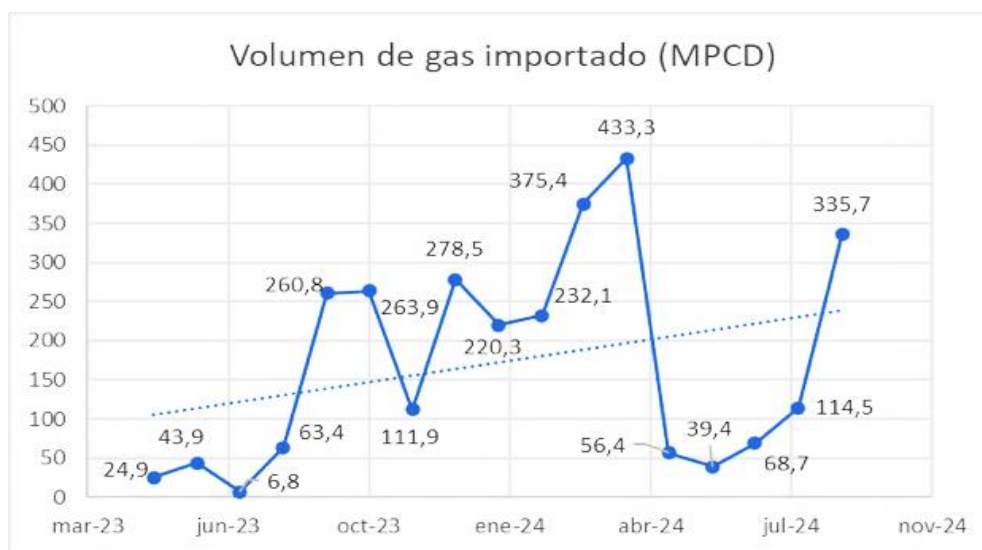
Nota. Datos de ANH Campetrol (2024).

**3.1.5.1.7 Gas importado.** En sep. 2024, la Sociedad Portuaria El Cayao (SPEC) reportó un total de 9.568.229 MPC (335,7 MPCD), lo que representó un incremento del 28,7% respecto al mismo mes de 2023, véase figura 39. En comparación con agosto, las importaciones aumentaron un 193,1% (221,2 MPCD más). Este aumento se debe a la caída de las reservas de los embalses, que pasaron del 60% en julio a 49,98% en septiembre.

De enero a septiembre, el promedio de importaciones fue de 208,4 MPCD, con el mayor volumen importado en abril, alcanzando 433,3 MPCD. Se puede señalar que la importación de gas está ligada al aumento de necesidades de generación térmica, ya señaladas en este apartado pues persiguen las mismas tendencias.

### Figura 39

*Gas importado por Colombia May-2023 a sep-2024*



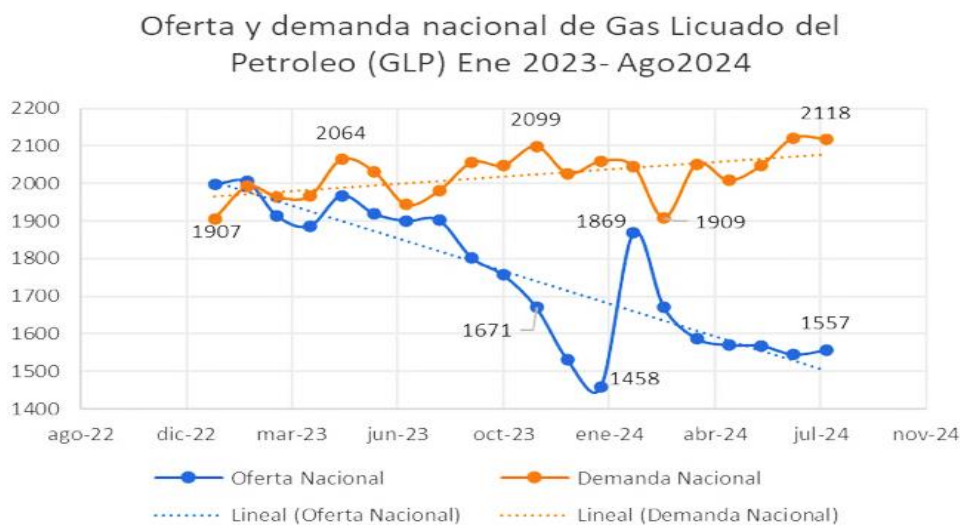
Nota. Datos de ANH Campetrol, (2024).

**3.1.5.1.8 Gas licuado del petróleo (GLP).** Según Campetrol (2024), la oferta nacional del GLP en ago. 2024 fue de 48.254 ton. mensuales, equivalentes a 1.557 ton/día, un 18.2% menos que en el mismo mes de 2023. Entre ene. de 2023 y ago. de 2024, la oferta promedio fue de 1.754,25 ton/día, con el mejor desempeño en feb. de 2023, 2.005 ton/día y el peor en ene. de 2024, 1.458 ton/día. La mayor producción provino del campo Cusiagua 40%, seguido por la refinería de Barrancabermeja 19% y el campo Cusiana 15%. En julio de 2024, se importaron 9.370 ton. para cubrir la demanda.

En cuanto a la demanda, en agosto de 2024 alcanzó las 65.658 ton. /mes (2.118 ton/día), un incremento del 7% respecto al mes anterior, superando la oferta nacional en más de 600 ton/día. La demanda sigue en aumento desde principios de 2023, lo que podría generar escasez y mayor dependencia de las importaciones en el futuro, así se observa las dinámicas de oferta y demanda de este tipo de gas en la figura 40.

#### Figura 40

##### *Oferta y demanda Nacional de Gas Licuado del Petróleo en MPCD*



Nota. Datos de ANH Campetrol, (2024).

El gas natural seguirá siendo un recurso estratégico para la transición energética y la estabilidad del sistema eléctrico colombiano, el creciente volumen de importaciones expone una debilidad estructural en la autosuficiencia energética del país. Resaltando la necesidad de implementar políticas y proyectos que diversifiquen las fuentes energéticas, fortalezcan la exploración y explotación de reservas nacionales, y reduzcan las dependencias internacionales.

### 3.1.6 Principales necesidades encontradas en el sector Gas Natural

La transición energética de Colombia enfrenta grandes retos y oportunidades, especialmente en lo relacionado con la confiabilidad del abastecimiento de gas natural. Para asegurar una oferta estable y sostenible, se han planteado diversos proyectos estratégicos de infraestructura. Dentro de las principales necesidades encontradas por el SIPG, (2024). La Resolución 40304 de 2020 Min. Minas, se expone la necesidad de distintos proyectos que son priorizados, véase figura 41. Se destacan los siguientes 4 proyectos IPAT y 6 proyectos nivel oferta y transporte.

**Figura 41**

*Mapa principales 8 proyectos para la infraestructura de Gas IPAT*



Nota. IPAT: Inversiones en proyectos prioritarios del plan de abastecimiento de gas natural en un sistema de transporte existente. Extraído de UPME X, (2024).

**3.1.6.1 Bidireccionalidad de los tramos de transporte Barranquilla–Ballena y Barrancabermeja–Ballena, e Interconexión de sistemas entre Barranquilla y Barrancabermeja.** El proyecto IPAT del gasoducto para conectar el Valle Inferior del Magdalena -VIM- con el interior en el Magdalena Medio busca mejorar el abastecimiento y la confiabilidad energética del país. Permitirá una conexión entre la Costa Atlántica y el interior a través de diversas fuentes, complementando los tramos Cartagena Barranquilla–Ballena, Barrancabermeja–Sebastopol–Vasconia, con una capacidad proyectada de al menos 400 MPCD.<sup>46</sup> La fecha de puesta en operación -FPO- se estima para el IV trimestre de 2026, con beneficio estimado de \$8.396,51 M.<sup>47</sup> y en costo de \$877 M.

**3.1.6.2 Ampliación capacidad transporte tramo Mariquita–Gualanday.** El proyecto IPAT de la ampliación de la capacidad de transporte en el tramo Mariquita – Gualanday es fundamental para garantizar el abastecimiento continuo de gas natural en la región Tolima-Huila, ya que permite acceder a fuentes externas y suplir la demanda de los nodos conectados al sistema que no puede ser cubierta con la producción local. Los análisis proyectan un aumento de capacidad superior a 20 MPCD al final del horizonte evaluado, impulsado por el crecimiento de la demanda y la disminución de la oferta regional, lo que subraya la necesidad de fortalecer la infraestructura de transporte para asegurar la sostenibilidad del suministro energético. Recomiendan realizar un monitoreo anual de la oferta y la demanda en la región para anticipar posibles desequilibrios y evaluar la pertinencia de nuevas ampliaciones del IPAT previamente adoptado.

**3.1.6.3 Ampliación capacidad de transporte tramo Jamundí hacia Popayán.** Esta ampliación constituye una inversión estratégica como proyecto IPAT para fortalecer el suministro de gas natural en el suroccidente colombiano, abarcando desde el sur del Valle del Cauca hasta el Cauca y sus alrededores dado el incremento proyectado en la demanda y la necesidad de sustituir combustibles ineficientes como la leña, según el Plan Nacional de Sustitución de Leña (UPME

---

<sup>46</sup> MPCD= Millones de Pies cúbicos.

<sup>47</sup> M= Millones de dólares.

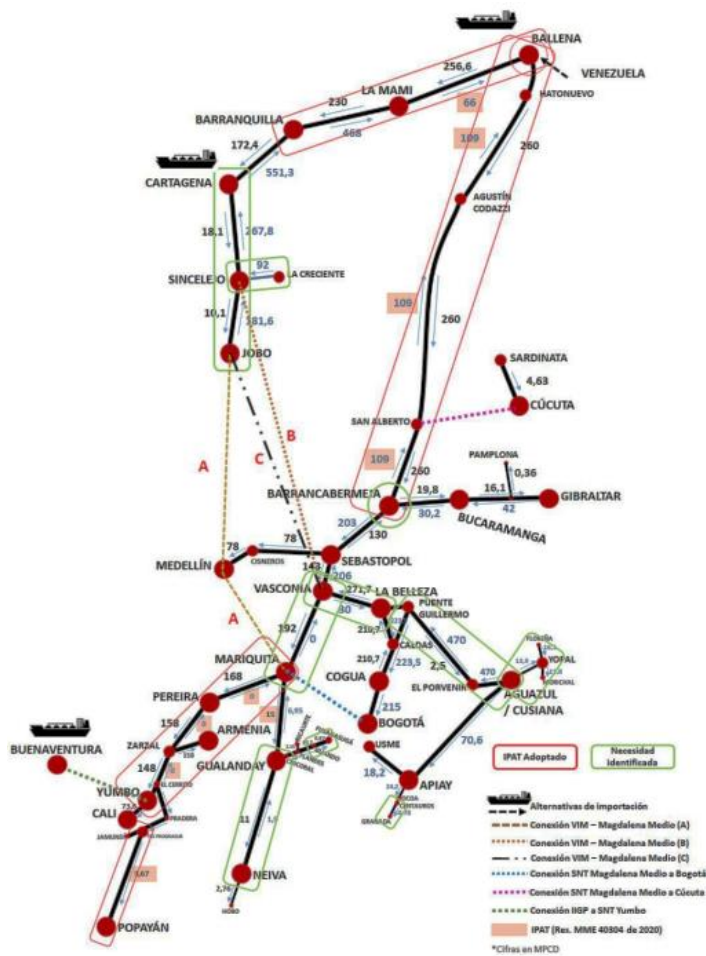
Leña, 2022). Se estima un aumento mínimo de 3 MPCD en Popayán, lo que permitirá mejorar la cobertura y eficiencia energéticas, los registros operativos de 2023 evidencian volúmenes superiores a la capacidad máxima media ponderada (CMMP) en varios períodos, por lo que se necesitan medidas inmediatas para satisfacer la demanda.

**3.1.6.4 Bidireccionalidad entre Yumbo–Mariquita.** La infraestructura bidireccional permite el acceso de gas natural proveniente de la Infraestructura de Importación de Gas del Pacífico (IIGP), establecida en el PAGN 2019-2028 como IPAT lo que fortalece la seguridad de abastecimiento y la confiabilidad en el suministro desde el suroccidente hacia el resto del país. Esto complementa el potencial anillado del sistema, permitiendo abastecer prioritariamente al suroccidente, Tolima-Huila y aguas arriba de Mariquita, así como la evacuación hacia todos los nodos del sistema. A largo plazo, se proyecta un aumento de capacidad superior a 250 MPCD en Mariquita hacia el tercer trimestre de 2036, debido al incremento en los requerimientos derivados de la declinación de fuentes locales (UPME GN, 2024).

Se buscará extender la Bidireccionalidad desde Mariquita hasta Vasconia para garantizar el flujo confiable hacia el norte y el oriente del país. Se recomienda seguimiento continuo a la convocatoria y asignación de inversiones en la IIGP para asegurar la ejecución oportuna de las acciones constructivas necesarias, busca asegurar el suministro de gas para el suroccidente del país ante la reducción de la oferta nacional proyectada. Incluye una planta de regasificación y almacenamiento de Gas Natural (GNL) en Buenaventura, conectada al SNT en Yumbo mediante un gasoducto. Se planea una capacidad de 400 MPCD de regasificación y transporte, y 170,000 m<sup>3</sup> de almacenamiento. Con un beneficio estimado de \$30,764.82 M. y un costo de \$925 M., se proyecta su FPO para enero de 2030. Como proyectos necesarios dentro del sistema de oferta y transporte se destacan los siguientes, visualizar figura 42.

#### **Figura 42**

*Mapa Sistema Nacional con ubicación y necesidades de infraestructura*



Nota. Tomado de (p.97), UPME GN, (2024).

**3.1.6.5 Gasoducto Noroccidente Conexión VIM–Interior.** El proyecto de construcción de un gasoducto que conecte la oferta actual y futura del Valle Inferior del Magdalena (VIM), Sinú-San Jacinto y hallazgos costa afuera del *Clúster* Caribe Sur, junto con gas importado desde la Costa Atlántica hacia el Magdalena Medio, representa una inversión estratégica para optimizar la confiabilidad y resiliencia del SNT de gas natural. La infraestructura proyectada permitirá consolidar la interconexión entre las principales regiones de oferta y demanda del país, promoviendo la redundancia operativa y reduciendo el riesgo de desabastecimiento. Se estimó una

capacidad de transporte no inferior a 400 MPCD, con tres alternativas de conexión: Opción A (Jobo-Antioquia-Mariquita), Opción B (Sincelejo-Coveñas-Vasconia) y Opción C (Jobo-Vasconia).

Esta última se identificó como la alternativa de menor costo de inversión y operación, garantizando flujos superiores a 230 MPCD en el IV trimestre de 2026 y permitiendo mitigar el déficit proyectado para 2030. Aunque ninguna opción estaría disponible antes de 2030, la reconversión de infraestructura de hidrocarburos podría adelantar la FPO para el IV trimestre de 2026, siempre que se establezcan lineamientos regulatorios claros y se realicen análisis técnicos y financieros detallados. Además, la incorporación de conexiones offshore provenientes del Clúster Caribe Sur podría generar una oferta adicional significativa que aseguraría el aprovechamiento pleno de la capacidad en el mediano y largo plazo.

**3.1.5.6 Gasoducto conexión Bogotá-SNT MME tramo Mariquita-Vasconia.** Este es un proyecto estratégico a mediano plazo debido a la alta demanda de gas en la capital. Actualmente, Bogotá no cuenta con una alternativa de seguridad de abastecimiento comparable a la del tramo Cogua-Sabana, y la declinación de la oferta de gas desde los campos de los Llanos Orientales está haciendo insuficiente el abastecimiento local. Este gasoducto, con una capacidad mínima de 215 MPCD y una FPO estimada para el I trimestre de 2030, busca mitigar este déficit. Se proyecta un uso superior a 150 MPCD desde su puesta en operación, lo cual aumentará conforme disminuya la oferta local. El beneficio económico estimado es de US\$14.688,09 millones, frente a un costo de \$209 millones. Además, el flujo de proyectos del Escenario de Recomendaciones, incluyendo la Infraestructura de Importación de Gas del Pacífico (IIGP) y la Conexión VIM-Interior, refuerza la necesidad de este gasoducto, contribuyendo a la confiabilidad y sostenibilidad del suministro en el mediano y largo plazo.

**3.1.5.7 Gasoducto conexión Cúcuta-SNT tramo Barrancabermeja-Ballena.** El gasoducto para conectar a Cúcuta con el SNT en Magdalena Medio es esencial para garantizar abastecimiento y confiabilidad en la región. Actualmente, el sistema aislado conecta la oferta de

campos locales como Tibú y Sardinata, pero no cubre totalmente la demanda. Se prevé que, debido a la declinación natural de los campos productores, la región pierda su autosuficiencia hacia finales de la década. Más de 20 municipios de Norte de Santander, junto con áreas metropolitanas, carecen de servicio de gas natural, lo que hace necesario el suministro desde fuentes externas. El proyecto propone una Conexión con el SNT desde el tramo Ballena– Barrancabermeja, con una capacidad mínima de 8 MPCD. Su FPO está proyectada para el I trimestre de 2030. Los principales beneficiarios serían el nodo de Cúcuta y comunidades sin acceso al gas en Norte de Santander. Este gasoducto tendría beneficio estimado de US\$379,72 M. y un costo aproximado de \$112 M.

**3.1.5.8 Importación en la Guajira con conexión a SNT.** El proyecto de importación de gas natural en la Guajira con conexión al SNT responde a la necesidad de diversificar y ampliar la oferta de gas para cubrir el potencial déficit de suministro en el corto y mediano plazo. Este gasoducto tendrá la capacidad de entregar entre 50 y 150 MPCD, con una disponibilidad de flujo hacia los principales sistemas regionales (costas e interior del país) a partir del I trimestre de 2026. La infraestructura de importación se contempla en dos alternativas: una en estado líquido, que requeriría instalaciones de almacenamiento y regasificación, y otra en estado gaseoso, proveniente de Venezuela a través del gasoducto transnacional Antonio Ricaurte el cual funciona desde el 2007 que tiene una capacidad máxima de 500 MPCD, una extensión de 224 km. y una inversión de US\$335 M.

Si el déficit de oferta local se mantiene, la demanda de importación podría superar los 300 MPCD. Sin embargo, en escenarios con mayor disponibilidad de oferta nacional, los requerimientos de importación serían más moderados. Se proyecta una primera fase con 50 MPCD para el I trimestre de 2026 y una segunda fase con 150 MPCD para el II trimestre de 2029. La competitividad de los precios de importación, en comparación con los precios de oferta nacional, influiría en la contratación y uso de esta infraestructura, promoviendo una mayor adopción del servicio. El proyecto tiene beneficio estimado de US\$6666.50 M. y costo menor indicativo de \$173 M.

**3.1.5.9 Infraestructura Cartagena.** La Infraestructura de importación y regasificación de gas natural en Cartagena, a cargo de la Sociedad Portuaria El Cayao (SPEC), proporciona una solución en el mediano plazo, con oferta de 530 MPCD a partir del IV trimestre de 2031. Se requieren tres fases: fase 1 con 50 MPCD para el II trimestre de 2024, fase 2 con 130 MPCD para el I trimestre de 2027, y fase 3 con 530 MPCD para el IV trimestre de 2031, con beneficio estimado de US\$14188.31M.

**3.1.5.10 Conexión a tierra de proyectos Offshore.** La conexión de los hallazgos de gas natural offshore al SNT es una prioridad en el marco de la Ley 2128 de 2021 (Ley 2128, 2021), que obliga a incluir estos proyectos en el Plan de Abastecimiento. Los proyectos se encuentran en los clústeres de Costa Atlántica (Caribe Norte, Caribe Sur y Aguas Ultra-profundas). Debido a la falta de datos concretos sobre las reservas y decisiones finales de inversión, la UPME ha estimado preliminarmente los costos de referencia para estas infraestructuras. Es crucial que los riesgos asociados con la ejecución de estas obras no sean asumidos exclusivamente por la demanda nacional, ya que algunos proyectos podrían no ejecutarse o resultar subutilizados. Se propone que los productores de gas offshore implementen mecanismos de garantía para cubrir estos riesgos, similar a lo que ocurre con las líneas de transmisión del SNT. La UPME recomienda avanzar con las obras terrestres necesarias para conectar estos proyectos offshore al SNT.

### **3.2 Tecnologías de gasificación**

Es un proceso que transforma materiales carbonosos, como carbón, biomasa o residuos sólidos, en gas de síntesis (Monóxido de Carbono CO, Hidrogeno H<sub>2</sub>, Metano CH<sub>4</sub>). Este gas puede usarse para generar electricidad, calor o combustibles líquidos como diésel y metanol, a través de procesos como el reformado de gas natural con vapor o hidrocarburos líquidos.

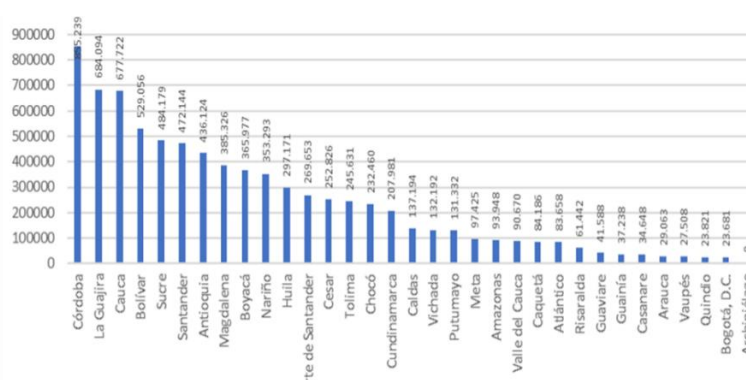
#### **3.2.1 Panorama Nacional**

La necesidad de expansión de la infraestructura de gas debe ir de la mano del desarrollo de alternativas como las tecnologías de gasificación que ofrecen beneficios económicos y ambientales al sustituir estos combustibles por opciones más limpias, no es concebible, que siendo La Guajira

uno de los territorios más explotados en hidrocarburos condene a sus poblaciones a cocinar con desechos, leña y materiales a igual que es tipo de cocción representan a un grueso de la población, fenómenos que reflejan la falta de implementar el servicio de gas en la Colombia profunda donde conviven nuestros indígenas y campesinos.

**Figura 43**

*Emisiones CO2 eq. (toneladas) uso de leña para cocinar, por departamento*

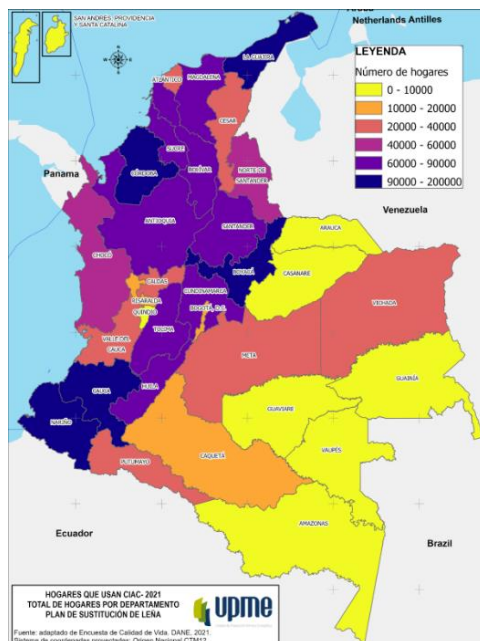


Nota. Tomado de UPME, (2022).

El 91.51% de la población que cocinó con leña u otros Combustibles de uso Ineficiente y Altamente Contaminantes (CIAC) en el año 2021 fue la rural y el 8.49% es urbana, según el DANE 81.65% de los que usaron CIAC se consideran campesinos, ese año los departamentos con mayor número de hogares fueron Bolívar 23.072, Atlántico 12.741, Magdalena 12.236, Córdoba 11.561, Sucre 10.859, La Guajira 10.174 y Bogotá 10.080, véase figura 43. En Colombia, 5,31 millones de personas (10,6% de la población) cocinan con CIAC, lo que genera riesgos ambientales y de salud (Angulo et al., 2023). Cerca del 34% (1'809.621 personas) estarían en el rango de primera infancia, infantes y adolescentes, de los cuales 5% (265.864 personas), mientras que cerca del 12% (678.159 personas) corresponden a mayores de 60 años. Del total fueron 2.736.254 (51%) hombres (UPME Leña, 2022). Véase figura 44.

## Figura 44

*Mapa número de hogares que cocinan con CIAC año 2021*

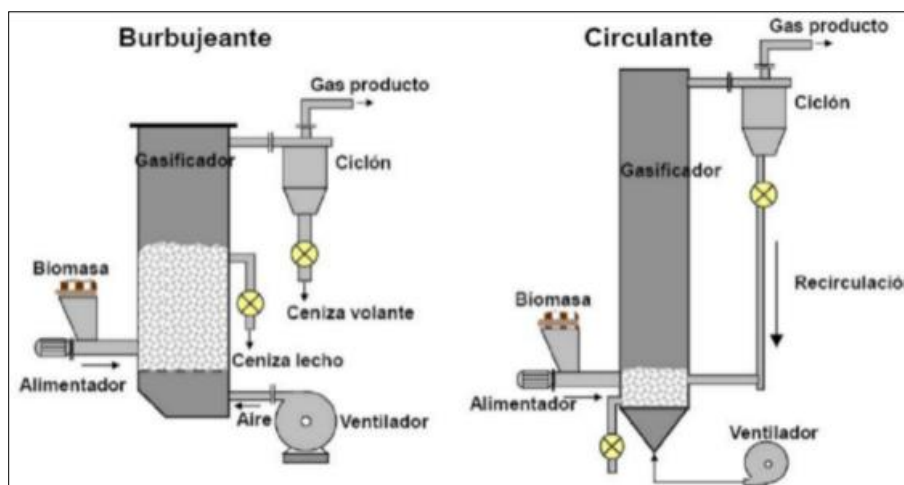


Nota. Extraído de (p.6), UPME, (2022).

La UPME proyecta que para 2050 todas las familias colombianas tendrán acceso a fuentes eficientes como gas natural, biogás, GLP, energía eléctrica o un uso más eficiente de la leña, se propone como estrategia alternativa instalar gasificadores para residuos aprovechables, como papel, madera, basura orgánica, plásticos y desechos agrícolas. Los gasificadores pueden ser de lecho fijo, lecho fluidizado o flujo ascendente, cada uno con ventajas según eficiencia, flexibilidad de combustibles y operatividad. Véase figura 45.

## Figura 45

*Gasificadores de lecho fluidizado*



Nota. Extraído de (p.22), Rivera (2018).

El gas de síntesis obtenido de la gasificación permite generar diversas formas de energía: electricidad mediante motores de gas o ciclos de vapor; calor para procesos industriales; biocombustibles líquidos mediante el proceso *Fischer-Tropsch*;<sup>48</sup> gas natural bio-sintético para transporte; gas natural sintético mediante metanización, e hidrógeno purificado a partir del gas de síntesis.

En diversos estudios han demostrado la viabilidad de proyectos de gasificadores con diferentes combustibles: Ortiz Flórez, (2010) destacó el alto poder calorífico de la cuesca de palma africana como insumo para procesos de gasificación; Rubio, et al., (2011), evaluaron la eficiencia de un gasificador usando madera residual en la Universidad Nacional; y Castiblanco y Milquez, (2021) simularon un gasificador con captura de CO<sub>2</sub> para producir hidrógeno gris a partir de carbón colombiano, lo que podría aportar alternativas transitorias mientras las tecnologías finales y más limpias se mejoran y se instalan en el país, dando versatilidad al suministro del hidrogeno en corto y mediano plazo y usos al carbón. Este último es relevante, dado que Colombia tiene importantes

<sup>48</sup> El proceso *Fischer Tropsch* se refieren a una variedad de procesos similares que dependen de la química catalítica de reacciones que producen hidrocarburos líquidos a partir de gas de síntesis, (Wang & Economides, 2009).

reservas de carbón, lo que convierte la gasificación en una alternativa energética frente a la volatilidad de los mercados y altos costos de importación de combustibles.

**3.2.1.1 Caso de estudio: La Guajira.** Con 1.017.121 habitantes y 15 municipios, es el segundo departamento más pobre de Colombia, con un índice de pobreza monetaria del 65,3% y un PIB per cápita de US\$4.413 (DANE, 2023). Entre las principales causas de su situación, se incluyen la falta de infraestructura, educación, empleo formal y servicios básicos, junto con una alta desigualdad y dependencia económica del sector minero, que aporta más del 50% del PIB del departamento. Sin embargo, de las empresas registradas en la región, solo 35 están vinculadas a la minería, reflejando una marcada concentración de la riqueza.

El Cerrejón, una de las minas de carbón a cielo abierto más grandes del mundo, es el motor económico del departamento, lo que complica los planes de descarbonización. La gasificación del carbón aparece como una solución que permite transformar este recurso en energías limpias como gas de síntesis, hidrógeno o electricidad, alineándose con la transición energética. Se propone la instalación de gasificadores en municipios como Albania, Barrancas y Hatonuevo, ubicados en el área del Cerrejón, para aprovechar los residuos mineros y generar un producto energético más elaborado, reduciendo la explotación directa del carbón.

El uso de combustibles ineficientes y contaminantes como la leña afecta a gran parte de la población, obligando a más del 65% de los hogares a depender de estos materiales para cocinar, lo que genera altas emisiones de CO<sub>2</sub> y problemas de salud pública. Para abordar este problema, se sugiere la implementación de plantas de gasificación, donde las familias puedan intercambiar desechos, carbón o leña por gas o electricidad. Entre los principales desafíos se encuentran los altos costos iniciales de infraestructura, la falta de personal técnico calificado y la necesidad de lograr la aceptación de las comunidades locales.

### **3.3 El Carbón**

Aunque parezca contradictorio desempeña un papel fundamental en la transición energética de Colombia, no solo como fuente primaria para la generación de energía, sino también como

insumo clave en diversas industrias que están adoptando medidas para reducir sus emisiones. Según Díaz (2023), el carbón es esencial para la producción de cemento (que contiene un 40% de carbón) y acero, utilizado en la fabricación de turbinas eólicas, con 240 toneladas de carbón necesarias para la fabricación de acero para cada turbina. En la industria del cemento, por ejemplo, el carbón se utiliza para alcanzar las altas temperaturas requeridas en los hornos de casi 1500 °C.

En la industria del acero, el carbón, específicamente en forma de coque, es crucial para la producción de acero en altos hornos. A medida que las empresas adoptan tecnologías de *co-firing* o procesos de producción más eficientes, el uso de carbón puede ser optimizado, permitiendo reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, en la industria alimentaria, aunque el carbón no es tan prevalente, se emplea en algunos procesos de ahumado y producción de energía térmica, como en el uso del biogás o el aprovechamiento de residuos orgánicos como en el caso de la caña de azúcar donde un porcentaje del proceso lleva consigo carbón para mejorar eficiencias y rendimientos.

Así, el carbón, a pesar de ser una fuente de emisiones, juega un papel en la transición hacia modelos industriales más sostenibles, en especial en procesos de biomasa, siendo clave para alcanzar objetivos de reducción de huella de carbono y mejorar la eficiencia de los procesos de cogeneración. Jiménez N.G., (2024), expone que, en el ámbito interno, la demanda en 2024 a nivel nacional de carbón se estima en aproximadamente 8 millones de ton., presionada por la situación del fenómeno de El Niño, lo que ha llevado a las centrales termoeléctricas a operar a plena capacidad, consumiendo alrededor de 500 mil toneladas mensuales.

### ***3.3.1 Tipos de carbón en Colombia***

En 2024, Colombia fue el (5) exportador mundial de carbón exportó más de 64 millones de toneladas (MT) de carbón y coque, generando ingresos superiores a USD 7 mil millones FOB, lo que representa el 14% de las exportaciones nacionales, aunque con una disminución del 22%

en valor frente al año anterior. Los volúmenes exportados crecieron un 7,5%, en un contexto global donde la demanda de carbón alcanzó un récord de 8.770 MT.

**3.3.1.1 Carbón térmico.** A nivel global, las exportaciones de carbón térmico alcanzaron 1.080 millones de toneladas en 2024, con Indonesia, Australia, Rusia, Colombia y Sudáfrica controlando el 81% del mercado. En Europa, la demanda de carbón disminuyó un 20% en comparación con 2023, alcanzando solo 85 millones de toneladas. Debido a los costos elevados de la transición energética, algunos países, como Alemania y Polonia, podrían reactivar la generación térmica a carbón en 2025 se prevé que el consumo mundial de carbón se ubique alrededor de las 8.770 millones de toneladas y se mantenga sobre este rango hasta el 2028 (FenalCarbon, 2025).

Asia sigue dominando la demanda mundial de carbón térmico, con China e India como los principales consumidores. En 2024, China incrementó un 2% su generación térmica a pesar de haber aumentado su uso de energías renovables y su generación hidráulica. India, por su parte, aumentó su demanda de carbón importado en unos 70,4 millones de toneladas respecto a 2023, debido a la baja calidad de su carbón nacional y sus planes de expansión en sectores como el acero y el cemento. A pesar de la caída de la demanda en Europa, el consumo asiático compensó ampliamente esta disminución, aunque los precios del carbón bajaron tras el impacto geopolítico de la invasión rusa a Ucrania.

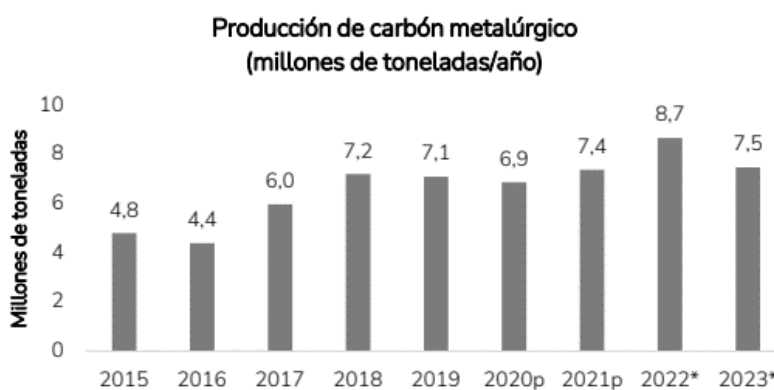
Colombia se mantiene entre los cinco mayores exportadores de carbón térmico, con 58,9 MT exportadas, un aumento del 8% respecto a 2023, ubicándose detrás de Indonesia, Australia y Rusia. Los principales destinos del carbón térmico colombiano fueron Corea del Sur, Turquía y China, *Drummond* sigue siendo el mayor exportador de carbón térmico de Colombia con el 52% del total en 2024, seguido de Cerrejón con el 34%. Prodeco alcanzó a movilizar 3,2 millones de toneladas en 2024, comparadas con los 2 millones de toneladas en 2023, debido a una mayor utilización de su capacidad ferroviaria y portuaria con carga de productores del interior como principales empresas exportadoras.

**3.3.1.2 Carbón metalúrgico.** Es una roca sedimentaria, considerada estratégica, tiene mayor poder calorífico, menor contenido de humedad, mayor contenido de carbono y carácter aglomerante que otros tipos de carbón, lo que permite su coquización cuando se somete a altas temperaturas en ausencia de aire, sufre una serie de reacciones químicas obteniéndose un sólido conocido como coque. Los departamentos del centro-oriente de Colombia concentran la mayor parte de la producción nacional del mineral, siendo los de mayor potencial de carbón metalúrgico los departamentos de Boyacá (45%), Cundinamarca (26%), Norte de Santander (24%) y Santander (5%), son también las regiones con más yacimientos productivos a corte del 31 de octubre de 2024.

La explotación de este recurso está orientada principalmente al consumo interno (84%), donde su principal uso es la producción de coque para la industria siderúrgica. Existen 961 títulos vigentes que contienen carbón metalúrgico como mineral, correspondientes a 499.054 hectáreas. 914 de los títulos (95%) están en etapa de explotación, 3% en etapa de construcción y montaje y 2% en exploración, son mayormente en pequeña minería el 70% y 24% mediana minería, el restante para grandes y sin datos, véase la producción de carbón metalúrgico en la figura 46.

**Figura 46**

*Producción Nacional de carbón metalúrgico*



Nota. Tomado de (p.35), UPME Anexo 4, (2024).

Las exportaciones de carbón metalúrgico colombiano alcanzaron 1,7 millones de toneladas, mostrando una reducción interanual del 14,3% debido a huelgas de transportadores y menores precios, siendo China el principal destino 45%, seguido de Corea del Sur 14%, Brasil 12%, Japón 6% e India 6%. Las mayores empresas exportadores de este tipo de carbón fueron las empresas Trafigura, *Bulk Trading*, Camco y Coquecol (FenalCarbon, 2025).

**3.3.1.3 Coque.** La coquización consiste en un proceso de pirolisis al carbón metalúrgico, el cual pretende eliminar la materia volátil, convirtiéndolo en un material fuerte y poroso. Normalmente, de 1 tonelada de carbón se producen 0,65–0,73 toneladas de coque y de 5 a 10% de residuos. De este producto se hace el grafeno, la fibra de carbono, los filtros de agua y aire, es necesario para la fabricación de electrodos para las baterías de iones de Litio y supercapacitores, así como la producción de nanotubos de carbono -NTC-, que son estructuras químicas nanométricas que se están utilizando en biosensores biológicos para la detección de proteínas en medicina, así como su aplicación en la lucha microbiana, como la distribución directa de medicamentos gracias a su casi nulo efecto tóxico para el ser humano (Andrade et al., 2012).

Es el quinto producto de exportación de Colombia y el principal producto industrial en el exterior. Las exportaciones en 2024 fueron 3,9 millones de toneladas. en volumen por 3,9 MT, por valor de \$1.093,5 millones FOB (FenalCarbon, 2025). Sus principales destinos fueron Brasil, Irlanda y Turquía. México dejó de ser un destino importante debido al cierre por quiebra de AHMSA (Altos Hornos de México),<sup>49</sup> que importaba más de 130 mil toneladas anuales de coque

---

<sup>49</sup> Altos Hornos de México (AHMSA), fue una siderúrgica que alguna vez dominó la industria del acero en México, ha cerrado sus puertas tras declararse en quiebra en 2023 debido a su acumulada deuda de 5.000 millones de dólares. Fundada en 1942, la empresa pasó a manos privadas en 1991 bajo el control del Grupo Acerero del Norte, liderado por Alonso Ancira, quien, pese a múltiples crisis financieras y acusaciones de corrupción, logró reactivar la empresa en los años 2000. A pesar de eso, la caída de los precios del acero y su involucramiento en el escándalo de *Odebrecht* marcaron el fin de la siderúrgica, que no pudo superar sus problemas financieros y operativos. En 2023, la empresa dejó de operar y sus 1.700 trabajadores quedaron en incertidumbre, mientras que los intentos por encontrar un rescate fueron infructuosos. La quiebra de AHMSA cierra una era para la industria del acero en México, dejando un legado de corrupción y deuda que amenaza con ser cubierto solo en un 20-30% a través de la venta de activos (Suárez K. , 2024).

desde Colombia (Jiménez, 2024). Colombia se ha consolidado como uno de los principales exportadores de coque a nivel mundial, ocupando el tercer lugar después de China y Polonia (UPME Anexo 4, 2024).

Uno de los principales problemas en la producción de coque radica en los elevados costos de transporte terrestre, agravados por la deficiente infraestructura vial. Se han explorado la posibilidad de utilizar el tren para movilizar el coque hasta el puerto de Santa Marta esta alternativa presenta múltiples retos. El tipo de trocha ferroviaria actual no está diseñado para el transporte eficiente de coque, lo que exige múltiples traslados intermedios que pueden afectar tanto el tamaño como la calidad del producto, por lo que requiere de infraestructura en este sector para mejorar la eficiencia del mismo así la calidad del carbón se mantiene y se logra una mayor eficacia en la extracción lo que se traduce en mejores resultados económicos, menor impacto en emisiones.

Aunque se presentan serias críticas derivado de los altos costos energéticos de la coquización, proceso que requiere temperaturas superiores a 1300°C., ha llevado a algunas empresas a desarrollar estrategias para reducir estos costos, espacios donde las nuevas tecnologías y el aprovechamiento de sistemas de economía circular están ocupando un papel impulsador que permita reducir el impacto ambiental de este sector industrial.

En este escenario, la transición energética implica la necesidad de transformar la producción de carbón hacia opciones más sostenibles que permitan a Colombia mantenerse competitivo mientras avanza hacia un futuro más sostenible y menos dependiente de fuentes no renovables, aprovechando el carbón para la mejora de procesos y como estrategia para garantizar el suministro y estabilidad eléctrica para situaciones de presión de los sistemas hidroeléctricos, como las sequías o el fenómeno del ‘niño’ las mejoras de las rutas ferroviarias y su inmersión en la Colombia rural puede generar desarrollos económicos que pueden jalonar territorios antes olvidados.

### 3.4 Tecnologías de captura y almacenamiento de Dióxido de Carbono CO<sub>2</sub>

La captura de CO<sub>2</sub> implica un proceso de separación de este gas presente en diversas fuentes de emisión, como las centrales térmicas de carbón, el gas, cementeras, refinerías de petróleo, siderúrgicas o la industria petroquímica. Una vez separado de su fuente de generación, el CO<sub>2</sub> debe ser transportado e inyectado en un sitio de almacenamiento final, el cual puede estar constituido por formaciones geológicas u otras estructuras. Un ejemplo de esto es el uso de pozos petroleros en fase de cierre.

La aplicación de estos procesos resulta cada vez más urgente debido a fenómenos como los que menciona, Roca (2024), que:

“...las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector energético crecieron un 1,1% en 2023 debido a que las renovables no cubren totalmente el crecimiento de la demanda, el uso global de energía renovable aumentó en un 58% entre 2012 y 2022, pero la demanda energética general también creció un 16% durante este período. El aumento de la demanda ha sido cubierto principalmente por carbón, petróleo y gas fósil, que juntos representaron alrededor del 65% del crecimiento del consumo de energía entre 2012 y 2022, ... (p.1)”.

En esta misma línea, Houston CCS Alliance (2022), enfatiza que:

“..., la captura y almacenamiento de carbono (CAC) es una tecnología segura y probada que reduce las emisiones industriales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros gases de efecto invernadero (G.E.I.). Funciona capturando las emisiones de CO<sub>2</sub> que, de otro modo, se liberarían a la atmósfera, transportándolas a un lugar de almacenamiento, ... (p. 1)”.

El objetivo de la captura de CO<sub>2</sub>, según CAIA Ingeniería (2022), es que:

“..., este CO<sub>2</sub> se usará de hasta 3 maneras. La primera es su bombeo por medio de tuberías hasta un reservorio geológico con condiciones que aseguren una retención impermeable por varios años (siglos). La segunda es usar el gas para mejorar la recuperación de petróleo en pozos antiguos y luego mantenerlo bajo tierra y finalmente la última es usar el CO<sub>2</sub> purificado para procesos

químicos o hacer insumos para las industrias de bebidas, alimentos y construcción. Últimamente han aparecido opciones para usar este gas en invernaderos y generación de biocombustibles, ... (p.12)".

A continuación, se describen las principales tecnologías necesarias para la captura de CO<sub>2</sub>. En primer lugar, se abordarán las tecnologías de precombustión, las cuales permiten la captura del gas antes de su combustión. Se discutirán los distintos tipos de tecnologías en esta categoría, así como sus principales absorbentes. Posteriormente, se analizará la tecnología de oxycombustión, incluyendo sus características y aplicaciones. Finalmente, se examinarán las tecnologías de postcombustión. Este recorrido permitirá comprender las principales necesidades y desafíos para el desarrollo y aplicación de estas tecnologías en el contexto nacional.

### **3.4.1 Pre-combustión**

Los procesos de captura de CO<sub>2</sub> previa a la combustión se enfocan en transformar el combustible primario en una corriente de gases compuesta principalmente de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>. Estos gases pueden ser separados mediante tecnologías específicas para su posterior captura y almacenamiento. Este proceso se divide en dos grandes etapas: la creación de las corrientes de gas y el tratamiento de esas corrientes. Antes de la combustión, estas tecnologías permiten tratar los combustibles para reducir los contaminantes y mejorar su calidad. El proceso comienza con la descarbonización del combustible, separando el CO<sub>2</sub> y dejando el hidrógeno (H) listo para su combustión. Entre las técnicas utilizadas más conocidas están el reformado con vapor de agua – SMR-, la oxidación parcial, el reformado auto-térmico -ATR-, y la gasificación del carbón.

El SMR, que es uno de los procesos más comunes, requiere un aporte de calor exterior mediante un mechero que generalmente quema gas natural. Este proceso ocurre en reactores tubulares donde los hidrocarburos reaccionan con vapor a alta temperatura y presión en presencia de un catalizador metálico, típicamente de níquel, lo que produce gas de síntesis. Este gas está compuesto principalmente de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H<sub>2</sub>). El CO luego se convierte en CO<sub>2</sub> en la corriente de gas, separándose del hidrógeno (H), que puede ser utilizado

para la producción de energía o hidrógeno, dependiendo de los objetivos del proceso y la empresa (Nuevo, 2024).

El reformado de metano con vapor es el proceso más utilizado para producir hidrogeno (H), representando este método el 84% del total mundial se resalta en Roca, (2023) también se emplea la oxidación parcial (POX), que es menos eficiente, pero, permite usar una mayor variedad de combustibles y requiere reactores más pequeños. El reformado auto-térmico (ATR), que se espera represente el 37% del mercado en 2030, ofrece una mayor eficiencia energética y capacidad de captura de CO<sub>2</sub>, aunque requiere una inversión inicial considerable.

La gasificación del carbón, que produce hidrógeno con captura de CO<sub>2</sub>, representa el 13% del hidrógeno producido, pero su alto costo y largo periodo de recuperación solo lo hacen viable para centrales que operarán durante varias décadas. Estos procesos son fundamentales para la captura, almacenamiento y comercialización de CO<sub>2</sub> e hidrógeno, aunque requieren insumos, altas temperaturas y procesos complejos (Roca, 2023). Todos estos procesos son alternativas y opciones y representan la primera parte para obtener una corriente de gas rica en CO<sub>2</sub> y/o H<sub>2</sub>.

La pre-combustión, utiliza métodos avanzados que se detallan como la adsorción por cambio de presión (PSA), separación criogénica, absorción física y uso de membranas; la oxi-combustión, basada en la combustión con oxígeno puro facilita la captura de CO<sub>2</sub>; y la postcombustión, que emplea técnicas como la absorción química mediante reactivos como monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA) y metildietanolamina (MDEA). Estas estrategias representan soluciones integrales para lograr la captura en diferentes etapas del proceso energético. A continuación, se desarrollan brevemente estas tecnologías y algunos de sus insumos.

**3.4.1.1 Pressure Swing Adsorption (PSA).** En este proceso se usan absorbentes que inducen selectivamente a la adsorción del CO<sub>2</sub>, luego se reduce la presión y se des-absorbe el CO<sub>2</sub> adsorbido. Se usa corriente de presión moderadas (10-250 psi),<sup>50</sup> y concentraciones superiores

---

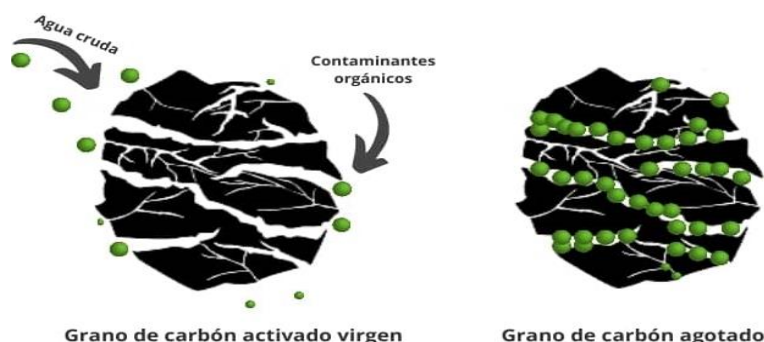
<sup>50</sup> Psi = *Pounds per Square Inch*, (libras por pulgada cuadrada).

a 40% mol,<sup>51</sup> de CO<sub>2</sub>. No se recomienda temperaturas superiores a 150°C. Se recupera el 80% del H<sub>2</sub>. Los principales absorbentes utilizados son el carbón activado, las zeolitas, y más recientemente los marcos metal-orgánicos MOFs, entre otros, que se describen brevemente a continuación.

**3.4.1.1.1 Carbón Activado.** Es un absorbente poroso utilizado principalmente en la captura de CO<sub>2</sub>, con una estructura compuesta de cadenas de átomos de carbono e hidrógeno. Su alta efectividad y bajo costo lo convierten en un purificante ampliamente utilizado, véase figura 47, especialmente para la potabilización del agua, tratamiento de aire, y en procesos industriales como la refinación del azúcar y la producción de oro. Además, su capacidad de adsorción varía entre 600 a 800 m<sup>2</sup>/g,<sup>52</sup> lo que lo hace especialmente útil para capturar compuestos orgánicos, toxinas, y otros contaminantes.

### Figura 47

#### *Funcionamiento del carbón activado*



Nota. Tomado de Carbotecnia, (2024).

<sup>51</sup> Mol=Cantidad de sustancia de un sistema que contiene el mismo número de entidades elementales que el número de átomos presentes en 0,012 kilogramos de carbono-12 (Ewert, 2024).

<sup>52</sup> m<sup>2</sup>/g = metros cuadrados por gramo.

A nivel comercial, el carbón activado representó un comercio por valor de \$3.6 M.M.<sup>53</sup> en exportaciones a nivel mundial, con un crecimiento interanual del 17.4% entre 2021 y 2022. Los principales exportadores fueron China US\$759 M., y Estados Unidos \$473 M., mientras que los principales importadores fueron Estados Unidos \$346 M., Alemania \$292 M. y Corea del Sur \$200M.

En el caso de Colombia, se exportó US\$1.9 M. de carbón activado en 2022. Sus principales destinos fueron Alemania \$476k., Brasil \$363k., y Venezuela \$181k. En cuanto a importaciones, Colombia adquirió \$13.3 M. en carbón activado. Los principales países de origen fueron China \$5.22 M., México \$2.44 M., y Chile \$1.51 M, (OEC, 2022). Es decir, el país cafetero importa 7 veces más este material de lo que lo exporta. Esto refleja el potencial de los países latinoamericanos para cubrir las necesidades de Colombia en este material, lo que podría generar una reducción de costos mediante relaciones comerciales regionales amigables y crear alianzas estratégicas con países vecinos que mejorarían la integración técnica y de políticas.

**3.4.1.1.2 Zeolitas.** Son aluminosilicatos de metales alcalinos o alcalino-terrosos, predominantemente de sodio (Na) y calcio (Ca), tienen una estructura cristalina tridimensional compuesta por tetraedros de tipo TO<sub>4</sub> (T = Si, Al, B, Ge, Fe, P, Co, entre otros), unidos en los vértices por átomos de oxígeno, (Boer, et al., 2023). Son muy populares como material absorbente debido a su estructura microporosa y su capacidad de intercambio catiónico,<sup>54</sup> lo que les confiere una notable capacidad de adsorción de CO<sub>2</sub>, con una capacidad que varía entre 0.9 a 1.4 mmol /g<sup>55</sup> (Shivaji & Alan L. , 2003).

---

<sup>53</sup> M.M.=Miles de Millones de dólares. M= Millones de dólares. K= Miles de dólares.

<sup>54</sup> La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es una medida de cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo (arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas) y representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener (Ca, Mg, Na, K, NH<sub>4</sub> etc.). Estos serán intercambiados por otros cationes o iones de hidrogeno presentes en la solución del suelo y liberados por las raíces. El nivel de CIC indica la habilidad de suelos a retener cationes, disponibilidad y cantidad de nutrientes a la planta, su pH potencial entre otras. Un suelo con bajo CIC indica baja habilidad de retener nutrientes, arenoso o pobre en materia orgánica (FAO, 2024).

<sup>55</sup> 1 mmol = Peso atómico del elemento expresado en mg; 1 mEq= 1 mmol / valencia.

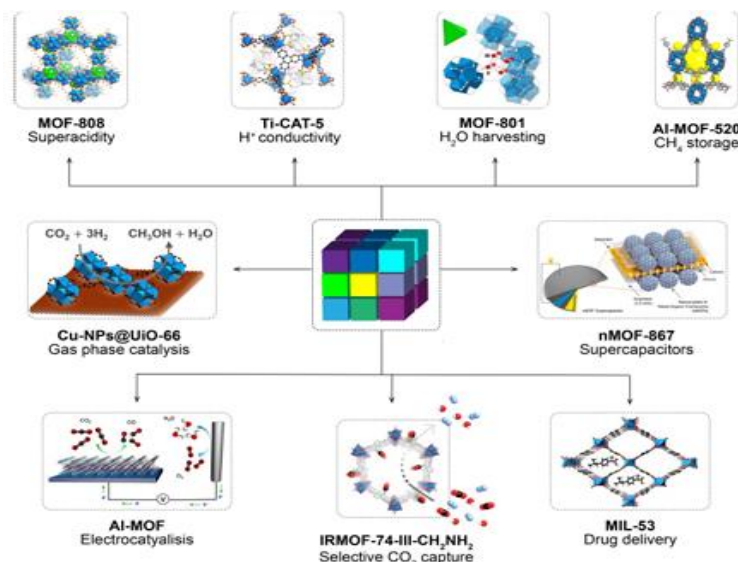
Además de su uso en la captura de CO<sub>2</sub>, las zeolitas se emplean en aplicaciones industriales como la remoción de metales pesados en efluentes minero-metalúrgicos, el drenaje de ácidos de mina y roca, la adsorción de vapores de mercurio en hornos quemadores de amalgamas en la producción de oro, y en el tratamiento de suelos afectados por radiación y licores provenientes de centrales nucleares. Existen más de 40 especies naturales de zeolitas, (Curi, et al., 2006).

En Colombia, las zeolitas son consideradas un material estratégico no solo para la captura de CO<sub>2</sub>, sino también para aplicaciones como la separación de oxígeno y nitrógeno para hospitales, la separación de etanol para obtener alcohol que se mezcla con gasolina, y la separación de parafinas para mejorar el octanaje del combustible. Se estima que más de 1400 toneladas de zeolitas son consumidas diariamente en diversas industrias. Sin embargo, en Colombia no se sintetizan zeolitas y todos los catalizadores deben ser importados. Actualmente, el costo de un kilogramo de zeolitas puede alcanzar los US\$3, (UNAL, 2015).

**3.4.1.1.3 Marcos Metal-Orgánicos (MOF – Metal Organic Frameworks).** Son estructuras cristalinas formadas por bloques orgánicos e inorgánicos que tienen propiedades robustas de absorción. Están compuestos por ligandos orgánicos y metales de transición, lo que les permite una amplia gama de aplicaciones debido a su alta estabilidad termoquímica, porosidad y capacidad de almacenamiento, entre otras (Rizo et al., 2021). Resaltan Ashling et al., (2021), que existen más de 99,000 MOF únicos se han descrito en la literatura, muchos con superficies excepcionales que pueden llegar hasta 7500 m<sup>2</sup> por gramo, con un límite estimado de 16,000 m<sup>2</sup>, véase algunos ejemplos en la Figura 48.

#### **Figura 48**

*Representación química y usos para distintos MOF's*



Nota. Tomado de (p.1), Tuninetti, (2019).

Los MOF se usan en tecnologías de captura de Carbono, destacando por su alta capacidad de trabajo con CO<sub>2</sub> y su eficiencia energética, reduciendo hasta 2.7 veces el consumo energético en comparación con tecnologías tradicionales (López Sánchez, 2018). Se aplican en la mejora del biogás, purificación de gases, separación de gases y la captura de agua atmosférica, siendo más eficientes que otros materiales como las zeolitas o el carbón activado (NovoMOF, 2024).

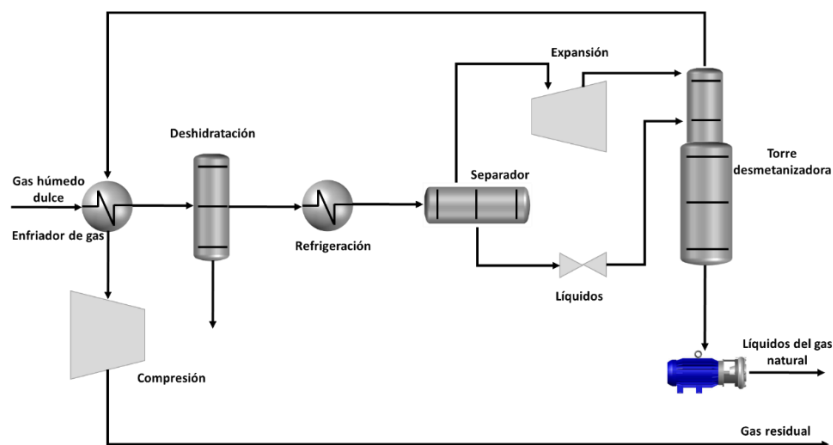
Los MOF se utilizan en almacenamiento de energía, especialmente en baterías de iones de litio, en la industria farmacéutica para la liberación controlada de medicamentos, en sensores para la detección de gases y contaminantes, y en catálisis debido a su alta selectividad. Los principales tipos de MOF incluyen HKUST-1, fumarato de aluminio, MOF-303, MIL-100(Fe), MOF-801 y UiO-66, que tienen diversas aplicaciones como adsorción de gases, aplicación de medicamentos contra el cáncer, purificación de agua y almacenamiento de energía. En Colombia, los Marcos Metal-Orgánicos (MOF) representan una oportunidad estratégica para avanzar en la transición energética, gracias a su versatilidad en aplicaciones como la captura de carbono, la mejora del biogás y el almacenamiento de energía.

Su desarrollo y adopción requieren un enfoque decidido en investigación científica, académica y tecnológica que permita adaptarlos al contexto local, siendo una puerta de oportunidades que da espacio para la ya muy conocida en la literatura como la ‘triple hélice’ entre la academia, industria y el Gobierno, porque para el desarrollo de estas materias esenciales se necesita del impulso público-privado que enganche las necesidades industriales con el apoyo y regulaciones públicas que faciliten su investigación e implementación para hacer realidad la captura de CO<sub>2</sub> en nuestro país.

**3.4.1.2 La separación criogénica.** Otra de las tecnologías de pre combustión es la separación criogénica consiste en separar CO<sub>2</sub> condensándolo a bajas temperaturas (-50 a -135 °C) y altas presiones (100-200 atm) para producir CO<sub>2</sub> líquido apto para almacenamiento y transporte en barcos o camiones. El proceso incluye compresión, enfriamiento, expansión y posterior destilación o desmetanización, véase el proceso general en la figura 49.

**Figura 49**

*Proceso de la Tecnología de separación Criogénica*



Nota. Tomado de Pérez Ruiz, (2019).

Aunque comercialmente disponible, no se implementa a gran escala debido a su alto consumo energético y a la necesidad de retirar componentes como el agua para evitar bloqueos del sistema. Es útil también en la producción de H<sub>2</sub> líquido, pero requiere cantidades significativas de electricidad (Dufour y Rodríguez, 2012). Aunque en compaginación con fuentes como las hidroeléctricas, el gas natural entre otras que podrían solventar estas necesidades logrando poder ofrecer al mercado un hidrogeno competitivo, cuestiones que requieren de estudios técnicos y de viabilidad.

**3.4.1.3 Absorción física.** Es otra tecnología para capturar CO<sub>2</sub> basada en su alta solubilidad en líquidos específicos como Selexol (dimetiléter y propilenglicol) y Rectisol (metanol a -40 °C). Esta tecnología es adecuada para industrias con corrientes de gas a alta presión. Sus ventajas son el bajo consumo de calor para regenerar el solvente. Flexibilidad en la desorción mediante calor o presión, (destilación *flash*).<sup>56</sup> Eficaz en corrientes de alta presión y en la eliminación de trazas de compuestos no deseados como hidrocarburos pesados y compuestos sulfurados. Requiere mayor número de unidades de operación. Uso de materiales específicos como acero al carbón, lo que puede aumentar los costos iniciales, aun así es una estrategia y método utilizable en la industria petroquímica para capturar CO<sub>2</sub>.

**3.4.1.4 Las membranas.** Son una tecnología avanzada para la captura de CO<sub>2</sub> basada en la separación de gases mediante una capa semipermeable que opera bajo diferencias de presión, temperatura o potencial eléctrico, véase la Figura 50. Este sistema divide la corriente en dos flujos: el permeado, que atraviesa la membrana, y el retenido, que se separa. Su eficacia depende de dos

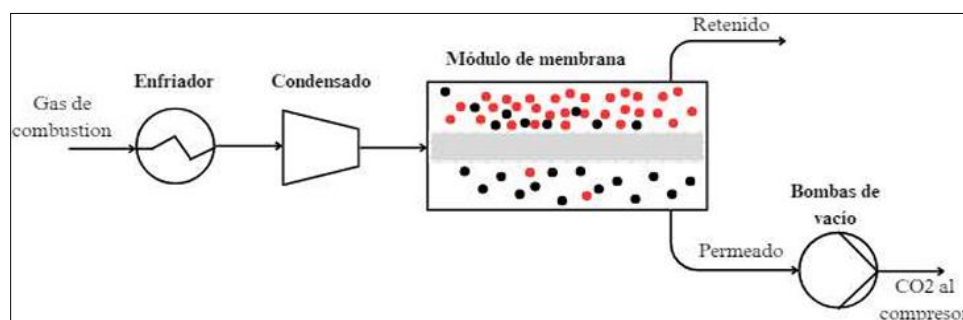
---

<sup>56</sup> "..., Es un proceso de destilación que ocurre de manera instantánea o súbita. Ocurre cuando una mezcla multicomponente o binaria en equilibrio termodinámico líquido-vapor, experimenta una expansión o disminución de la presión o un cambio en la temperatura de operación. De manera, que se vaporiza inmediatamente una de las fases ocurriendo una separación instantánea, quedando los componentes más volátiles en la fase gaseosa y los más estables en la fase líquida,... (párr. 6)" (Bulmaro, 2020).

factores principales: la permeabilidad al CO<sub>2</sub> y la selectividad del material (Dzierjarski, et al., 2023).

### Figura 50

#### *Proceso de pre-combustión de gas con membranas*



Nota. Tomado de (p.19), Puentes y Velandia, (2024).

Existen varios tipos de membranas con características específicas. Las orgánicas (poliméricas) están hechas de materiales como acetato de celulosa y poliamidas aromáticas. Son económicas, fáciles de fabricar y cuentan con buena estabilidad mecánica, pero tienen desventajas como su baja estabilidad térmica y química, así como problemas de hinchamiento y plastificación en presencia de agua (Puentes y Velandia, 2024).

Por otro lado, Pham & Space, (2020), señalan que otro tipo son las membranas inorgánicas que están formadas por materiales cerámicos, metálicos y zeolitas, ofrecen mayor estabilidad química y térmica. Estas se clasifican según el tamaño de los poros: las mesoporosas tienen alta permeabilidad, pero baja selectividad, las microporosas son más selectivas, pero menos permeables, y las densas son altamente selectivas con menor permeabilidad, pero, presentan altos costos, fragilidad y desafíos para su implementación comercial (Kamolov, et al., 2023). Otro tipo

son las membranas metálicas, como las fabricadas con aleaciones de paladio (Pd), se utilizan para separar mezclas de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$  en laboratorios y plantas piloto. Operan a temperaturas entre 300-600 °C y tienen ventajas como una alta permeación de  $\text{H}_2$ , pero presentan desventajas significativas, como su elevado costo, baja estabilidad química y fragilidad en atmósferas con dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Las investigaciones actuales buscan mejorar su rendimiento mediante aleaciones con metales como rutenio (Ru), rodio (Rh), níquel (Ni), cobre (Cu) y plata (Ag), pero, aún necesita mayores estudios e inversiones.

Finalmente, las membranas de matriz mixta (MMM) combinan polímeros con rellenos inorgánicos, logrando una mayor estabilidad mecánica y térmica. Este diseño híbrido mejora la selectividad y disminuye la plastificación, pero puede ser frágil debido a la alta concentración de cargas en la matriz polimérica. Su desempeño y estabilidad dependen de la calidad de los materiales utilizados (Joglekar et al., 2019). Las membranas ofrecen una solución avanzada y versátil para la captura de  $\text{CO}_2$ , destacándose por su capacidad de separación eficiente y adaptable a diferentes condiciones. Su desarrollo e implementación en Colombia podría impulsar el avance tecnológico en el manejo de emisiones, promoviendo el uso de sistemas más efectivos y especializados.

### **3.4.2 Oxi-combustión**

Según Mohamed, et al., (2010) la oxi-combustión es un proceso de captura de  $\text{CO}_2$  que consiste en la combustión de combustibles fósiles en oxígeno casi puro, separado del aire, generando principalmente  $\text{CO}_2$  y vapor de agua, los cuales se separan mediante condensación para capturar el  $\text{CO}_2$ , este método incrementa significativamente la presión parcial de  $\text{CO}_2$  al evitar su dilución con nitrógeno, lo que facilita los procesos de separación de gases.

Para llevar a cabo la oxi-combustión, es fundamental contar con una unidad de separación de aire (ASU) que proporcione oxígeno con una pureza de hasta el 97%. Durante la combustión,

una parte de los gases de escape es reciclada para mantener temperaturas óptimas en las calderas de carbón pulverizado y evitar modificaciones en el equipo. El CO<sub>2</sub> generado aún contiene vapor de agua, impurezas (óxido de Nitrógeno [NO<sub>x</sub>], óxido de azufre [SO<sub>x</sub>]) y gases incondensables como oxígeno, nitrógeno y argón, alcanzando un contenido de CO<sub>2</sub> aproximado del 75% en volumen de gas húmedo (Fundación Energía, 2008).

El proceso continúa con la condensación del agua y la purificación del CO<sub>2</sub> hasta una pureza del 99%, lo que permite su transporte en estado supercrítico. Es crucial limitar el contenido de agua a menos de 20 ppm,<sup>57</sup> en masa (50 ppm en volumen), para evitar problemas de corrosión. Este enfoque asegura un transporte eficiente y seguro del CO<sub>2</sub> purificado. Este método no solo contribuye a reducir las emisiones GEI, sino que abre la puerta a la reintegración del CO<sub>2</sub> capturado en procesos industriales o su almacenamiento geológico. A continuación, se abordará el proceso de post-combustión, otra técnica clave en la captura de CO<sub>2</sub>, que complementa los esfuerzos hacia una industria más sostenible y alineada con los objetivos globales de mitigación del cambio climático.

### ***3.4.3 Post-combustión***

La captura de CO<sub>2</sub> en procesos de postcombustión se basa principalmente en la absorción química que enfrenta desafíos significativos para su implementación a gran escala en centrales térmicas, especialmente las de carbón. Entre estos desafíos están la degradación y corrosión de solventes ricos en CO<sub>2</sub> y el elevado consumo energético para regenerarlos, que representa hasta el 70% de los costos del proceso. La tecnología se fundamenta en reacciones ácido-base reversibles entre solventes alcalinos y gases ácidos como el CO<sub>2</sub>. Es ampliamente utilizada en la separación de gases naturales, producción de urea y aplicaciones alimentarias. Los equipos principales son la torre de absorción, donde ocurre la reacción química, y el regenerador, donde se recupera el

---

<sup>57</sup>Ppm= Partes por millón.

solvente. La regeneración requiere energía térmica a temperaturas cercanas a los 130°C (Fundación Energía, 2008).

El costo energético depende de la estabilidad química y la velocidad de reacción del solvente: cuanto más rápido reacciona, más energía se necesita para regenerarlo. Además, factores como el tipo de solvente, contaminantes y condiciones operativas influyen en su degradación y corrosión. Para capturar entre el 80% y el 95% del CO<sub>2</sub>, es crucial optimizar el tamaño de las torres y el flujo de solventes. Asimismo, alcanzar purezas superiores al 98% es clave para su aprovechamiento industrial. La implementación de esta tecnología en sectores clave, como la generación térmica y la industria pesada, permitiría reducir emisiones sin comprometer la competitividad, especialmente en un país donde el carbón y el gas aún tienen un rol relevante en la matriz energética.

No obstante, su viabilidad dependerá de optimizar costos operativos y garantizar acceso a financiamiento e incentivos para la innovación en solventes más eficientes y menos corrosivos. Además, integrar la captura de CO<sub>2</sub> con industrias emergentes, como la producción de combustibles sintéticos o el almacenamiento de carbono, podría convertir a Colombia en un referente regional en tecnologías intermedias o transitorias. El principal proceso de postcombustión que se resalta en la literatura académica es la absorción química.

**3.4.3.1 La absorción química.** Es un proceso donde un gas reacciona con un líquido para facilitar la transferencia de masa. Se utilizan aminas porque son eficaces para eliminar CO<sub>2</sub> en bajas concentraciones y presiones, y tienen una amplia aplicación industrial desde hace décadas. Las principales aminas utilizadas en estos procesos se visualizan en tabla 10.

#### **Tabla 10**

*Principales aminas usadas en proceso de absorción química captura de CO<sub>2</sub>*

Amina	Descripción
<p><b>3.4.3.1.1</b> <b><i>Monoetanolamina</i></b> <b>(MEA).</b></p>	<p>Alta eficiencia en captura de CO<sub>2</sub>, rápida reacción y bajo costo, pero consume mucha energía (50%) y tiene riesgos ambientales y operativos. Usos: Eliminación de gases ácidos (sulfuro de hidrogeno H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub>), formulaciones epóxicas, detergentes, aditivo para hormigón, entre otros.</p>
<p><b>3.4.3.1.2</b> <b><i>Dietanolamina</i></b> <b>(DEA).</b></p>	<p>Bajo costo y alta velocidad de reacción, aunque requiere mucha energía para regeneración. Usos: Cosméticos, champús, inhibidor de corrosión, fluidos de pavimentación, pesticidas y productos de limpieza..</p>
<p><b>3.4.3.1.3</b> <b><i>Metildietanolamina</i></b> <b>(MDEA).</b></p>	<p>Forma bicarbonato en reacciones catalíticas, es resistente a la corrosión y la degradación, pero tiene bajas tasas de absorción de CO<sub>2</sub>. Usos: Refinación de petróleo, detergentes, estabilización de pH, y síntesis química.</p>

Nota. Datos de AquaTerra Group MEA, (2024); Laboratoriumdiscounter,(2024); ForteQuim, (2024); y Dow, (2024).

La transición energética en Colombia enfrenta un desafío crucial en la implementación de tecnologías de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CAC), que son fundamentales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en sectores industriales clave, como la energía, la minería y la petroquímica. A pesar del crecimiento de las energías renovables, la creciente demanda de energía sigue impulsada en gran parte por fuentes fósiles, lo que requiere la adopción de soluciones como la captura de CO<sub>2</sub> para mitigar los impactos ambientales.

Las tecnologías disponibles luego de la corriente de gas, como la pre-combustión, la oxidación y la postcombustión, ofrecen diversas soluciones, pero su implementación a gran escala depende de la disponibilidad de infraestructuras y materiales adecuados, además de la capacidad de investigación, preparación de talento humano y desarrollo industrial para mejorar su viabilidad económica en condiciones locales.

Se presenta el último capítulo relacionado con las tecnologías de almacenamiento y conversión energética, movilidad alternativa, entre otras y se presentan al final las conclusiones.

## **4. Tecnologías de almacenamiento, conversión energética y movilidad**

El capítulo 4 se aborda con un análisis de las tecnologías de almacenamiento y conversión de energía, incluyendo baterías de diferentes tipos, como las de litio, plomo-ácido, vanadio y sodio-sulfuro. Posteriormente, se examinan las tecnologías de conversión de energía, con especial atención la electrolisis a alta temperatura y el hidrógeno, así como las tecnologías de recuperación de calor, como los intercambiadores de calor y las bombas de calor. También se exploran tecnologías emergentes, como la mareomotriz, que ofrecen nuevas posibilidades para la generación de energía renovable.

Finalmente, el capítulo se cierra centrándose en la dinámica del sector automotor y su rol en la transición energética, abordando diferentes tipos de vehículos, desde motos diésel y gas convertido, hasta motos eléctricas (BEV), y analizando su desempeño en comparación con años anteriores. Asimismo, se profundiza en los vehículos híbridos, destacando su evolución y el impacto de estas tecnologías en la reducción de emisiones y en la sostenibilidad del transporte.

### **4.1 Tecnologías de Almacenamiento y conversión de energía**

La transición energética y la descarbonización de la economía global no solo requieren de fuentes de energía renovables, sino también de tecnologías más eficientes para el almacenamiento y distribución de esta energía. Las energías renovables, al depender de factores climáticos, presentan inestabilidades en la producción y la intensidad de la energía generada. Para garantizar un suministro constante, es necesario desarrollar soluciones de almacenamiento que conserven la energía en momentos de exceso, entre el uso de baterías son un alternativa viable y muy estudiada.

#### ***4.1.1 Baterías***

Las baterías son componentes fundamentales en diversos dispositivos, desde productos de uso cotidiano como computadoras, celulares y radios, hasta aplicaciones más especializadas en maquinaria industrial, vehículos y aeronaves. Se clasifican en dos grupos: primarias no recargables

y secundarias recargables. Las baterías primarias incluyen las de zinc-carbono (Zn-C), alcalinas (Zn/MnO<sub>2</sub>), zinc-óxido de plata (Zn/Ag<sub>2</sub>O), zinc-oxígeno (Zn/O<sub>2</sub>) y litio (Li). Por otro lado, las secundarias comprenden las de ácido plomo (Pb/PbO<sub>2</sub>), níquel-cadmio (Ni/Cd), níquel-metal hidruro (Ni/MH), ion de litio (LiCoO<sub>2</sub>) y polímero de litio (LiPo) (Linden & Reddy, 2001).

Las baterías recargables con alta eficiencia para aplicaciones en tecnologías renovables como paneles solares, vehículos eléctricos y parques eólicos. Entre las más relevantes se encuentran las baterías de ion de litio (LiCoO<sub>2</sub>), ácido plomo (Pb/PbO<sub>2</sub>), flujo de vanadio (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), sodio-sulfuro (Na<sub>2</sub>S) y flujo zinc-bromo (Zn/Br). Estas tecnologías se caracterizan por su capacidad energética, larga vida útil y la posibilidad de reciclaje de sus componentes, lo que las convierte en opciones más sostenibles para el futuro, para visualizar sus principales ventajas y desventajas véase tabla 11.

**Tabla 11**

*Tipo de baterías más populares*

<b>Batería</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Vehículos</b>
Ion litio	Alta densidad energética. Alto rendimiento	Alto coste Alto coste medioambiental (extracción de cobalto)	Tesla Model S X Bmw Ix3 Volvo Ex30
Litio-ferrofósforo	Durabilidad. Menor coste Seguridad	Menor densidad energética Sensibilidad al frío	Tesla Model 3 Mg4
Níquel hidruro metálico	Poco impacto medioambiental Bajo coste Durabilidad	Menor densidad energética Alto peso y volumen	Modelos híbridos Rav4 y Kluger de Toyota
Ion sodio	Menores costes Bajo impacto medioambiental Rendimiento a bajas temperaturas	Baja densidad energética Aún en investigación	Sehol E10X

Plomo acido	Bajo coste. Buena respuesta en frio	Pesadas de recarga lenta. Impactos nocivos del plomo	Batería común en vehículos convencionales
-------------	-------------------------------------	--	---

Nota. Datos de Linden & Reddy, (2001).

El aumento de los vehículos eléctricos en el mercado mundial y los planes para la reducción de gases de efecto invernadero por parte de los gobiernos, incluido el de Colombia, abren oportunidades en su producción o por lo menos de algunos de sus componentes. Uno de los componentes más importantes de los vehículos eléctricos es la batería, ya que su composición afecta directamente al desempeño del vehículo, es por esto que se hace necesario explorar las opciones de almacenamiento existentes en busca de oportunidades para la industria colombiana. A continuación, se presentan las baterías más populares actualmente.

**4.1.1.1 Baterías de Litio.** Afirma Lozano (2019), que el Li posee el mayor potencial electroquímico y provee la mayor energía específica por unidad de peso, lo que los hace tan viables para ser usados en baterías. Estas baterías se destacan por alta densidad de energía, alto rendimiento: 94%, largo ciclo de vida: 4500 ciclos, alta profundidad de descarga: 90%. Según OEC, (2022), en 2022, los acumuladores de iones de Li, incluidos los separadores, se comercializó con un total de \$94.7 MM.<sup>58</sup>

Este mercado creció un 48.4% entre 2021 y 2022. Los principales exportadores fueron China, Polonia, Corea del Sur, Hungría y Alemania, mientras que los mayores importadores incluyeron a Alemania, Estados Unidos y Corea del Sur. En Colombia, las exportaciones de este producto alcanzaron los \$278,000 usd, mientras que las importaciones fueron de \$52.7 millones usd, dejando a Colombia como importador neto.

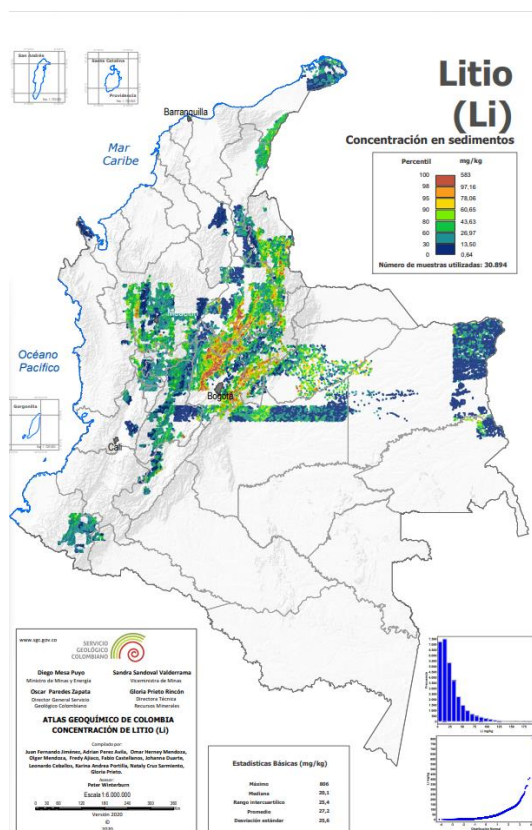
Frente a la ubicación territorial del elemento principal de estas baterías, se encuentra que Jiménez (2020), señala que: "... ,los mayores enriquecimientos de Li en Colombia, se encuentran al noroeste del país, en la porción central de la Cordillera Oriental, ...(p.1)" y que "extensas áreas

<sup>58</sup> MM= Miles de Millones de dólares. M= Millones de dólares. K=Miles de dólares.

influenciadas litológicamente por rocas del basamento metamórfico del Macizo de Santander de edad Precámbrica como la unidad Neis de Bucaramanga y Formación Silgará presentan proporciones mayores de Li, ... (p.2)”. Véase figura 51.

**Figura 51**

*Colombia concentración de litio (Li)*



Nota. Extraído de (p.1), Jiménez, et al., (2020).

Para hablar propiamente de los usos de las baterías de ion-litio, es necesario tener en cuenta la existencia de variantes que usan otros componentes. Estas variantes o alternativas buscan distinguirse la una de la otra por tres aspectos principales: La densidad energética y autonomía, el



bajo costo de producción y por último un menor impacto medioambiental. Actualmente son dos las variantes más utilizadas en vehículos de altas prestaciones, la níquel-cobalto-aluminio (NCA) y la níquel-manganeso-cobalto (NCM). Por otro lado, existe una opción menos costosa y más competitiva por su falta de cobalto como lo es la batería de litio-ferrofosfato, la cual ofrece más durabilidad y segura a cambio de menos densidad energética.

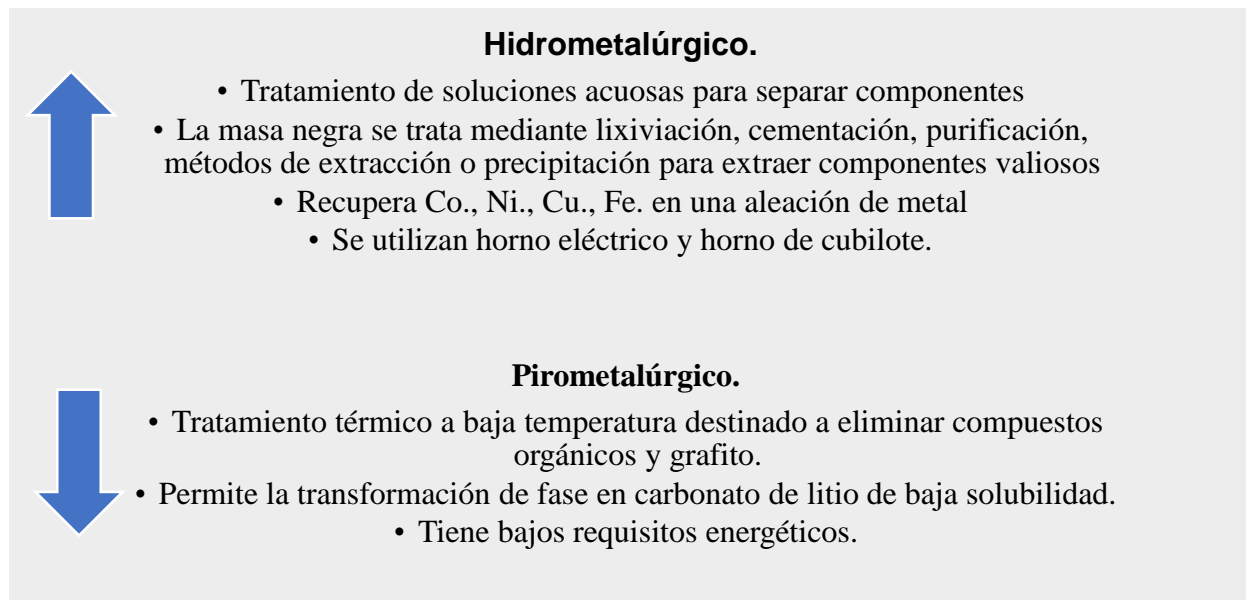
En algunos países ya se emplean métodos de recuperación de Li, dado su escasez, los métodos de reciclaje más conocidos de estas baterías se visualizan en tabla 12.

**Tabla 12**

*Métodos de reciclaje para las baterías de Litio*

---

	<p><b>Mecánico</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desmantelamiento a nivel de celda o paquete           <ul style="list-style-type: none"> <li>• Trituración (molino de martillos)</li> <li>• Trituración (molino de martillos)               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Clasificación</li> </ul> </li> <li>• Fracciones de desecho</li> </ul> </li> </ul>
	<p><b>Pirometalúrgico</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesamiento a alta temperatura dirigido a la recuperación o refinación de metales a altas temperaturas</li> <li>• Funciona bajo un principio de separación que produce dos fases           <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fase siguiente se pierden Li., Mn. y Al.</li> </ul> </li> <li>• La masa negra se mezcla con materiales valiosos (Co., Ni., Mn., Li., etc., son recuperados)</li> </ul>

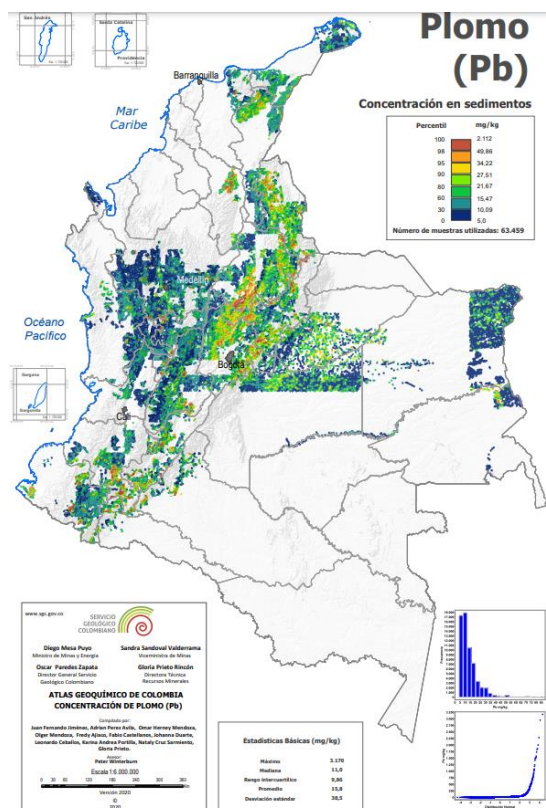


Nota. Datos de (p. 81), IRENA (2017).

**4.1.1.2 Baterías Plomo Acido.** Las baterías de plomo-ácido, aunque no son comúnmente usadas en motores eléctricos, desempeñan un papel importante en la transición hacia vehículos eléctricos, debido a su uso predominante en carros convencionales. Dada la relevancia de estas baterías y las reservas de componentes en Colombia, es fundamental investigar cómo reutilizar sus partes. Según Lozano, (2019), estas baterías tienen un tiempo de descarga de 8 a 16 horas y una vida útil de 1000 ciclos, pero su alto contenido de cobre las hace poco amigables con el medio ambiente.

### Figura 52

*Colombia concentración de plomo (Pb)*



Nota. Extraído de (p.1), Jiménez, et al., (2020).

La distribución geográfica de los elementos químicos presentes en las baterías de plomo-ácido varía según la región en los departamentos de Norte de Santander, Santander y el sur del Cesar, se han identificado concentraciones anómalas de plomo (Pb) en formaciones geológicas antiguas, como plutonitas y vulcanitas jurásicas, alcanzando hasta 150 mg/kg. En el Macizo de Santander, al nororiente de Bucaramanga, los niveles de plomo son aún mayores, llegando a 1.479 mg/kg. Por otro lado, en las formaciones calcáreas del Cretácico, se registran valores de hasta 200 mg/kg, junto con la presencia de zinc (Zn), plomo (Pb) y cobre (Cu).

En el norte de Cúcuta, dentro de unidades sedimentarias más recientes del Cenozoico, las concentraciones de plomo varían entre 12,62 y 67,62 mg/kg, (Jiménez, et al., 2020). Véase figura

52. Finalmente, al occidente de Cúcuta y al norte de Bucaramanga, se han identificado depósitos de galena, barita y fluorita en formaciones de cuarzo monolítico. La galena (PbS) es el mineral más importante para la extracción de plomo, ya que es su principal fuente en la naturaleza. La barita (BaSO<sub>4</sub>) se asocia comúnmente con la galena en yacimientos minerales y se usa en la industria petrolera y en procesos metalúrgicos. La fluorita (CaF<sub>2</sub>), además de encontrarse en depósitos de plomo, juega un papel clave en la refinación del metal al actuar como fundente en la producción de plomo y otros metales.

En cuanto al comercio global, los acumuladores de plomo-ácido (vehículo) representaron en 2022 un valor de \$12.2 MM, experimentando una caída en las exportaciones de -4.07% entre 2021 y 2022. A nivel de importaciones, Estados Unidos fue el principal importador, seguido por Francia, Canadá, Alemania y Reino Unido. En Colombia, las exportaciones de este producto fueron \$154 M., más de tres veces el valor de las importaciones, lo que posicionó al país como el 17° exportador mundial. Los principales destinos de exportación fueron Estados Unidos, Perú, Venezuela, Ecuador y Panamá. En cuanto a importaciones, Colombia adquirió acumuladores por \$48.1 M., principalmente de China, Venezuela, Corea del Sur, Estados Unidos y Ecuador (OEC Pb, 2022).

Resalta Giraldo, (2024), que en Colombia se recicla el 53% de las baterías usadas bajo estándares regulados, si bien la industria de baterías de plomo-ácido en el país está evolucionando, la implementación de prácticas sostenibles puede contribuir significativamente a mitigar el cambio climático, se estima que el 99% de los materiales usados en las baterías de plomo-ácido se pueden recuperar, reciclar y rehacer.

**4.1.1.3 Baterías de Vanadio (V).** El V es un metal estratégico con aplicaciones clave en la producción de aleaciones de acero, donde representa el 93% del consumo en Estados Unidos (Polyak, 2023).

Señala Jiménez, et al., (2020-2), que:

“..., la fuente antropogénica más importante de V incluye la combustión de combustibles fósiles (petróleo y carbón) y los residuos de la industria del acero. El V se utiliza ampliamente como catalizador para procesos de oxidación en fase gaseosa en la manufactura del ácido sulfúrico, en la industria metálica se utiliza en la producción de herramientas de carburo de tungsteno, refinamiento de acero inoxidable, en la industria cerámica, elaboración de pigmentos, tintas y como filtro de radiación ultravioleta –UV- en algunos vidrios, ... (p.2)”.

El V se extrae principalmente de depósitos de titanomagnetita vanadífera (VTM), que contienen entre 0.2% y 1% de pentóxido de vanadio ( $V_2O_5$ ), y de depósitos de V en arenisca (SSV), con concentraciones de 0.1% a más de 1% de  $V_2O_5$ . También se encuentra en esquistos negros ricos en V, con concentraciones que varían entre 0.18% y 1.7% de  $V_2O_5$ , y como subproducto del refinado de petróleo, carbón, arenas bituminosas y esquistos bituminosos (Kelley, et al., 2017).

Los recursos mundiales de V a nivel mundial se estiman en más de 63 millones de toneladas, con reservas demostradas de aproximadamente 19 millones de toneladas. Los principales proveedores de  $V_2O_5$  en el período 2019-2022 fueron Brasil (49%) y Sudáfrica (36%), mientras que las fuentes principales de ferrovandio (FeV) fueron Canadá (46%) y Austria (33%) (USGS V, 2024). Los precios del FeV en Estados Unidos oscilaron entre \$13.20 y \$13.7 por libra de V contenido en diciembre de 2023, mostrando una ligera disminución respecto a noviembre. En Europa, los precios variaron entre \$26.62 y \$27.75 por kg de V contenido, mientras que, en China, los precios del  $V_2O_5$  se mantuvieron estables entre \$9 y \$9.5 por libra desde septiembre de 2021 (USGS V, 2024).

A nivel ambiental, el V es un micronutriente esencial para los humanos, con un requerimiento diario de menos de 10 microgramos, pero puede ser tóxico en dosis superiores a 10-20 miligramos por día. Las concentraciones naturales de V en suelos oscilan entre 10 y 500 partes por millón (ppm), en ríos y agua de mar varían entre 0.2-2.9 (ppb),<sup>59</sup> y 0.3-2.8 ppb,

---

<sup>59</sup> Ppb= Partes por billón. Ppm= Partes por millón.

respectivamente. Cerca de las minas, las concentraciones en suelos pueden alcanzar entre 548 y 7,160 ppm.

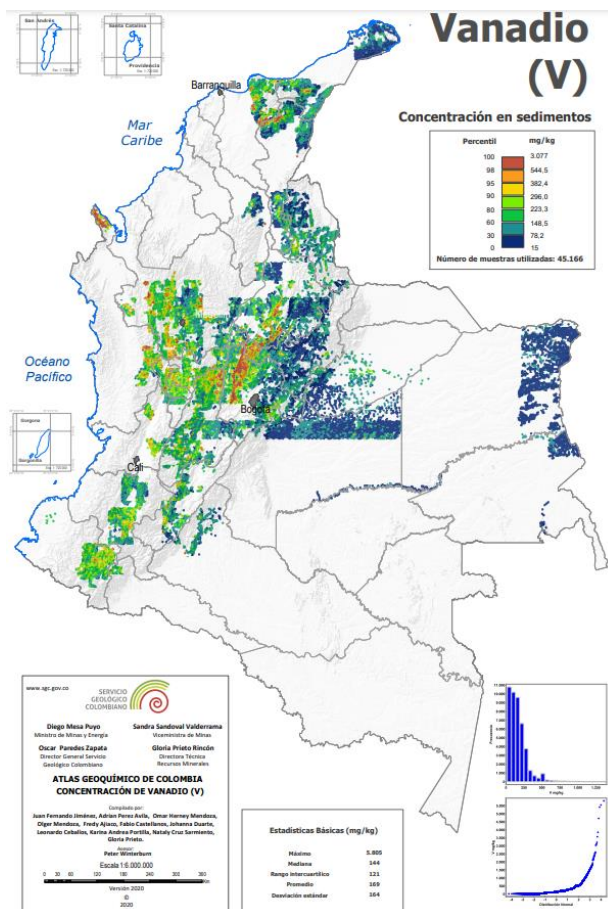
En el panorama Nacional se estima se puede encontrar V según el estudio geológico de Navarro Martinez, (2021), en:

“..., La zona que cuenta con un mayor potencial exploratorio corresponde a la cuenca del Rio Ture, ubicado en la zona rural del Municipio de Bolívar. A su vez, la quebrada La Trampa, Quebrada El Casiquito, Quebrada La Chorreona y los drenajes correspondientes a la Cuenca del Rio Ture. Esta zona comprende un área de aproximadamente de 716 hectáreas. Esta zona fue delimitada teniendo en cuenta las muestras que presentaron un mayor atractivo en los análisis geoquímicos, junto con características estructurales y fotogeología, ... (P.71)”. Véase figura 53.

La demanda futura de V se espera que aumente debido a la creciente necesidad de acero de alta calidad y al desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía renovable. Aunque el V es difícil de sustituir en aleaciones de acero debido a su capacidad para mejorar la resistencia y durabilidad, su papel en aplicaciones aeroespaciales, como las aleaciones de titanio-vanadio, no tiene sustitutos viables. Las aplicaciones emergentes del V incluyen su uso en baterías de flujo redox (VRB), ideales para el almacenamiento de energía renovable, como la eólica y solar, y en baterías de litio-vanadio-fosfato, que ofrecen alto voltaje y una excelente relación energía-peso, siendo útiles en vehículos eléctricos (Kelley et al., 2017).

### **Figura 53**

*Colombia concentración Vanadio (V) 2020*



Nota. Extraído de (p.1), Jiménez, et al., (2020).

Las baterías de V son una opción clave para el almacenamiento a gran escala de energías renovables, ya que mantienen su capacidad durante largos períodos. Además de su uso en renovables, se espera su aplicación en estabilización de redes eléctricas, centros de datos y telecomunicaciones. Son una variante de las baterías de flujo.

Las baterías de flujo de V, según Lozano (2019), son escalables, de larga vida útil y aptas para grandes instalaciones fijas e industriales, pero no son prácticas para aplicaciones móviles. Estas baterías desarrolladas desde los 80s, su desarrollo se ha dado en países industrializados como Japón, China o Australia, permiten un diseño líquido reduce la contaminación y facilita su

mantenimiento. A diferencia de las baterías convencionales, estas acumulan energía en electrolitos líquidos contenidos en dos depósitos independientes (Popa, et al., 2022).

En Estados Unidos, el Departamento de Energía está impulsando su desarrollo por su capacidad de ofrecer 10 horas de retención, 10,000 ciclos y 25 años de vida útil, aunque son costosas señalan en IRENA, (2017). El tamaño del mercado de las baterías de este tipo fue de \$242 millones de dólares en 2022, se utilizan con frecuencia como componentes de detección en equipos militares críticos, incluidas municiones y armamento, en la construcción de garajes eléctricos que son compatibles con energía solar, eólica y la energía mareomotriz. El mercado Asia pacifico es la zona con mayor participación del mundo en estas baterías.

**4.1.1.4 Baterías Sodio-Sulfuro (NaS).** Las baterías de NaS son una tecnología avanzada para almacenamiento de energía a gran escala, operando a altas temperaturas con sodio (S) y azufre (Na) líquidos. Ofrecen una densidad energética de 140-300 Wh/L,<sup>60</sup> y densidad de potencia de 140 W/L, con un bajo índice de auto-descarga (0.05%-1% por día) y una tasa de reciclaje del 99%, utilizando materiales no tóxicos.

Román, (2024), destaca que se han instalado más de 300 MW,<sup>61</sup> en más de 170 proyectos en Japón, mientras que Abu Dhabi alberga la mayor batería NaS con 108 MW/648 MWh. A pesar de sus ventajas, presentan un costo operativo anual alto (usd 40-70 por kW/año) debido al mantenimiento térmico. Lozano (2019), resalta su larga vida útil, con entre 4000 y 5000 ciclos, y alta eficiencia de carga y descarga (89-92%). Además, son económicas en cuanto a los materiales de fabricación.

Las baterías NaS se han usado principalmente para servicios de red, como la nivelación de carga en parques eólicos en Japón. Un ejemplo es el sistema de almacenamiento de 6 MW/48 MWh en Tokio desde los años 90 (Kodama & Kurashima, 1999). Las ventajas de las NaS incluyen

---

<sup>60</sup> Wh/L= vatios-hora por litro.

<sup>61</sup> MW = Megavatio 1MV = 1,000,000 W. MWh = Megavatio hora. kW= Kilo vatio. 1Kw = 1000 W. kWh= Kilo vatio hora.

su densidad energética relativamente alta comparada con tecnologías como las de plomo-ácido y flujo redox, y su capacidad para ofrecer alta potencia de pulso. La densidad de energía de NaS está entre 140 Wh/L y 300 Wh/L, y su densidad de potencia alcanza los 140 W/L, permitiendo sistemas compactos con capacidades de hasta 250 MWh, adecuados para ciclos diarios.

## **4.2 Tecnologías de conversión de energía**

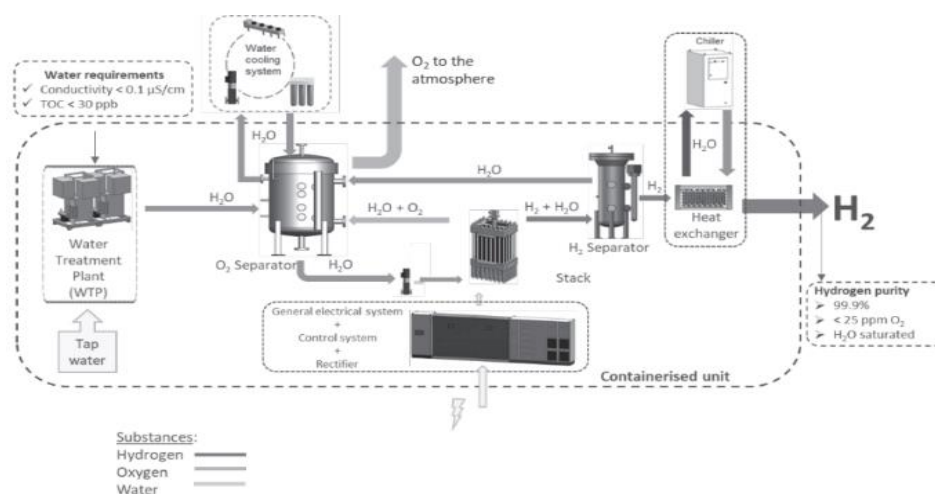
### **4.2.1 *Electrolisis a alta temperatura e hidrogeno***

La electrólisis a alta temperatura es un proceso utilizado para separar elementos de compuestos, como en la producción de aluminio (Al), magnesio (Mg), y sodio (Sd), mediante electricidad continua. Los electrolizadores se clasifican según el tipo de electrolito que utilizan: alcalinos, poliméricos, aniónicos y de óxido sólido (Brey, 2022). La electrólisis a alta temperatura busca mejorar la eficiencia en la separación de hidrógeno del agua, utilizando calor además de electricidad, lo que reduce costos, véase figura 54. Se espera que, en el futuro, esta energía provenga principalmente de energías renovables para minimizar las emisiones de CO<sub>2</sub>. Aunque es una tecnología conocida desde el siglo XIX, sigue siendo objeto de investigación debido a su relevancia en la transición hacia una economía basada en hidrógeno. Este proceso es clave para producir hidrógeno sin emisiones de CO<sub>2</sub>, a diferencia del hidrógeno gris o azul.

El hidrógeno se clasifica según su proceso de obtención y los residuos generados. El hidrógeno negro, marrón y gris tienen un alto impacto ambiental, mientras que el hidrógeno gris y azul representan el 60% de la producción mundial (H2news, 2024). En contraste, el hidrógeno verde, el más eficiente y libre de emisiones, ha mostrado un notable desarrollo en proyectos recientes.

### **Figura 54**

*Esquema del proceso de electrólisis*



Nota. Tomado de (p.3), Brey, (2022).

Según la *Global Hydrogen Review, 2024*, de la Agencia Internacional de Energía (IEA), la demanda mundial de hidrógeno alcanzó los 97 millones de toneladas en 2023, lo que representa un incremento del 2.5% respecto al año anterior, impulsada principalmente por los sectores de refinación y químico. No obstante, la producción de hidrógeno de bajas emisiones sigue siendo mínima, representando menos de 1 millón de toneladas, aunque se proyecta que los proyectos en desarrollo podrían aumentar la capacidad de producción hasta 49 millones de toneladas para 2030. Hubo un incremento del 47% en las solicitudes de patentes de tecnologías de hidrógeno en 2022, lo que refleja el interés creciente tanto público como privado en estas tecnologías, véase figura 55.

En Colombia, dos principales asociaciones impulsan el desarrollo del hidrógeno: la Asociación Hidrógeno Colombia (AHC, 2024), con 50 empresas y 19 aliados estratégicos, y la Cámara de Hidrógeno ANDI-NATURGAS que representa la alianza entre la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia ANDI y la Asociación Colombiana de Gas Natural (Naturgas), que fomentan la descarbonización y la cadena de valor del hidrógeno (ANDI H2, 2024).

Colombia según H2LAC, (2024) posee 37 proyectos en total, 6 en operación y 31 en desarrollo, En 2021, Colombia lanzó su primera hoja de ruta del hidrógeno, destacando su

potencial en recursos naturales y energías renovables para producir hidrógeno verde y azul. Se prevé que para 2030, el hidrógeno azul sea la opción más competitiva, y para 2040, el verde se consolide como la principal alternativa. En cuanto a los costos, se espera que el precio del hidrógeno verde en el Caribe Norte baje de 2.8 a 1.5 usd/kg de H<sub>2</sub> para 2050, mientras que en el Pacífico disminuirá de 6.6 a 2.4 usd/kg de H<sub>2</sub> (Min. Energía HRH, 2021).

**Figura 55**

*El Pantone del hidrógeno*

	NEGRO	MARRÓN	GRIS	AZUL	TURQUESA	ROSA	VERDE	AMARILLO	BLANCO
<b>Fuente de energía</b> 	Carbón bituminoso	Lignito	Hidrocarb. (gas natural principalmente)	Hidrocarb. (gas natural)	Hidrocarb. (gas natural)	Energía nuclear	Renovables	Energía solar*	Presente de por sí en la naturaleza
<b>Proceso más usado</b> 	Gasificación de carbón	Gasificación de carbón	Extracción con vapor (reformado)	Extracción con vapor	Pirólisis (descomposición mediante calor)	Electrólisis (separación mediante electricidad)	Electrólisis	Electrólisis	En exploración
<b>Emisiones asociadas</b> 	Muy altas	Muy altas	Altas	Medias (incluye sistemas de captura de carbono)	Bajas (carbono sólido, sin CO <sub>2</sub> )	Bajas	Bajas o nulas	Bajas o nulas	Nulas

Nota. Clasificación por color según tecnología de producción de Hidrógeno tomado de (p.14), Quiroga Mancipe, (2024).

Un estudio realizado por *H<sub>2</sub>upp* y la Cámara de Comercio Colombo-alemana identifica departamentos con potencial de oferta y demanda equilibrada de hidrógeno verde y PtX,<sup>62</sup> demuestra que departamentos como Valle del Cauca, la Guajira, Santander y Bolívar tienen una

<sup>62</sup> PtX (*Power-to-X*). Tecnologías que convierten electricidad renovable en combustibles, químicos o calor, como hidrógeno, amoníaco o metanol.

vocación de oferta de hidrogeno verde y PtX, mientras que Antioquia, Atlántico y Boyacá tienen una vocación de demanda (La nota Económica, 2024). Ecopetrol ha implementado el proyecto Ecopetrol-Cartagena, con una inversión de US\$6 millones, consiste en un electrolizador de membranas de intercambio de protones –PEM- de 50 kW y 270 paneles solares, inaugurado en 2022 en la refinería de Cartagena. Este proyecto tiene como objetivo generar 20 kg de hidrógeno verde diario, que se utilizarán en la producción de combustibles dentro de la refinería, reemplazando el hidrógeno gris utilizado anteriormente (Grupo Ecopetrol, 2022).

Por su parte, Promigas lanzó su Proyecto Promigas-Cartagena Fase 1 en marzo de 2022, una planta piloto que produce hidrógeno verde y lo mezcla con gas natural. Con una inversión de US\$1,2 millones, se espera que esta planta produzca 1,574 kg de hidrógeno anualmente y evite 6 toneladas de CO<sub>2</sub> al año, con tecnología de electrólisis con un suministro de energía a través de un sistema solar fotovoltaico. En su fase final, la producción en el corto plazo se plantea llegar a los 4.5 toneladas pero, la meta es llegar a 15 toneladas al año (Naturgas, 2024).

En el sector del transporte, el SITP Bus de Hidrógeno es otro avance importante. En marzo de 2023, se presentó el prototipo de un bus impulsado por hidrógeno verde para el sistema de transporte Transmilenio de Bogotá. Este bus, alimentado por una celda de hidrógeno, tiene una autonomía de más de 450 kilómetros y es parte de un esfuerzo conjunto de Ecopetrol, FENOGE, Grupo Fanalca, *Green Móvil*, Transmilenio y el Ministerio de Minas y Energía.

El Decreto 895 de 2022, permite que proyectos de hidrógeno verde y azul en Colombia accedan a incentivos tributarios, incluyendo una deducción de hasta el 50% en el impuesto sobre la renta durante 15 años, exclusión del Impuesto de Valor Agregado –I.V.A.- y depreciación acelerada de activos en tres años. Además, se eliminan aranceles para equipos y servicios importados o nacionales destinados a la producción de hidrógeno. Estos incentivos se suman a los otorgados a proyectos solares y eólicos, enmarcados en la Ley 1715 de 2014, que ha permitido

adjudicar más de 2.800 MW en energías renovables, aumentando por 100 veces la capacidad instalada desde 2018 (Min. Energía Boletín, 2022).

Finalmente, el Proyecto Seneca de la Universidad de La Guajira, inaugurado en 2023, es una planta piloto de *Power To Gas* que, con una inversión de US\$300,000, produce 356 kg de hidrógeno al año. Este proyecto es resultado de más de cinco años de investigación en tecnologías de generación de hidrógeno y cambio climático (Cabeza, 2023). Para ver un resumen de los proyectos más destacados a nivel nacional, véase tabla 13.

**Tabla 13**

*Proyectos de Hidrogeno destacados en Colombia*

<b>Nombre/Tipo/Socios</b>	<b>Capacidad/Descripción/Inversión/Fuente/Escala</b>
Ecopetrol-Cartagena Producción Ecopetrol	50 kW 6 MUSD Solar fotovoltaica Piloto
SITP Bus hidrogeno Bogotá Implementación Min Minas FENOGE, Grupo Fanalca, Green Móvil, Transmilenio, Ecopetrol, CENIT	165 kW Estanque de 140 kg de hidrógeno a 350 bar, capaz de transportar 50 pasajeros autonomía de 450 km, y carga de combustible en 10 minutos. 5,28 MUSD Solar fotovoltaica Piloto
Promigas- Cartagena-fase 1 Producción Promigas	50 kW Producción de hidrógeno verde para el reemplazo del hidrogeno gris producido en refinerías <i>Blending</i> con gas natural para ser inyectado a las redes de transmisión de gas natural. 1,2 MUSD Solar fotovoltaica Piloto
Estación Andes Producción	265 ton de H2/año Carga de FCEV Hyundai Nexco.

OPEX SAS	Generación de hidrógeno para combustible de FCEVs. 300.000 USD
Proyecto SENECA Producción Universidad de Antioquia, Universidad de La Guajira	Estudio conjunto dos universidades factibilidad producción de hidrógeno verde. Análisis de factibilidad del <i>blending</i> de hidrógeno para ser implementado en las redes de transmisión de gas locales 30.000 USD Solar fotovoltaica y eólica Experimental

Nota. Datos H2LAC, (2024).

### 4.3 El sector transporte en la Transición Energética

El sector transporte en Colombia es uno de los principales responsables de la contaminación atmosférica. El transporte de pasajeros y de carga en Colombia está fundamentado en transporte de carretera que genera el 78% de las emisiones del sector. El principal contaminante que excede los límites permitidos es el material particulado PM10, con diámetro  $\leq 10$  micrómetros, son un indicador crítico de la calidad del aire, su exposición está correlacionada con un incremento en la incidencia de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Su composición, incluye polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas y otros compuestos (PRTR España, 2007).

Así como particulado aún más fino PM 2,5 Las partículas PM2.5, con diámetro  $\leq 2.5$  micrómetros, penetran profundamente en el sistema respiratorio y están asociadas a enfermedades cardiovasculares, respiratorias y mortalidad prematura, siendo emitidas por fuentes naturales y antropogénicas (EPA, 2024). Es particulados son especialmente derivado del uso de diésel. Véase figura 56.

#### Figura 56

*Comparación de tamaño de las partículas de PM*



**Comparación de tamaño de las partículas de PM**

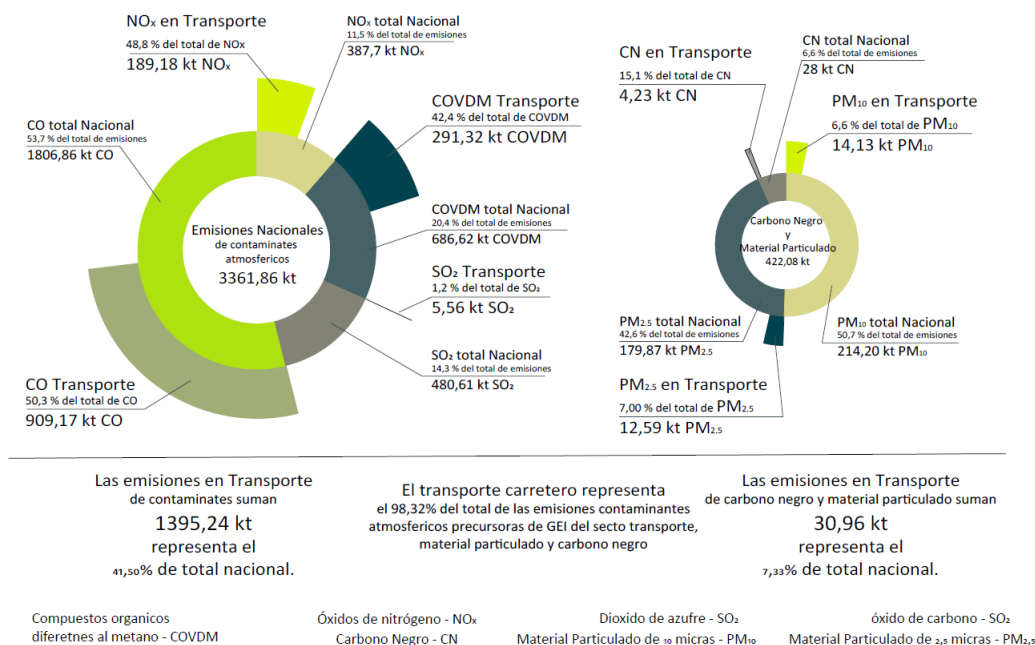
Nota. Tomado de EPA, (2024).

Según el ‘Tercer informe bienal sobre cambio climático’ de 2018, Colombia emitió 3.361,86 kilo-toneladas (kt) de contaminantes atmosféricos, de las cuales el transporte aportó el 41,5% (1.395,24kt). Los principales contaminantes emitidos por este sector son el monóxido de carbono (CO) y los compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (COVDM), con 909,17 y 291,32kt respectivamente como se observa en la figura 57.

El modo carretero genera más del 98% de las emisiones del sector, destacándose las motocicletas con el 52,58% de las emisiones, seguidas de los automóviles 25,2 %, camiones pesados y autobuses 16,97% y camiones ligeros 5,23%. Las motocicletas son las mayores emisoras de carbono 485 kt y COVDM 208,35 kt, mientras que los camiones y autobuses lideran la emisión de óxidos de nitrógeno (NOX) con 138,25kt. En comparación, el modo ferroviario y fluvial representan menos del 1 % de las emisiones del sector (Min. Transporte, 2022).

**Figura 57**

## Gases de efecto invernadero –GEI- del sector transporte



Nota. Tomado de (p.50), Min.Transporte, (2022).

### 4.3.1 Incentivos y parque automotor

Los incentivos para el transporte sostenible en Colombia han evolucionado significativamente en los últimos años, buscando promover tecnologías limpias y de bajas emisiones. En 2016, por medio de la reforma tributaria, (Ley 1819, 2016), en su artículo 185, modificó el artículo 468-1 del Estatuto Tributario para reducir del 19% al 5% el Impuesto de Valor Agregado –IVA-, en vehículos eléctricos e híbridos, incluidas bicicletas y motocicletas, taxis, chasis, carrocerías, barcos, transportes de carga, entre otros.

Posteriormente, se expidieron la Resolución 1988 de 2017 Min. Ambiente, y la Resolución 367 de 2018 Min. Ambiente, que implementaron las metas de eficiencia energética del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía (PROURE), permitiendo la exclusión del IVA y descuentos en la renta. Estas medidas abarcan tanto vehículos a gas natural vehicular (GNV) en

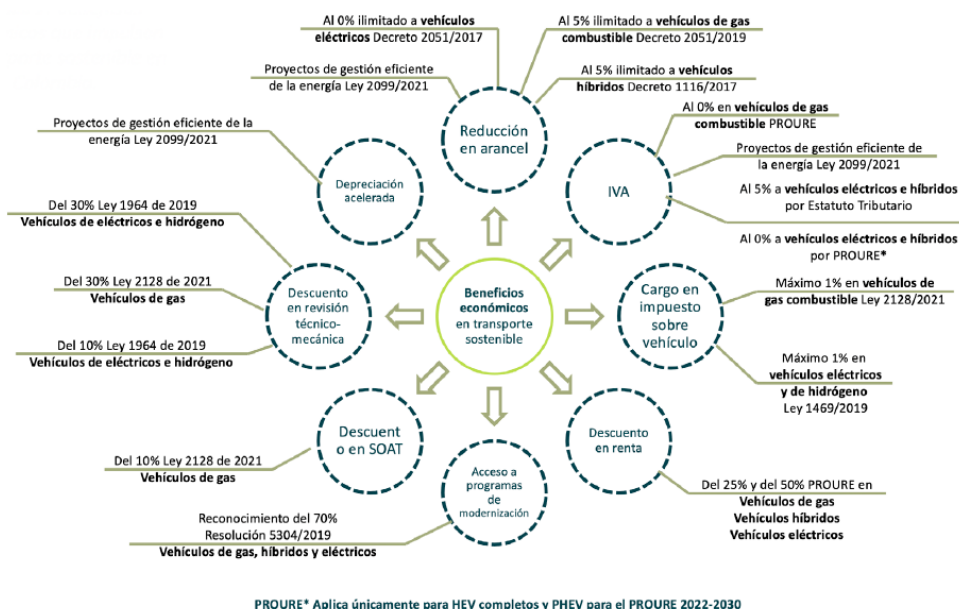
transporte público como el uso de electricidad en taxis, flotas oficiales, motos, automóviles y transporte público en ciudades principales.

En 2021, la Ley 2099, agilizó los trámites y otorgó nuevos incentivos, como arancel y depreciación acelerada, excluyendo del IVA los equipos y servicios registrados en el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y Fuentes No Convencionales de Energía –PROURE-. El Decreto 2051 de 2019, eliminó el arancel para vehículos eléctricos (0%) y estableció un arancel del 5 % para vehículos a gas natural, así como un contingente variable para vehículos híbridos hasta 2027.

En términos económicos, se han otorgado incentivos adicionales, como la reducción del 30% en el valor de la revisión técnico-mecánica y del 10 % en el seguro obligatorio de accidentes de tránsito SOAT para vehículos eléctricos, junto con beneficios similares para vehículos dedicados a gas natural según la Ley 2128 de 2021, véase figura 58, para conocer el resumen de los incentivos para la movilidad alternativa. Los beneficios no económicos se centran principalmente en la eliminación de restricciones de movilidad para vehículos eléctricos. A nivel nacional, estos vehículos están exentos de medidas como el pico y placa u otras restricciones a la circulación, lo que les permite transitar libremente incluso en horarios o zonas donde otros vehículos están limitados. Algunas regiones del país han extendido estos beneficios a vehículos híbridos y aquellos que funcionan con gas natural.

### **Figura 58**

*Beneficios Económicos que estimulan el transporte sostenible en Colombia*



Nota. Tomado de (p.41), Min.Transporte, (2022).

Frente al inventario nacional de automotores a agosto de 2024, el parque colombiano alcanzó un total de 19.589.566 vehículos registrados, con una marcada predominancia de motocicletas (61.87%, es decir, 12.120.842 un.). Los vehículos representan el 37.02% (7.252.493 un.), mientras que el 1.1% restante corresponde a maquinaria, remolques y semirremolques (216.231 un.) (RUNT, 2023).

El predominio de motocicletas refleja patrones de consumo basados en la accesibilidad económica y las necesidades de transporte urbano y rural. No obstante, la reducción en las matrículas iniciales (-18.58% en 2023) respecto a 2022, pasando de 1.086.442 a 884.609 un. y la caída del 19.38% en los vehículos a gasolina matriculados evidencia un mercado que presenta caídas frente a opciones como la bicicleta, los monopatines, entre otras formas de movilidad. Los vehículos híbridos pasaron de 16.196 en 2021 a 24.575 en 2022 un 51.73% más y ya en 2023 fueron 27.694 un aumento del 12.69%; los eléctricos fueron alrededor de 4.077 en 2021, que aumentaron en 6.037 en 2022, es decir, 48.07% y para el 2023 fueron 6.297 un aumento de 4.31%.

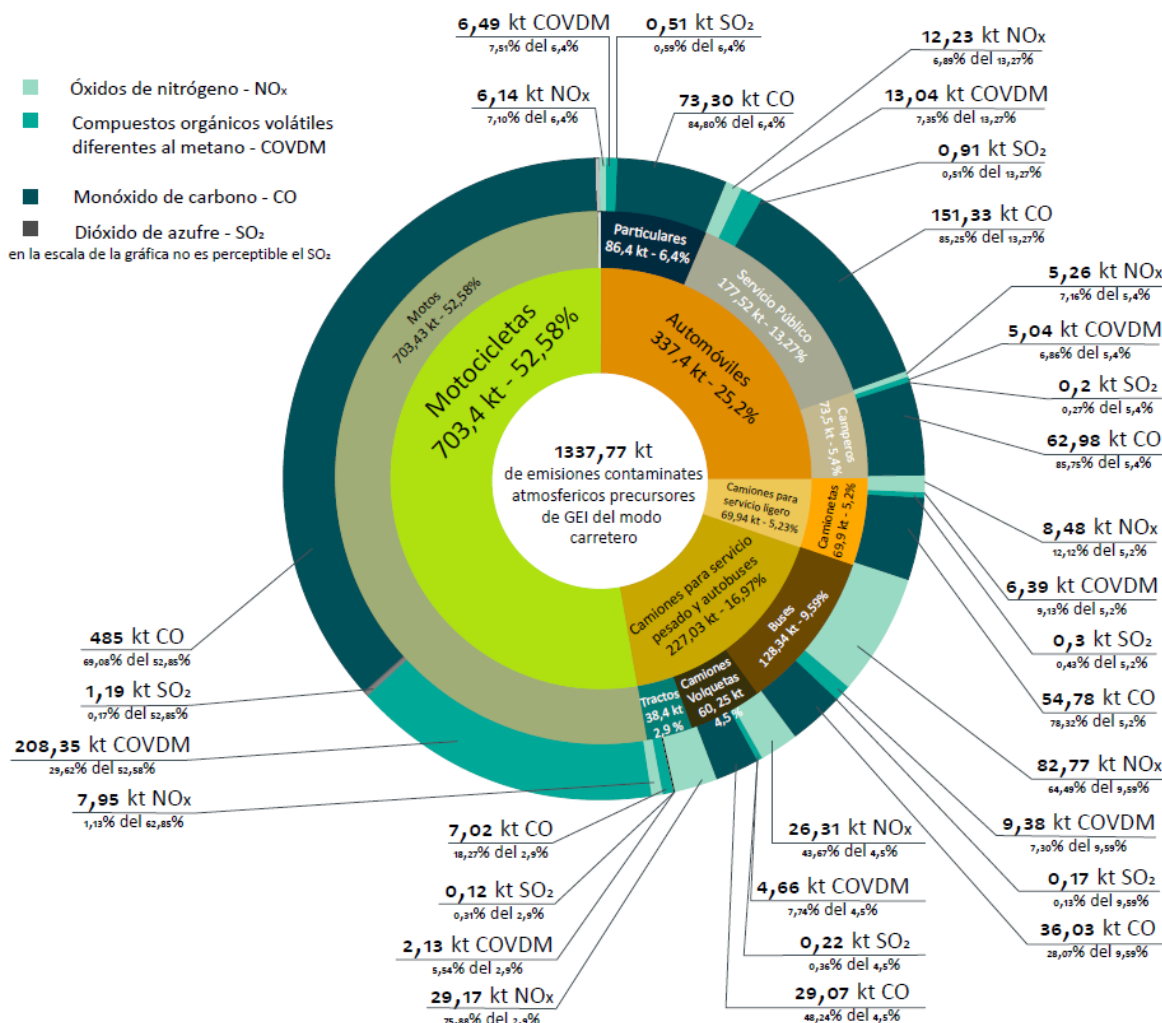
Otros tipos de combustibles pasaron de 1.213 en 2022 a 853 en 2023 una reducción de -29.68%. Las tecnologías intermedias, son esenciales para garantizar una transición inclusiva, mientras las ventas de eléctricos crecen lentamente, los híbridos demuestran ser una solución más viable en el corto plazo. Los datos de 2024 en matriculaciones de la movilidad alternativa ya superan a corte de octubre de 2024 cualquier año anterior, los cuales se desarrollan más adelante en el acápite de vehículos híbridos y eléctricos.

#### **4.3.2 Motos**

Las motocicletas son las principales responsables de las emisiones contaminantes del sector transporte en Colombia, representando el 52,58 % del total, con 703,41 kilo-toneladas. Dentro de sus emisiones, destacan el monóxido de carbono (CO): 485 kt (69,0 % del sector), compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM): 208,35 kt (81,5 % del sector), óxidos de nitrógeno (NOX): 7,95 kt (1,1 % del sector) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>): 1,19 kt (2,9 % del sector). Lo que las convierte en las mayores emisoras de contaminantes en comparación con otros vehículos como se observa en la figura 59.

#### **Figura 59**

*Inventario de Emisiones contaminantes Sector Transporte año 2018*






Nota. Tomado de (p.51), Min.Transporte, (2022).

Esta alta contribución se debe al uso masivo de motocicletas en el país y a la falta de tecnologías de control de emisiones en estos vehículos (Min. Transporte, 2022). Respecto al inventario nacional las motos, las impulsadas por gasolina siguen dominando el mercado nacional debido a sus marcadas ventajas tanto en funcionamiento como en precios. Durante Ene-Sep. de 2024 se matricularon 596.424 motocicletas en Colombia, con un crecimiento del 14,3% frente al mismo periodo de 2023 (521.985 un.).

El promedio mensual fue de 66.254 un., destacando agosto de 2024 como el mejor mes de los últimos dos años con 75.171 matriculaciones. Las motos entre 100 y 125cc dominaron el mercado con un 49,91% de participación (Andemos, 2024). Por marcas, la japonesa Yamaha lidera con 114.231 un., seguida de la colombiana AKT (101.954) y la india Bajaj (92.915), acumularon el 72,86% del mercado en el periodo estudiado. En líneas específicas, la AKT AK125NKD EIII lideró con 42.789 un., creciendo un 38% respecto a 2023, seguida por la Yamaha GPD155-A (NMAX155), que aumentó un 51,9%, y la Bajaj CT100 KS con un crecimiento del 18,1%, véase tabla 14. El predominio de motos a gasolina y su constante crecimiento, expone la necesidad de imponer medidas que desestimen su demanda y reducir en aquellas ofrecidas como las de gas convertido o eléctricas (ANDI-Fenalco, 2024).

**Tabla 14**

*Motos nuevas más matriculadas Colombia Ene-sep. 2024*

		
AKT NKD 125 🇨🇴 10.34 cv Autonomía: 2.6 Gal (9.84 L.) 128km/1Gal Autonomía máx: 332 Km Peso: 94.5 kg (seco) Cilindraje: 124 CC Vel máx.: 100 km/h Precio: \$4.640.000 COP	Boxer Ct100 🇮🇳 7.59 cv Autonomía: 2.77 Gal.(10.5L) 340.65km/1Gal Autonomía máx.: 400 km Peso: 109 kg Cilindraje: 102 CC Vel máx: 90km/h Precio: \$5.999.000 COP	XTZ150-2 🇯🇵 12.3 cv Autonomía: 3.17 Gal (12 L) 128 Km/1Gal Autonomía máx.:407 km Peso: 131 Kg Cilindraje: 149 CC Vel máx: 115 Km/h Precio: 12.900.000 COP
Nota. Datos de AKT Motos, (2024), Global Bajaj, (2024), Yamaha, (2024).		

**4.3.2.1 Motos Diésel.** Esta clase de motocicletas aún es muy poco comercializada en Colombia, llegando a venderse menos de 150 unidades en 2023. En el mercado Colombiano se encuentran 3 marcas representativas de Ene- Sept de 2024, que son la marca italiana Pliaggio 25

un. que domina con sus 3 modelos respectivamente Ape Chasis 16 un., Ape xtra X 6 un., Ape xtra x Chasis 2un., luego la japonesa Kawasaki 2 un. y por último, esta la china Shifend 1un (Andemos, 2024).

En comparación a las de gasolina convencional, las motos con diésel poseen una mayor eficiencia de combustible, un mayor torque y mayor durabilidad, sin embargo, también presentan grandes desventajas que actúan como barrera para su competitividad con las convencionales. La principal desventaja es su alto costo inicial, lo cual es sumamente importante debido a que la compra de motos se hace en gran parte por su bajo costo y es más común entre personas con menores ingresos.

Las motos Diésel tienen baja presencia en el mercado por su ruido, alta contaminación y mayor complejidad en su manejo, con mayores vibraciones y necesidad de más RPM que las motos convencionales (Publimotos, 2021). Son pesadas y menos competitivas frente a modelos ligeros urbanos. Además, requieren un mantenimiento más delicado y un motor más caliente antes de usarse (Motor Mundial, 2024). Analizando su impacto medioambiental, estas motos generan menos emisiones de  $\text{CO}_2$  que las convencionales, pero más óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), lo cual puede ser compensado en ciertos casos debido a su compatibilidad con el biodiésel.

**4.3.2.2 Motos gas convertido.** Estas motos son esencialmente motocarros originalmente diseñados para funcionar con gasolina, que han sido modificados para operar con gas natural comprimido (GNC) o gas licuado de petróleo (GLP) como combustibles alternativos. Esta conversión involucra la instalación de un kit especializado que incluye un tanque de gas, un regulador de presión, un mezclador de gas y un sistema de válvulas para alternar entre gasolina y gas. En ese sentido en su estudio expone Rojas, (2008), que:

“..., La mezcla homogénea del gas con el aire permite una combustión casi perfecta, lo cual anula prácticamente la contaminación ambiental: reduce hasta un 97% las emisiones de

monóxido de carbono (CO) y demás elementos contaminantes, con respecto a los combustibles líquidos; reduce hasta 100% las emisiones de particulado, ... (p.14)”.

En Colombia, entre ene.-sep. de 2024, se matricularon 27 motos con gas convertido. Los modelos más matriculados fueron el AK200ZW de AKT 26 un. y la Re Máxima C Petrol de Bajaj 1 un. Esta tecnología permite un nicho de mercado aprovechable para el sector de las motos de gasolina para que logren reducir sus emisiones, sin la necesidad del cambio de la moto, posición clave como tecnología transitoria que puede lograr objetivos plausibles, aunque por sus necesidades de equipamiento y kit para procesar el gas se concentran principalmente en motocarros.

**4.3.2.3 Motos Eléctricas B.E.V.** En 2024, el mercado de motos eléctricas ha presentado una disminución frente al año anterior, representando tan solo el 1% del total de motocicletas. A pesar de que el sector general de motocicletas ha crecido, las motos eléctricas se quedan atrás y es en gran medida por la oferta limitada y los precios más altos que las convencionales. Entre ene-sep. de 2024, se matricularon 1,600 motos eléctricas (BEV) en Colombia, mercado dominado principalmente por motos de origen chino.




Desagradados por clase de motos BEV de estos 1600, los motocarros BEV sumaron 157 un., liderados por la marca colombiana Brenson con 98 un., seguida de la también colombiana Akt 46 un. y Tg 6 un. entre otras. En el segmento de motocicletas BEV, se matricularon 240 un., destacando la colombiana Tg con 107 un., seguida de BMW 34 un. y Seat 21 un. (Andemos, 2024).

En ciclomotores BEV, se matricularon 1,203 un., siendo la marca china Starker la marca líder con 544 un., seguida de la también marca china Niu 222 un. Las líneas más vendidas fueron la Starker Avanti X 155 un. y la Niu NGT Sport 72 un. La marca Starker, de origen chino a través de Yadea, dominó el mercado de motos eléctricas con tres modelos destacados: Avanti X 231 un., Avanti S 150 un. y Reactor 130 un. Las principales motos BEV con más matriculaciones y sus características se pueden visualizar en la tabla 15.

Señala Henao, (2024) que el 40% de las motos eléctricas no se registran en los municipios por lo que su influencia en el mercado puede verse opacada por la falta de datos, ya que para que una bicicleta eléctrica pueda circular en las ciclovías, no debe superar una velocidad máxima de 25 km/h, el motor debe tener una potencia máxima de 350 vatios y su peso en vacío no debe exceder los 35 kilogramos, cuestiones que se pueden ver difusas en algunos modelos de motos BEV que las pueden hacer pasar como bicicletas o sus características son más similares a estas lo que les exime de necesitar licencia, SOAT o matricularse en el RUNT.

**Tabla 15**

*Motos eléctricas BEV nuevas más matriculadas en Colombia ene-Sep. 2024*

 <p><b>Stärker (Yadea)Avanti</b> ■  2000w (2.68 cv).  Peso: 124kg  Bateria: Plomo – Acido  Capacidad: 2,88 kwh -  72V/40Ah  Carga:9-10 h  Ciclos: 500-600  Autonomía: 90km  Vel. máxima: 55 Km/h  Precio: \$6.999.000</p>	 <p><b>N-GT Sport</b> ■  3000w (4.02 cv)  Peso: 111kg  Bateria: Iones Litio  Capacidad: Doble batería 3.12  kwh 60V/26Ah  Carga: 3,5 h  Ciclos: 5 años vida útil  Autonomía: 80-90km  Vel. máxima:80Km/h  Precio:\$14.590.000</p>	 <p><b>Brenson Carry</b> ■  1193.12 w (1.6cv)  Peso: 270kg  Bateria:Plomo–Acido gel  Capacidad:5/10b.60V/20-45-  90Ah  Carga: 6-10 h  Ciclos: 500  Autonomía: 30/70/140km  Vel. máxima: 35 Km/h  Precio:\$9.750.000-\$10.500.000</p>
<p>Nota. Datos de Starker Avanti X (2023); NIU N-GT (2024) y Brenson CR300 (2022).</p>		

Esta clase de vehículos fueron diseñados como el fin último de la transición energética en el sector de movilidad debido a sus emisiones directas nulas, lo que ayudaría a mejorar la calidad del aire en ciudades particularmente congestionadas como Bogotá, Medellín o Cali. Además de sus ventajas medioambientales estas motos son mucho más eficientes en términos de energía

utilizada por kilómetro recorrido y requieren mucho menos mantenimiento que las convencionales. Lamentablemente, al igual que ocurre con otros tipos de motocicletas alternativas, su principal barrera en el corto plazo es su alto costo inicial, menor autonomía, mayor peso, velocidades máximas poco atractivas y en especial la alta dependencia a la estabilidad de la red eléctrica.

### **4.3.3 Vehículos**

Los automóviles representan el 25,2% de las emisiones del sector transporte, acumulando un total de 337,14 kt de contaminantes atmosféricos para el año 2018. Dentro de estas emisiones, destacan el monóxido de carbono (CO) con 287,61 kt, lo que equivale al 40,6 % de las emisiones de CO del sector. Emiten 13,04 kt de compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM), que representan el 7,6 % de las emisiones de este contaminante en el sector. Los automóviles generan 6,14 kt de óxidos de nitrógeno (NOX), lo que corresponde al 7,1 % del sector, y 0,91 kt de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), equivalente al 2,2%.

Los camiones y autobuses para servicio pesado son responsables del 16,97 % de las emisiones del sector, sumando 221,70 kt. Estos vehículos destacan como los mayores emisores de (NOX), liberando 138,25 kt, lo que representa el 72,3 % de las emisiones de NOX del sector. Asimismo, emiten 73,30 kt de (CO), que corresponden al 8,4 % de las emisiones de CO, además de 9,83 kt de COVDM (5,7 %) y 5,26 kt de SO<sub>2</sub> (12,5 %). Por su parte, los camiones para servicio ligero representan el 5,23 % del total de emisiones del sector, alcanzando 72,57 kt. De estas, 54,78 kt corresponden a (CO) (7,8 % del sector), 6,48 kt a COVDM (3,8 %), 8,48 kt a NOX (4,4 %) y 2,02 kt a SO<sub>2</sub> (4,8 %), aunque el efecto de los vehículos es menor que el de las motos, sus contaminaciones son más diversas y contienen mayor variedad que las motos, ahora se analizará el parque automotor de vehículos para comprender las dinámicas que se están llevando a cabo producto de los incentivos normativos de la movilidad alternativa.

Respecto al inventario de vehículos, entre 2009 y 2024, el año con más vehículos matriculados fue 2011, con 333,921 un., y el año con menos fue 2023, con 186,222 un. El peor mes de la década fue abril de 2020, con solo 217 matrículas, mientras que el mejor fue diciembre

de 2014, con 40,393 un. En el período Ene-oct de 2024, se matricularon 154,013 vehículos nuevos en Colombia, un 3.8% más que en el mismo periodo de 2023 (148,393). En oct. de 2024 se registraron 18,550 un., un aumento del 33.5% respecto a oct. de 2023, pero una caída del 18% respecto a oct. de 2022 (ANDI-Fenalco Oct, 2024). Véase tabla 16 para conocer el comportamiento por tipo de combustible.

**Tabla 16**

*Cantidad de Vehículos por tipo de combustible entre ene-oct 2024*

<b>Tipo de combustible</b>	<b>En-Oc 2023</b>	<b>En-Oc 2024</b>	<b>%Año</b>	<b>Cuota mercado</b>
Gasolina	93530	91107	-2.6%	59.15%
Hibrido no Enchufable	20519	30944	50.8%	20.09%
Diésel	2982	24485	-17.9%	15.89%
B.E.V.	2768	5672	104.9%	3.68%
Hibrido Enchufable	1203	1308	8.7%	0.84%
Gas Convertido	222	279	25.7%	0.18%
Gas dedicado	328	215	-34.5%	0.13%
Etanol	//	3	//	0.001%
<b>Total nacional</b>	<b>148393</b>	<b>154013</b>	<b>3.8%</b>	<b>100%</b>

Nota. Datos de Andemos, (2024).

La venta de vehículos de carga ha venido en descenso durante el periodo de Ene-Oct de 2024 donde se habían vendido 6856 un. contra el mismo periodo de 2023, donde se vendieron 9705 un. un -24.5%, el cual también venía en descenso contra el periodo Ene-oct de 2022, donde fueron 14242 un. un -36%, Esto deja en evidencia una contracción significativa y continua en el mercado de vehículos de carga, lo que podría deberse a factores económicos adversos, restricciones en el transporte de carga, altos costos de adquisición o mantenimiento de vehículos, aunado a que Colombia es uno de los países con más peajes del mundo.

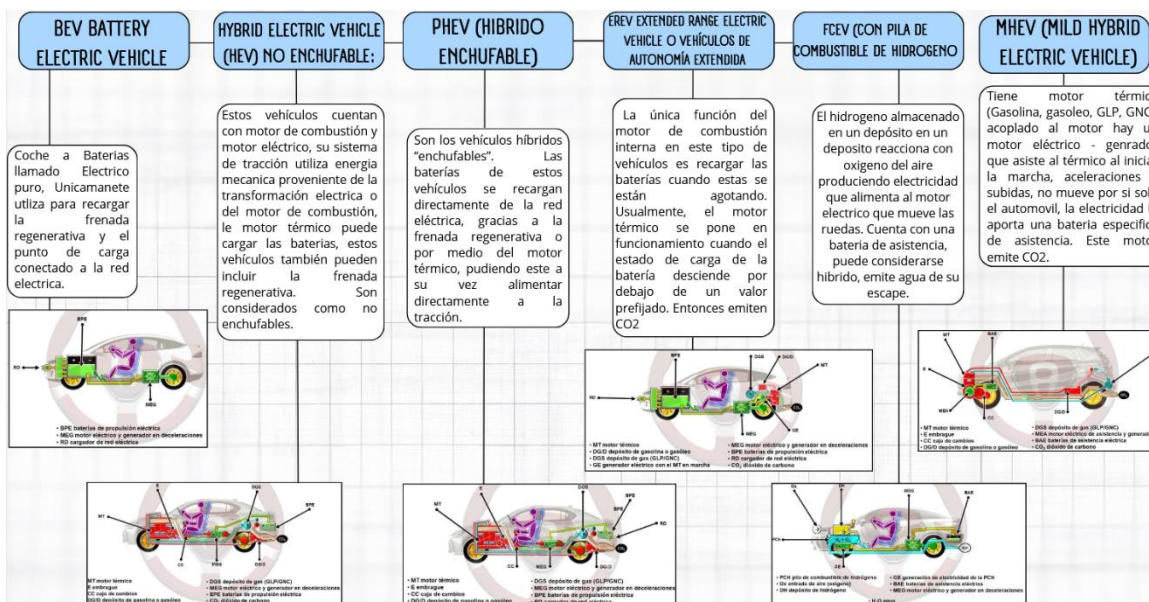
El segmento de marcas Premium en Colombia registró también una caída del 9.5% entre enero y octubre de 2024, con 5,528 un. matriculadas. Las marcas más destacadas fueron BMW con 1,645, Mercedes-Benz con 1,457 y Volvo con 1,077 un. Las líneas más vendidas incluyeron el Volvo EX30 con 496., el BMW iX3 M Sport con 222 un. Bogotá concentró la mayoría de las matriculaciones con 2,926, seguida por Medellín con 648, Cali con 353, Chía con 323 y Envigado con 256 un.

Aunque sigue siendo algo prematuro, la reducción en las ventas premium puede estar asociada a cambios en el consumo de lujo, en los que se esta optando por vehículos híbridos y electricos ya que estos aunque no son de lujo rondan los precios de estos, por lo que la conciencia ambiental puede estar delineando nuevos comportamiento hacia tecnologías alternativas que mostraron desempeños positivos. Se resalta que ya casi es un 40% del parque automotor que usa un combustible diferente a la gasolina, lo que demuestra la diversificación del sector, que beneficia a los consumidores quienes tienen acceso a mejores vehículos, más competitivos, mantenimientos más accesibles entre otros.

**4.3.3.1 Carros eléctricos.** Como expone, Montecelos, (2019) un vehículo eléctrico es uno impulsado por uno o más motores eléctricos que utiliza la energía eléctrica almacenada en baterías recargables y la transforma en energía mecánica. El motor de un automóvil eléctrico puede ser corriente alterna o continua y requiere de sistemas recargables, baterías que consumen la energía durante su desplazamiento, los tipos de vehículos eléctricos dependen más que todo del grado de electrificación, en ese sentido, los principales tipos se pueden visualizar en la figura 60.

### **Figura 60**

*Tipos de Carros Eléctricos*

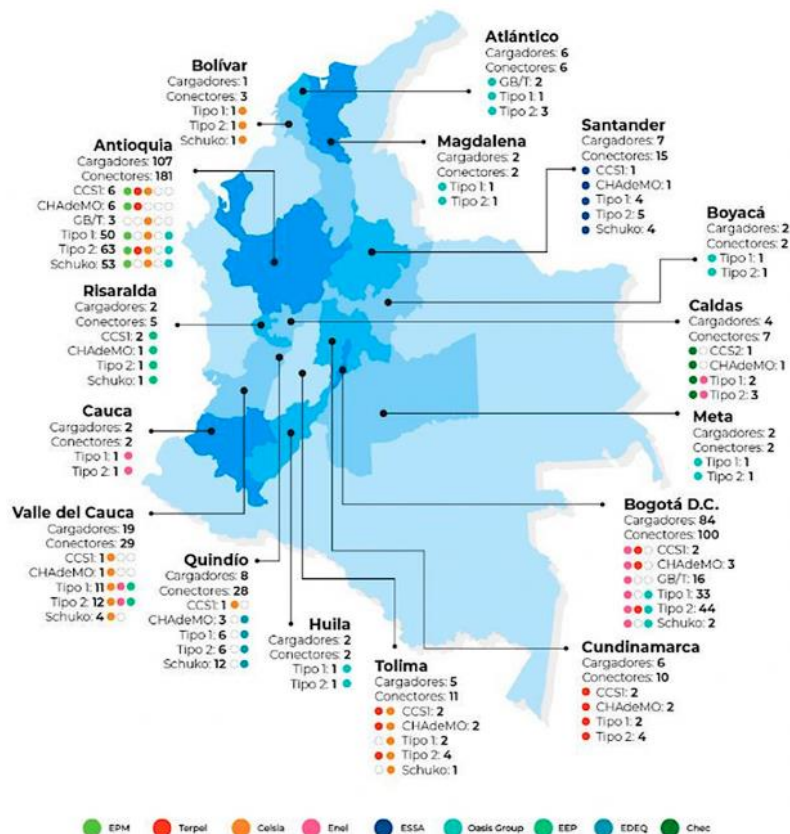


Nota. Canva, con base en Ros Marín y Barrera Doblado, (2017).

En Colombia, la infraestructura de carga para vehículos eléctricos e híbridos enchufables ha mostrado un importante crecimiento en los últimos años, impulsada por la Ley 1964 de 2019, que establece metas para la instalación de puntos de carga. El Ministerio de Minas y Energía (MME) también ha definido las condiciones mínimas de estandarización y mercado para las estaciones de carga, con el objetivo de facilitar su implementación a nivel nacional. En 2021, se contabilizaban 119 estaciones de carga de acceso público, equipadas con 259 cargadores y 405 conectores distribuidos en diferentes regiones del país. Los departamentos con mayor infraestructura instalada son Antioquia 37%, Bogotá 28% y Valle del Cauca 10%, aunque también se ha registrado un crecimiento significativo en Quindío 4%, Cundinamarca 3%, Tolima 3%, Santander 3%, Caldas 3%, Atlántico 3% y otros 6%, véase figura 61.

**Figura 61**

*Distribución nacional cargadores y conectores vehículos eléctricos 2022*



Nota. Extraído de (p. 69), Min.Transporte, (2022).

Siendo uno de los vehículos que menos emisiones causa, los carros eléctricos han tomado cada vez más fuerza y han registrado crecimientos significativos en las últimas décadas, alcanzando más de 3708 un. ventas en 2023 y manteniendo un crecimiento sostenido en 2024. El crecimiento en la compra de vehículos eléctricos a aumentado significativamente durante la última década, en el año 2014, se vendieron 20 vehículos electricos, frente a 3718 de 2023, un crecimiento de 185 veces.




Durante el 2023 se tuvo un crecimiento del 12.17% vehículos electricos frente al 2022 cuando se vendieron 3278 un. eléctricas. Todos los meses de 2024 hasta octubre fecha de corte presentaron crecimientos positivos dando una mejoría frente al 2023 de 104.9%. Con base en datos




de Andemos, (2024), oct de 2024 fue el primer mes en la historia en que se llego a los 4 digitos en matriculas con 1080 vehículos BEV creciendo un 272.4% frente a oct. 2023, rompiendo el anterior record de Julio de 2024 que fue de 778 un. El crecimiento de ene-oct ha sido del 104.9% con 5762 un. (2904 un. más que ene-oct 2023). Inclusive desde el acumulado de ene-ago 2024 que se tenían matriculados 3850 vehiculos BEV, se habia superado a todo el año 2023 que fueron 3718 un. y cualquier otro año anterior. Por lo que las cifras revelan un mercado en expansión y crecimiento que se esta posicionando con fuerza, sin duda ya en este momento 2024 a oct. es el mejor año de la historia en BEV.

De ene-oct de 2024, por marcas la china BYD lideró con 2,093 un., un crecimiento del 366.1% y una participación de mercado del 36.9% (+20.7 puntos porcentuales frente a 2023). La marca sueca Volvo y la coreana Kia también tuvieron un crecimiento significativo, del 974.6% y 4060%, alcanzando participaciones del 12.7% y 7.3%, respectivamente. reflejando una consolidación Asiatica y Europea como líderes en el segmento BEV. Los 3 principales vehículos BEV más destacados en Colombia en 2024, se pueden visualizar en la tabla 17.

**Tabla 17**

*Líneas de carros eléctricos más matriculados entre ene-oct. 2024*

BYD Seagull 	Volvo Ex30 	BMW IX3 
55kw (73,8cv)	200 kW(272cv)	213.27 kW(286 cv)
Bateria: LFP	Bateria: LFP	Bateria: Litio
Autonomia: 30.08kWh 300km380km.	Autonomia:51kWh/69 kWh344km476 km	Autonomia:80kWh 461km.
Carga: D.C. 0,7h. A.C. 5,4hDC1h.A.C. 6,9h	Carga: D.C. 26 m. A.C. 6h.D.C.28m./A.C.8h	Carga: D.C.34m A.C. 7h
Vel Max: 130 kmh	VelMax:180km/h	Vel Max: 180 kmh
Peso: 1160-1240 kg	Peso:1833 kg	Peso: 2180 kg

Precio: COP\$76.990.000	Precio: COP\$179.990.000 – 259.999.000	Precio: COP\$299.900.000
		

Nota. Datos de BYD (2024), Volvo (2024), Auto Germana (2024).<sup>63</sup>

Por líneas el líder es el modelo BYD Seagull, con 855 un. y un 14.8% de participación del mercado, destacando por un crecimiento extraordinario del 42650% frente a 2023 cuando solo se habían matriculado 2 un. Este modelo, introducido en noviembre de 2023 durante el Salón del Automóvil en Bogotá,<sup>64</sup> ha tenido un impacto inmediato al posicionarse como el BEV más vendido en el país, (Suárez A. , 2023). Le sigue el Volvo EX30, con 496 un. con un 8.7% de participación, siendo introducido en Colombia a inicios 2024 ya se ha consolidado su importancia global y local al ser reconocido como el Mejor Vehículo Urbano del Mundo 2024 por los *World Car Award*, (2024).

Este panorama refleja cómo las líneas recién ingresadas y la diversidad de la oferta están transformando la dinámica de ventas en el mercado de vehículos eléctricos en Colombia, siendo dominado por la empresa china BYD compitiendo directamente con los Premium. En Colombia los vehículos eléctricos no sólo están creciendo en el sector particular, también están buscando tener una mayor participación en flotas corporativas y transporte público. En Bogotá se encuentra una de las flotas más grandes de América Latina con más de 1.500 buses eléctricos.

Estos vehículos son de alto interés para el Estado por lo que han incentivado su compra y producción a través de incentivos y políticas públicas como la Ley 1964 de 2019, que exime de aranceles a los vehículos eléctricos hasta 2030, además de beneficios tributarios como una

<sup>63</sup> kW=Kilovatios. Cv=Caballos de fuerza. LFP= celdas de fosfato de hierro y litio (LiFePO4). kWh= Kilovatio hora. Km= Kilómetros. DC= Corriente Directa. AC=Corriente Alterna. m= Minutos. h= Horas.

<sup>64</sup> “Bogotá, 14 noviembre de 2023, Más de 150 expositores se dieron cita por 11 días en el recinto ferial para exhibir cerca de 400 modelos de automóviles y motocicletas, de más de 42 marcas. Cerca de 165 mil visitantes disfrutaron la experiencia del Salón del Automóvil Edición Especial 2023, ... (párr.1)” (Corferias, 2023).

reducción en el I.V.A. y un descuento en el impuesto vehicular. Si bien estos vehículos son una de las opciones menos contaminantes junto con los de hidrógeno, su precio inicial sigue siendo poco competitivo con los convencionales, por lo que actualmente compiten con los carros de lujo y Premium.

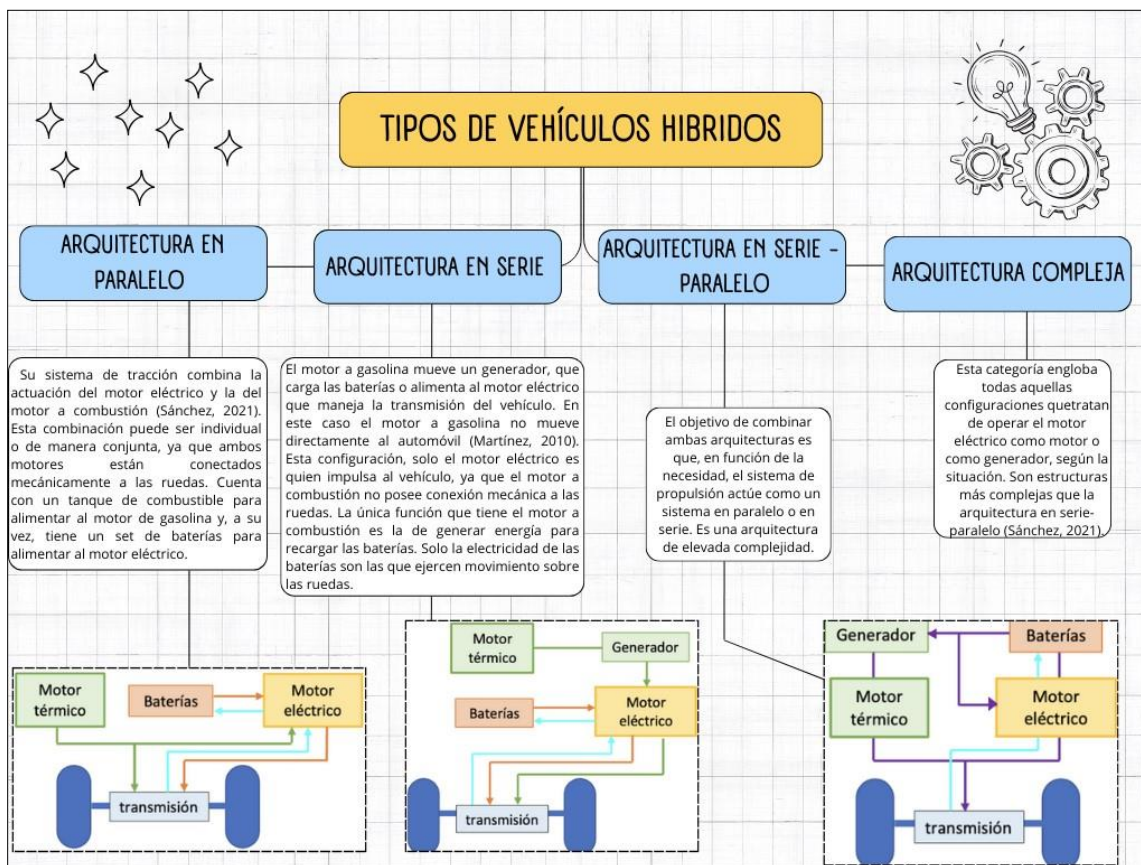
**4.3.3.2 Carros híbridos.** Existen diferentes tipos de carros híbridos, dependiendo de cómo está incorporado el motor eléctrico. Los híbridos convencionales (HEV), incorporan un motor eléctrico que se recarga durante las frenadas, aunque es auto recargable y ayuda a reducir las emisiones y el consumo de gasolina, su autonomía solo da para aproximadamente tres kilómetros sin recurrir al de combustión. Los híbridos enchufables (PHEV), pueden circular desde 40 a 100 km sin generar emisiones, lo cual cubre los viajes de varios días para trayectos cortos, sin embargo, para trayectos largos el consumo de combustible aumenta si se descarga por completo la batería. Las principales arquitecturas de los carros híbridos se pueden visualizar en la Figura 62.

Exponen Andi- Fenalco, (2024) que en Colombia se viene presentando un crecimiento notable en la adopción de vehículos híbridos de la última década, pues mientras en 2014 solo se vendieron 214 vehículos, en 2023 se tuvo el mayor número de híbridos vendidos de la historia del país con 27.813 un. un crecimiento en la década de 12896.7% y respecto al 2022 cuando se vendieron 24556 tuvo un crecimiento de 13.26% (Andemos, 2024).

En Colombia a corte entre ene-oct del 2024 se matricularon unos 32252 vehículos híbridos, un crecimiento del 48.4% frente al mismo periodo del año 2023, todos los meses del 2024 fueron positivos frente al mismo mes del año anterior, septiembre de 2024 ha sido el primer mes más altos en matriculas en venderse 4124 vehículos híbridos. Las principales marcas de híbridos vendidos fueron de origen japonés con Toyota con 10297 un. con una participación del 31.9%, le sigue la también japonesa Mazda con 6074 un. y 19.2% de mercado, tercero es Suzuki con 4978 un. y 15.4% de participación. Las líneas más comercializadas fueron la Toyota Corolla Cross con 5889, el Mazda Cx-30 con 4995 y la Suzuki Swift con 2966 un.

Figura 62

## Principales arquitecturas de vehículos híbridos



Nota. Canva, Con base en Pérez-Sepa, et al., (2022).

Estos datos revelan un mercado en auge y crecimiento, que muestra el cambio en el comportamiento de los compradores de vehículos, pues el usuario Colombia, busca alternativas que no tengan limitaciones como las de 'pico y placa', pero, que permitan ser un transporte viable ante la falta de infraestructura de carga eléctrica, aunado a los incentivos propuestos en distintas normas, es posible prever, que los híbridos seguirán tomando cada vez más cuota del mercado.

**4.3.3.3 Vehículos de Hidrógeno.** Esta clase de vehículos han ganado popularidad en los últimos años debido a sus emisiones directas nulas y el crecimiento de la industria del hidrógeno en el mundo. Los vehículos de hidrógeno utilizan una celda de combustible que combina el hidrógeno con el oxígeno del aire para generar electricidad e impulsar un motor eléctrico. El único subproducto de este proceso es el vapor de agua el cual no es contaminante. Si bien la producción de hidrógeno ha avanzado en Colombia, mediante diversos proyectos liderados por varias empresas, la adopción de vehículos de hidrógeno es incipiente y no muestra un elevado crecimiento a largo plazo. En el 2022, se matriculó el primer automóvil de hidrógeno en el país (Min. Energía Prensa, 2023).

Este primer piloto de transporte masivo se desarrolló en tres principales etapas: la producción de hidrógeno a través de un electrolizador de 165 Kw cuya fuente primaria de energía será un sistema solar fotovoltaico instalado en los patios del Green Móvil, el sistema de producción y estación de recarga de hidrógeno con presiones de hasta 350 bar y almacenamiento de 140 kg, contando con una autonomía de más de 450 km.

Se plantea un transporte terrestre que para 2030 se tiene pensado con vehículos de pila de combustible a base de hidrógeno estimándose entre 1500 y 2000 unidades, así como 1000 a 1500 vehículos pesados matriculados por año y entre 50-100 hidro-generadoras de acceso público, lo que plantea inversiones necesarias de entre US\$2500 y \$5000 millones, con la posibilidad de crear entre 7000 y 15000 empleos (Min. Energía HRH, 2021).

**4.3.3.4 Vehículos de Gas Natural Convertido.** Si bien esta clase de vehículos parten de la conversión de los vehículos de gasolina o Diésel, constituyen una tecnología intermedia viable para la movilidad en Colombia en el corto y mediano plazo hasta por lo menos el año 2035, como movilidad de transición (Consultoría 041, 2020). La combustión del gas natural vehicular permite una combustión más limpia en comparación con la gasolina o el diésel, reduciendo las emisiones contaminantes y contribuyendo a la protección del medio ambiente (GNU, 2024).

Este combustible también posee un menor costo por unidad de energía y genera menos residuos y depósitos aumentando la vida útil de los vehículos. En Colombia, el mercado de este tipo de vehículos ha experimentado crecimiento con 24.6% pasando de 248un. en 2023 a 309un. en 2024, siendo las ciudades más destacadas en matriculaciones de este tipo Envigado, Funza, Medellín y Mosquera para 2024. Además, el país ya cuenta con una red de estaciones de servicio para suministrar este combustible (Andemos, 2024).

**4.3.3.5 Vehículos de Gas licuado de Petróleo (GLP).** Aunque siguen presentando emisiones, se alinean con el objetivo de las tecnologías intermedias en cuanto se reducen significativamente en comparación con los convencionales de gasolina se espera su entrada al mercado entre 2030 y 2035 (Consultoría 041, 2020). El gas licuado de petróleo es una mezcla de hidrocarburos ligeros, principalmente propano y butano, que se encuentra en estado gaseoso a temperatura ambiente y se licúa bajo presión.

Se utiliza como combustible para vehículos mediante sistemas de inyección que permiten su combustión eficiente. Entre sus beneficios se encuentran la reducción en costos operativos ya que es más económico que la gasolina, menor emisiones contaminantes y mayor duración del motor, además de una compatibilidad con sistemas *bifuel*. Actualmente Colombia ya cuenta con una normatividad para el uso de GLP como combustible vehicular, lo que impulsó el desarrollo del mercado. Leyes como la Ley 2128 de 2021, así como resoluciones y normas técnicas establecidas en los años siguientes han incentivado el uso del GLP y han contribuido a aumentar la conversión, particularmente en taxis y vehículos particulares. Por otra parte, se han fijado directrices técnicas para los talleres que brindan estos servicios de conversión debido a que requieren del cumplimiento de requisitos para poder operar.

## 5. Conclusiones

El enfoque de transición energética y reindustrialización del gobierno de Gustavo Petro busca transformar la economía de Colombia hacia una basada en el conocimiento, la tecnología y la innovación, dejando atrás su dependencia extractivista. El PND 2022-2026 plantea aprovechar el potencial del país en energías renovables, como solar y eólica, mientras se utilizan recursos transitorios como el gas natural para garantizar una transición gradual. Este proceso incluye proyectos como la Hoja de Ruta del Hidrógeno y la expansión de tecnologías limpias en sectores clave como transporte e industria, bajo el marco de compromisos internacionales como el Acuerdo de París.

El desafío radica en equilibrar la implementación de estas tecnologías con las condiciones territoriales, sociales y económicas. Diversos estudios destacan la necesidad de políticas claras, incentivos fiscales y alianzas entre el sector público y privado para lograr una transición inclusiva y sostenible. En Colombia, los sistemas de almacenamiento a gran escala como el hidroeléctrico, y térmico son esenciales para garantizar la estabilidad de la red eléctrica, especialmente cuando las energías renovables no cubren la demanda, por tanto su promoción e implementación genera un mix energético que aumenta la confiabilidad y abastecimiento de electricidad, ya que en el almacenamiento hidroeléctrico, que representa aproximadamente el 66% de la generación eléctrica del país, se cuenta ya con 30 centrales en las principales fuentes hídricas.

El almacenamiento térmico, es el segundo mayor responsable de suplir la demanda energética, destacando las 16 centrales térmicas que cubren períodos de sequía, como en el fenómeno del Niño, lo que permite a Colombia ser resiliente ante estos fenómenos. La electrólisis a alta temperatura y el hidrógeno producido desde distintas fuentes pueden ofrecer la disponibilidad del recurso en el país y abrir el camino a otras tecnologías emergentes en el país,

los proyectos de generación eólica en región que presenta vientos promedio de 7 m/s frente a 2.5 m/s en otras áreas. Aunque la tecnología off-shore ofrece mayor capacidad por los fuertes vientos costeros, solo el 16% de los proyectos son marinos debido a los elevados costos de infraestructura.

Por otro lado, la energía solar, dominada por paneles de Si monocristalino (eficiencia del 26.7%), destaca por avances tecnológicos, reducciones de costos (92% desde 1990) y un tiempo de recuperación energética de menos de un año en climas favorables. Aun así, su dependencia de materiales raros como Cd, In y Te plantea desafíos en costos, suministro y sostenibilidad, en especial debido a la dependencia de la importación de estos elementos y los pocos conocimientos sobre yacimientos en Colombia, lo que nos hace vulnerables a las coyunturas y crisis internacionales, en especial las que deriven de China por ser el mayor productor de leños de paneles solares.

La biomasa, fuente clave en la transición energética, aprovecha residuos orgánicos de origen agrícola, pecuario y urbano para generar energía renovable. En Colombia, el sector agrícola es la principal fuente de biomasa, representa también la principal fuente de emisiones del país, en este sector se necesitan estrategias de tecnificación de procesos, acceso a energía eléctrica, gasificación de lo rural para el mejoramiento de cocción de alimentos, así como protección ante plagas, enfermedades, también el acceso a carreteras, que permita llevar al campo las tecnologías para cogenerar energía o producir biogás.

Por su parte, el sector pecuario aporta residuos significativos, destacando el ganado bovino y bufalino, cuyas emisiones de GEI pueden mitigarse con estrategias como el cambio en los sistemas de producción mejoramiento de dietas animales, mejor gestión del estiércol, mejoramiento y diversidad de la genética animal, así como estrategias de reforestación y promoción de otros tipos alimentos.

Los residuos sólidos urbanos también representan un recurso potencial, aunque su aprovechamiento enfrenta desafíos como la disposición no autorizada en regiones específicas, la

fragmentación normativa, el sobresaturamiento de sitios de residuos, así como la no obligatoriedad del país con el reciclaje, cuestiones de asuntos municipales que conlleva a legislaciones difusas, discontinuas y que nos traspasan Gobiernos. La cogeneración, el reciclaje desde origen, la posibilidad de crear centros especializados de reciclaje para minerales estratégicos y baterías, entre otras estrategias. El país cuenta con subproductos orgánicos de alto potencial energético, como residuos de cosechas, efluentes ganaderos y lodos de aguas residuales. Según los estudios analizados, su poder calórico permite transformarlos en energía mediante procesos exotérmicos, entre los que se destaca la producción de energía eléctrica, gas, biogás, hidrógeno, entre muchas otras.

Pasando al gas natural, como eje industrializador, en Colombia, su desarrollo comenzó desde 1961 y, en la actualidad, más de 10 millones de hogares usan gas natural. Las reservas probadas de gas han disminuido de 14.1 años en 2007 a solo 6.1 años en 2023, conforme a las observaciones en el corto plazo se puede asumir que el país ha reducido su capacidad de auto-sostenimiento de gas natural, esto ha llevado a una mayor dependencia de las importaciones de gas. Este aumento en las importaciones es directamente atribuible a la mayor demanda de gas para la generación térmica, que aumentó 64,1% debido a la sequía y la disminución de la capacidad hidroeléctrica, pero, en el mediano y largo plazo con la entrada en operación de proyectos claves como el Sirius en la Costa Caribe prometen aumentar las reservas en 2.5 veces las actuales dando reservas hasta inclusive para 20 años. La producción de gas natural se encuentra altamente concentrada en pocos departamentos y empresas, con Casanare liderando la producción nacional. Lo que genera sistemas oligopolístico.

Entre los proyectos clave del gas se destacan el gasoducto que conectará el VIM con el interior en el Magdalena Medio, con una capacidad proyectada de 400 MPCD y una inversión de 877 millones usd, que se espera entre en operación para 2026. Igualmente, se requiere la conexión de Cúcuta al SNT, un proyecto que garantizaría el abastecimiento a la región, que se encuentra con sus pozos en agotamiento crítico. Además, la Infraestructura de Importación de Gas del

Pacífico en Buenaventura, con una capacidad de 400 MPCD y un costo de 925 millones usd, es fundamental para suplir la demanda del suroccidente, con fecha de puesta en marcha para 2030. Otros proyectos relevantes incluyen la conexión de Bogotá al SNT, que demandará 215 MPCD para 2030, y un gasoducto para La Guajira con fases de 50 y 150 MPCD en 2026 y 2029, respectivamente, con un costo de 173 millones usd.

La expansión de la infraestructura es una gran necesidad pues son más de 5,4 millones de colombianos (10,6% de la población) que dependen de leña, carbón o desechos para cocinar, lo que genera graves impactos a la salud y ambientales. La UPME proyecta que para 2050, todas las familias colombianas tendrán acceso a fuentes más eficientes como gas natural, biogás, GLP o electricidad. Esta transformación será crucial para reducir las emisiones, mejorar la salud pública y mitigar la dependencia del carbón, sin olvidar que es un símbolo de mejoramiento de la calidad de vida especialmente en regiones históricamente olvidadas como La Guajira, donde el carbón sigue siendo un pilar económico, pero, las personas de la región poco o nada disfrutan de sus grandes beneficios de las explotaciones.

A pesar de lo anterior, el país es el quinto exportador mundial de carbón, un pilar en las exportaciones colombianas, especialmente el carbón térmico, que representa el 15% de las exportaciones colombianas, y el carbón metalúrgico, vital para la industria del acero, por lo que la diversificación de la matriz energética de Colombia garantiza la resiliencia ante la posible caída de las exportaciones de carbón en el medio y largo plazo, conforme a las tendencias y esfuerzos políticos que están apostando en conjunto por energías renovables. La gasificación del carbón podrían ser clave en la transformación hacia energías más limpias, garantizando el gas a más colombianos y produciendo otras energías como la eléctrica o el hidrógeno.

La captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CAC) es un grupo de tecnologías emergentes cruciales para mitigar el cambio climático, especialmente en sectores industriales de difícil descarbonización como el cemento y acero, que representan cerca del 30% de las emisiones industriales globales. Las tecnologías de CAC podrían capturar hasta el 20% de las emisiones

globales para 2050, que podría limitar el calentamiento a 1.5°C. Tecnologías como las membranas aún enfrentan altos costos y problemas de escalabilidad. La absorción química, con aminas líquidas, tiene un costo alto por tonelada, lo cual sigue siendo alto frente a los precios de emisiones de CO<sub>2</sub> en mercados de carbono. Materiales adsorbentes como carbón activado, zeolitas y MOFs tienen gran potencial, pero su adopción masiva depende de la reducción de costos y de la producción en gran escala en lo local pues Colombia es un importador neto en casi la mayoría de insumos base de las nuevas tecnologías, áreas en las que Colombia aún no tiene ni industria, ni investigaciones suficientes frente a países desarrollados, no obstante esto representa una oportunidad de hallazgos y descubrimientos de minerales e insumos que industrialicen al país.

La electrificación y el almacenamiento de energía son fundamentales en la transición hacia un modelo energético más sostenible y eficiente, la adopción masiva de tecnologías como las baterías de Li, V y NaS, que actualmente representan mercados con crecimientos significativos (por ejemplo, el mercado global de baterías de Li creció un 48.4% entre 2021 y 2022), puede ofrecer beneficios a largo plazo, incluyendo la posibilidad de la reindustrialización del país logrando la reducción de emisiones GEI y el impulso a la innovación. Se necesita de alta inversión inicial y las implicaciones medioambientales de la minería como, por ejemplo, la del Li o la extracción de cobalto, limitan la expansión de estas tecnologías, a pesar de sus altas eficiencias y capacidades de reciclaje, por lo que se debe plantear si el país quiere esa minería a gran escala y los gastos de agua en la producción de tales materiales.

En este contexto, Colombia podría aprovechar su potencial para la extracción local de Li y V, contribuyendo a la cadena global de suministro, pero también es esencial que se implementen prácticas sostenibles en la extracción y reciclaje de estas baterías. Las baterías de V, por su parte, tienen el atractivo de ser más sostenibles para almacenamiento a gran escala, con una vida útil prolongada y sin las restricciones de las tecnologías de Li. A pesar de los costos, estas tecnologías ofrecen un camino hacia una mayor integración de energías renovables, lo que podría significar en mayor resiliencia en el sector energético.

A grandes rasgos se evidencia que las tecnologías intermedias desempeñan un papel esencial al servir de puente entre el actual modelo basado en combustibles fósiles y un futuro dominado por fuentes 100% renovables. Aunque estas tecnologías no eliminan por completo las emisiones de gases de efecto invernadero, su implementación permite una reducción significativa de las mismas, facilitando así una transición gradual y sostenible. Este enfoque resulta particularmente relevante en contextos donde la infraestructura y los recursos existentes aún no permiten una migración total hacia energías limpias.

Por otro lado, esta investigación revela la diversidad de fuentes energéticas disponibles, destacándose la biomasa, la energía eólica y la solar, así como el rol estratégico del gas natural. En este sentido, se reconoce que el gas natural, al ser el combustible fósil menos contaminante, continúa siendo un vector clave en el corto y mediano plazo, además que ayuda a la superación de la pobreza, reduce el gasto futuro en el sistema de salud y mejora la calidad de vida de las personas, que quienes aún no tienen acceso son esencialmente los campesinos.

Desde una postura Heterodoxa, la financiarización de este sector puede ser el eje fundamental de su desarrollo, las nuevas tendencias *Postkeynesianas* ven en el impulso capitalista del insumo como bien material la posibilidad de crecimiento económico, desde el *Neoshumpeterianismo*, se podría señalar que los esfuerzos en el desarrollo de parques solares, eólicos y la importación masiva de tecnologías, el uso del crédito, la limitación en otras áreas de inversión para la compra de tecnología que favorece y dinamiza las industrias extranjeras, plantea serias limitaciones al no haber la transferencia de conocimiento adecuada que resulta clave en los procesos de transformación industrial, inclusive la ingeniería inversa fue estrategia que permitió a países como China lograr su influjo industrial moderno, cuestiones que no se ven, ni se encuentran plasmadas en la compra masiva de estos dispositivos.

La falta de una regulación unificada y la escasa inversión en investigación, desarrollo e innovación constituyen barreras que deben ser superadas para alcanzar una transición energética integral y competitiva a nivel nacional. Asimismo, la investigación destaca la relevancia de la

economía circular como estrategia complementaria para el aprovechamiento de subproductos agrícolas, pecuarios y residuos sólidos urbanos. La transformación de estos residuos en recursos energéticos no solo contribuye a la reducción del impacto ambiental, sino que también promueve el desarrollo industrial local y la generación de nuevas oportunidades económicas y de empleo.

Finalmente, se recomienda fortalecer las políticas públicas y establecer alianzas estratégicas entre el sector público, privado y académico. Es imperativo impulsar la inversión en I+D+i, condicionar las compras y el gasto público en tecnología con la transferencia del conocimiento, mejorar la infraestructura y adoptar marcos regulatorios coherentes que incentiven el desarrollo de tecnologías limpias. Solo a través de un enfoque coordinado y multidimensional será posible consolidar un proceso de reindustrialización que se alinee con los objetivos de una transición energética justa, sostenible y competitiva.

En síntesis, el presente estudio articula un marco conceptual y práctico que demuestra la viabilidad y la necesidad de integrar tecnologías intermedias en la reindustrialización del país y en especial nororiente colombiano, por ser la región con mayores potenciales territoriales. Esta integración no solo contribuirá a la mitigación del cambio climático y a la diversificación de la matriz energética, sino que también sentará las bases para un desarrollo industrial que responda a las exigencias de un mercado global en constante transformación, pero, se necesitan unificar posturas latinoamericanas que den a Colombia juntos a sus países hermanos la posibilidad de negociar la transferencia de conocimiento, que permita el surgimiento de tecnologías colombianas en energías renovables, pues solo con posturas integradas de países se pueden negociar todas estas exigencias, para que los países latinos utilicen la transición energética como eje de trabajo industrial y desarrollo del crecimiento económico.

## Referencias Bibliográficas

- Ashling, C. W., Macreadie, L. K., Southern, T. J., Zhang, Y., McHugh, L., Evans, , R. C., . . . Bennett, T. D. (01 de Marzo de 2021). Guest size limitation in metal–organic framework crystal–glass composites [Limitación del tamaño de los huéspedes en compuestos cristal-vidrio con estructura metal-orgánica]. (A. Hagfeldt, Ed.) *Journal of Materials Chemistry A*, 13, 7993-8816. doi:<https://doi.org/10.1039/D0TA11229A>
- Acosta, A. (21 de Agosto de 2022). *El gas natural: puente a la transición energética*. Obtenido de Razón Pública: <https://razonpublica.com/gas-natural-puente-la-transicion-energetica/>
- Acuerdo Ambiental. Escazú. (06 de Septiembre de 2022). *Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y el Caribe*. Obtenido de Repositorio CEPAL: <https://repositorio.cepal.org/entities/publication/624ca75e-7b4e-4f1b-b314-1f9d27ee3245>
- Acuerdo de París. París. (2015). *El Acuerdo de París*. Obtenido de ONU-Acción por el clima: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- Aescol. (s.f.). *Una historia de cómo estamos acelerando el futuro de la energía juntos*. Obtenido de Our history Aes Colombia: <https://www.aescol.com/es/our-history>
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2023). *Informe de Reservas y Recursos Contingentes de Hidrocarburos*. Hidrocarburos, Bogotá. Recuperado el 13 de Agosto de 2024, de <https://www.anh.gov.co/es/noticias/informe-anual-de-reservas-y-recursos-irr-2023/>
- Agencia Unal. (30 de Octubre de 2015). *Colombia necesita zeolitas, pero no las produce*. Obtenido de Ciudad y Territorio: <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/colombia-necesita-zeolitas-pero-no-las-produce>
- AHC. (2024). *Quiénes somos*. Obtenido de Asociación Hidrogeno Colombia: <https://hidrogenocolombia.com/>
- AKT Motos. (2024). *AKT Karguero 3W 200*. Obtenido de Motos: <https://www.aktmotos.com/motos/carguero/karguero-3w-200>
- AKT Motos. (2024). *AKT NKD 125*. Obtenido de Akt: <https://www.aktmotos.com/motos/calle/nkd-125-led>

- Alcanos de Colombia. (2024). *¿Qué hacemos?* Obtenido de <https://alcanosesp.com/acerca-de-nosotros/que-hacemos>
- Al-Haj, H. I. (09 de Diciembre de 2011). *Fouling in Heat Exchangers [Ensuaciamiento en intercambiadores de calor]*. doi:10.5772/46462
- Amazon. (2024). *¿Qué es el 5G?* Obtenido de AWS Amazon: <https://aws.amazon.com/es/what-is/5g/>
- ANDEG. (2024). *Parque térmico, aliado fundamental del sector eléctrico colombiano. Guía del Gas*. Obtenido de Asociación Nacional de Empresas Generadoras: <https://guiadelgas.com/parque-termico-aliado-fundamental-del-sector-electrico-colombiano/>
- Andemos. (2024). *Matricula de motos nuevas*. Obtenido de <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZmE4NTg1YWQtYWNjNS00YWM4LTlmYTctZWl3OTE3OTA0N2FmIiwidCI6IjQ5Yzk3Yzk0LTE1ZjMtNDc2ZS05ODY1LTlywMzQzNTMxNWRjZSJ9>
- Andemos. (2024). *Vehículos Nuevos Matriculados*. Obtenido de [https://lookerstudio.google.com/u/0/reporting/ceb8deeb-3b00-4e08-8536-5a0f2ebb5cf2/page/p\\_9254urezpd](https://lookerstudio.google.com/u/0/reporting/ceb8deeb-3b00-4e08-8536-5a0f2ebb5cf2/page/p_9254urezpd)
- Andemos. (2024). *Vehículos Nuevos Matriculados*. Obtenido de <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZmE4NTg1YWQtYWNjNS00YWM4LTlmYTctZWl3OTE3OTA0N2FmIiwidCI6IjQ5Yzk3Yzk0LTE1ZjMtNDc2ZS05ODY1LTlywMzQzNTMxNWRjZSJ9>
- Andi- Fenalco. (Julio de 2024). *Informe Vehículos Eléctricos e Híbridos Julio 2024*. Obtenido de Gremial: <https://www.fenalco.com.co/blog/gremial-4/informe-vehiculos-electricos-e-hibridos-julio-2024-7393>
- ANDI H2. (2024). *¿Quiénes somos?* Obtenido de ANDI: <https://www.andi.com.co/Home/Camara/1044-camara-de-hidrogeno-andi-naturgas>
- ANDI-Fenalco. (2024). *Registro de Motocicletas nuevas en Colombia*. Mensual, Cámara de la Industria de Motocicletas. Recuperado el Octubre de 2024, de [https://drive.google.com/file/d/1MhPxYB\\_ZaVWbYabL5QF3iasXXD62wyLD/view?pli=1](https://drive.google.com/file/d/1MhPxYB_ZaVWbYabL5QF3iasXXD62wyLD/view?pli=1)
- ANDI-Fenalco Oct. (2024). *Boletín Vehículos Nuevos Octubre*. Obtenido de <https://www.andi.com.co/Home/Noticia/17754-andi-y-fenalco-en-octubre-del-2024>

- Andrade Guel, M. L., López López, L. I., & Sáenz Galindo, A. (2012). *Nanotubos de carbono: funcionalización y aplicaciones biológicas*. Académico, Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas, Coahuila. Obtenido de [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-01952012000300002#:~:text=Los%20nanotubos%20de%20carbono%20\(NTC's,de%20pared%20m%C3%BAltiple%20\(MWCNT's\).](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-01952012000300002#:~:text=Los%20nanotubos%20de%20carbono%20(NTC's,de%20pared%20m%C3%BAltiple%20(MWCNT's).)
- Angulo, R., Espinosa, F., & Quinchua, J. (2023). *A El gas natural como vehículo para elevar el bienestar y reducir la privación energética de los hogares en Colombia*. . Naturgas. Recuperado el 2024, de <https://naturgas.com.co/wp-content/uploads/2023/05/>
- ANLA. (11 de noviembre de 2020). *Proyecto Central Hidroeléctrica de Bajo Anchicayá*. Obtenido de Proyecto de interes en seguimiento: [https://www.anla.gov.co/01\\_anla/proyectos/proyecto-de-interes-en-seguimiento-central-hidroelectrica-de-bajo-anchicaya#:~:text=El%20proyecto%20Central%20Hidroel%C3%A9ctrica%20Bajo,de%20El%20Danubio%20\(Dagua\).](https://www.anla.gov.co/01_anla/proyectos/proyecto-de-interes-en-seguimiento-central-hidroelectrica-de-bajo-anchicaya#:~:text=El%20proyecto%20Central%20Hidroel%C3%A9ctrica%20Bajo,de%20El%20Danubio%20(Dagua).)
- ANLA. (2024). *Central Hidroeléctrica Alto Anchicayá*. Obtenido de Proyectos de interes en seguimiento: <https://www.anla.gov.co/proyectos-de-interes-en-seguimiento/pis-central-hidroelectrica-alto-anchicaya>
- ANM. (03 de Diciembre de 2023). *Autoridad minera definió los nuevos minerales estratégicos del país*. Obtenido de Agencia Nacional de Minería: <https://anm.gov.co/autoridadmineradefinenuevosminerales>
- Aoshima, K. (2012). *イタイイタイ病の現状と今後* [Estado actual y futuro de la enfermedad de Itai-itai]. *日本衛生学雑誌* [Revista Japonesa de Higiene], 67(4), 455-463. doi:<https://doi.org/10.1265/jjh.67.455>
- AquaTerra Group MEA. (2024). *Monoetanolamina (MEA)*. Obtenido de Product: <https://aquaterra.com.co/product/monoetanolamina-mea/>
- Arcgis. (2024). *Centrales Hidroeléctricas en Colombia*. Obtenido de <https://www.arcgis.com/apps/MapTour/index.html?appid=b99ca1ebffff48ecaa6f2f81c8c8a87f>
- Argos. (2010). *Central Hidroeléctrica Porce III*. Obtenido de Proyectos: <https://colombia.argos.co/proyectos/central-hidroelectrica-porce-iii/>

- Arnabat, I. (26 de Agosto de 2023). *Funcionamiento de la bomba de calor aire agua*. Obtenido de Calor y Frio: <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/bombas-de-calor-reversibles-aire-agua-sistemas-integrales.html>
- Asocaña. (2024). *Informe Anual 2023-2024*. Sector Agroindustrial de la Caña. Recuperado el 2024, de <https://www.asocana.org/documentos/2562024-B8F8FBCE-00FF00,000A000,878787,C3C3C3,0F0F0F,B4B4B4,FF00FF,FFFFFF,2D2D2D,A3C4B5.pdf>
- Asoenergía. (2023). *Informe Sectorial No 41*. Agosto. Obtenido de <https://asoenergia.com/wp-content/uploads/2023/10/Informe-sectorial-Asoenergia-No.-41-Agosto-2023.pdf>
- Astronomia. (2024). *La Luna y las mareas: un mar que sube y baja*. Obtenido de Astronomia: <https://www.astromia.com/solar/lunamareas.htm>
- Auto Germana. (2024). *El placer de conducir sin emisiones BMW IX3*. Obtenido de BMW IX3: <https://landing.autogermana.com.co/bmw-ix3>
- Autocosmos. (2024). *Toyota Corolla Cross HEV SEG (2024)*. Obtenido de Toyota: <https://www.autocosmos.com.co/catalogo/2024/toyota/corolla-cross-hev/seg/168949>
- Barrero F., A. (26 de Septiembre de 2024). *Energía. Energías Renovables el periodismo de las energías limpias*. Obtenido de <https://www.energias-renovables.com/eolica/eolica-sin-precedentes-20240926>
- BBVA. (14 de Mayo de 2024). *Sembrando el futuro: sector Agropecuario Informe Ganado Bovino*. Obtenido de BBVA: <https://www.bbvaesearch.com/publicaciones/colombia-sembrando-el-futuro-sector-agropecuario-informe-ganado-bovino/>
- Benavides, C. A. (Mayo de 2016). *Análisis del mercado de gas natural en Colombia*. Obtenido de Repositorio Andes: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/c6e99265-9779-4843-8bec-e3e33f764906/content>
- Benavides, J. C. (2022). *Transición energética en Colombia: política, costo de la carbono – neutralidad acelerada y papel del gas natural*. Obtenido de Fedesarrollo: <https://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/4318>
- Benavides, J., & Cadena, Á. (15 de Octubre de 2018). *Mercado eléctrico en Colombia: transición hacia una arquitectura descentralizada*. Fedesarrollo, Repositorio, Bogotá. Obtenido de [https://repositorio.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/3673/Repor\\_Octubre\\_2018\\_Benavides\\_y\\_Cadena.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/3673/Repor_Octubre_2018_Benavides_y_Cadena.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Berga Casafont, L. (2015). *Tres Gargantas Adéntrate en esta colosal obra de ingeniería. Para su construcción hubo que desviar el río Yangtsé y desplazar a más de un millón de personas.* Obtenido de Aquae Fundación Explore: [https://www.fundacionaquae.org/aquaexplore/tresgargantas\\_html/index.html](https://www.fundacionaquae.org/aquaexplore/tresgargantas_html/index.html)
- Bertrand Tchanche, F., Lambrinos, G., Frangoudaskis, A., & Papadakis, G. (Octubre de 2011). Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications [Conversión de calor de baja potencia en energía mediante ciclos orgánicos de Rankine: una revisión de diversas aplicaciones]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews [Reseñas de energía renovable y sostenible]*, 15(8), 3963-3979. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.024>
- Blain, L. (11 de Febrero de 2024). *28-ton, 1.2-megawatt tidal kite is now exporting power to the grid [Un cometa mareomotriz de 28 toneladas y 1,2 megavatios ahora exporta energía a la red eléctrica].* Obtenido de New Atlas: <https://newatlas.com/energy/minesto-tidal-kite/>
- Bleiwas, D. I. (2010). *Byproduct Mineral Commodities Used for the Production of Photovoltaic Cells [Subproductos minerales utilizados para la producción de células fotovoltaicas].* U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey Circular 1365, Virginia. Obtenido de <https://pubs.usgs.gov/circ/1365/Circ1365.pdf>
- Bnamericas. (s.f.). *AES Colombia.* Obtenido de <https://www.aescol.com/es/our-history>
- Boer, D., Langerak, J., & Pescarmona, P. P. (21 de Febrero de 2023). Zeolites as Selective Adsorbents for CO<sub>2</sub> Separation [Zeolitas como adsorbentes selectivos para la separación de CO<sub>2</sub>]. *ACS Applied Energy Materials*, 6(5), 2634-2656. doi:<https://doi.org/10.1021/acsaem.2c03605>
- Brenson CR300. (05 de Julio de 2022). *Motocarro (Tricimoto Eléctrico) Brenson CR300 Version Cabinada.* Obtenido de Brenson: <https://www.brenson.co/fichas%20tecnicas/Ficha%20tecnica%20CR300%20Cabinada.pdf>
- Brey, J. (2022). *La Electólisis como una herramienta clave de la descarbonización del Siglo XXI.* Obtenido de <https://www.mintur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/424/JAVIER%20BREY.pdf>
- Buelvas, L. G. (14 de Febrero de 2024). *Por qué los búfalos son los reyes del trópico.* Obtenido de Contexto Ganadero: <https://www.contextoganadero.com/otrossistemP/por-que-los-bufalos-son-los-reyes-del-tropico>

- Bufasan. (2024). *La Historia de la Cría de Búfalos en Colombia*. Obtenido de Bufasan: <https://bufasan.com/la-historia-de-la-cria-de-bufalos-en-colombia/>
- Bulmaro, N. (04 de Julio de 2020). *La destilación flash*. Obtenido de IngenieriaQuimicaReviews: <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/07/destilacion-flash.html>
- Bustamante, C. V. (2019). La producción caprina en Colombia. *Tierras Caprino*, 5. Obtenido de [https://www.iga-goatworld.com/uploads/6/1/6/2/6162024/caprino\\_28\\_-caprino\\_en\\_colombia\\_-\\_2019\\_tierras\\_caprinas\\_-\\_clara\\_v\\_rua\\_b.pdf](https://www.iga-goatworld.com/uploads/6/1/6/2/6162024/caprino_28_-caprino_en_colombia_-_2019_tierras_caprinas_-_clara_v_rua_b.pdf)
- BYD. (2024). *BYD Seagull*. (BYD, Productor) Obtenido de BYD Auto: <https://bydauto.com.co/modelo/byd-seagull-ev/byd-seagull>
- Cabeza Escobar, D. (15 de Marzo de 2023). *Uniguajira y Uniantioquia: pioneras en el país en la producción hidrógeno verde*. Obtenido de Universidad de La Guajira: <https://uniguajira.edu.co/uniguajira-y-uniantioquia-pioneras-en-el-pais-en-la-produccion-hidrogeno-verde/>
- Cadena Rodríguez, P. A. (2013). *Análisis de tecnologías de captura de CO2 con potencial para su implementación en la refinería de Ecopetrol Barrancabermeja*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- CAIA ingeniería. (2022). *Consultoría: identificación de los bienes y servicios que son requeridos para la captura, secuestro y utilización de carbono de acuerdo con lo establecido en la ley 2099 de 2021. Informe no 2: usos*. Bogotá. Recuperado el 2024, de [https://www1.upme.gov.co/ServicioCiudadano/Documents/Proyectos\\_normativos/Informe\\_final\\_Captura\\_CO2.pdf](https://www1.upme.gov.co/ServicioCiudadano/Documents/Proyectos_normativos/Informe_final_Captura_CO2.pdf)
- Campetrol. (Octubre de 2024). *Informe Campetrol Taladros & Producción*. Obtenido de <https://campetrol.org/documentos/Informe%20de%20Taladros%20y%20Produccion%CC%81n%20-%20Octubre%202024.pdf>
- Canal Institucional. (17 de Mayo de 2022). *¿Sabes Cómo Llegó La Electricidad En Colombia? Te Contamos La Historia*. Obtenido de Canal Institucional TV: <https://www.canalinstitucional.tv/historia-electricidad-en-colombia>
- Canal Institucional. (3 de Marzo de 2022). *Apagón del 92: el fenómeno que tuvo a Colombia sin luz en la noche*. Obtenido de Redacción Canal Institucional: <https://www.canalinstitucional.tv/apagon-92-por-que-quitaron-luz-hora-gaviria>

- Caneppele, E. (24 de Septiembre de 2021). *Transmitancia térmica de la ventana la guía completa*. Obtenido de Windowo: <https://www.windowo.es/blog/transmitancia-termica-de-la-ventana>
- Carbotecnía. (6 de Febrero de 2024). *¿Qué es el carbón activado y para qué sirve?* Obtenido de Carbon Activado Centro de Aprendizaje (Teoría: <https://www.carbotecnía.info/aprendizaje/carbon-activado/que-es-carbon-activado/>)
- Castañeda, A. (2024). *Parque térmico, aliado fundamental del sector eléctrico colombiano*. Obtenido de BMCE Bec.: <https://www.bmcbec.com.co/publicaciones/posts/noticias/noticias/plantas-termicas-listas-para-respaldar-el-sistema-electrico>
- Castiblanco Urrego, O., & Milquez-Sanabria, H. A. (16 de Julio de 2021). Estudio y simulación de un gasificador con captura de CO<sub>2</sub> para la producción de hidrógeno azul partiendo de carbón colombiano. *Revista UIS Ingenierías*, 20(4), 91-100. Obtenido de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/11993/11561>
- Celer. (2024). *La evolución de la bombilla; de la incandescente a la LED*. Obtenido de <https://www.celerlight.com/evolucion-bombillas-incandescentes-led/>
- Celsia. (2024). *Nuestras centrales hidroeléctricas*. Obtenido de Celsia: <https://www.celsia.com/es/centrales-hidroelectricas/>
- CEMEX. (2024). *Clínker para fabricar Cemento y Hormigón*. Obtenido de Cemex España: <https://www.cemex.es/cemento/clinker>
- CeniCaña. (2021). *Aprovechamiento de la biomasa en el sector de la caña de azúcar*. Ministerio de Medio Ambiente, Químicos. Obtenido de [https://quimicos.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/06/6-Nicolas-Gil-CENICANA-Presentacion\\_min\\_ambiente.pdf](https://quimicos.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/06/6-Nicolas-Gil-CENICANA-Presentacion_min_ambiente.pdf)
- Cerro Dominador. (13 de Julio de 2022). *¿Cómo funciona Cerro Dominador, la primera planta termosolar de América Latina? [Video]*. Obtenido de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=h5ZwRbDVoXU>
- Chevrolet. (2024). *Chevrolet Onix Turbo*. Obtenido de Carros Chevrolet: <https://www.chevrolet.com.co/carros/onix-hatchback>
- CIC energi GUNE. (21 de Julio de 2019). *El proyecto europeo REslag, liderado por CIC energiGUNE, culmina la fase de investigación y abre vías para la valorización de la escoria de acería*. Obtenido de CIC energi GUNE:

<https://cicenergigune.com/es/noticias/reslag-proyecto-europeo-cic-energigune-escoria-aceria>

Colorado, J. C. (27 de Septiembre de 2024). *Zelestra inauguró parque solar La Unión con inversión que alcanzó US\$200 millones*. Obtenido de La República: <https://www.larepublica.co/empresas/zelestra-inauguro-el-parque-solar-la-union-que-tuvo-inversiones-de-us-200-millones-3963223>

Coluccio Leskow, E. (24 de Octubre de 2024). *Leyes de la termodinámica*. Obtenido de Enciclopedia Concepto: <https://concepto.de/leyes-de-la-termodinamica/>

Connor, N. (21 de Noviembre de 2020). *Indium - Periodic Table [Indio – Tabla periódica]*. Obtenido de Periodic Table: <https://www.periodic-table.org/indium-periodic-table/>

CONPES 2571. (18 de Diciembre de 1991). *Programa para la masificación del gas*. Recuperado el 2024, de Consejo Nacional de Política Económica y Social: [https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/conpes\\_dnp\\_2571\\_1991.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/conpes_dnp_2571_1991.htm)

CONPES 2646. (18 de Marzo de 1993). *Estrategia para el desarrollo del programa de gas*. Oficial, Ministerio de Minas - Ecopetrol - Departamento Nacional de Planeación, Consejo Nacional de Política Económica y Social, Bogotá. Obtenido de Min Minas- Ecopetrol: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/2646.pdf>

CONPES 3190. (2022). *Balance y estrategias a seguir para impulsar el plan de masificación de gas*. Departamento Nacional de Planeación, Ministerio de Minas y Energía, Bogotá. Obtenido de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3190.pdf>

CONPES 3244. (15 de Septiembre de 2003). *Estrategias para la Dinamización y Consolidación del sector de gas natural en Colombia*. Oficial, Consejo Nacional de Planeación, Departamento Nacional de Planeación, Bogotá D.C. Obtenido de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3244.pdf>

CONPES 4075. (2022). *Política de Transición Energética*. Oficial, Consejo Nacional de Política Económica y Social, Departamento Nacional de Planeación., Bogotá. Obtenido de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4075.pdf>

CONPES 4129. (2023). *Política Nacional de Reindustrialización*. Oficial, Departamento Nacional de Planeación, Consejo Nacional de Política Económica y Social, Bogotá. Obtenido de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4129.pdf>

Construtec. (2024). *Los países con mayor potencia hidráulica*. Obtenido de Construtec: <https://construtec.com/los-paises-con-mayor-potencia-hidraulica/>

- Consultoría 041. (2020). *Realizar un estudio que permita identificar las clases de vehículos y modalidades de transporte susceptibles de realizar el ascenso tecnológico hacia tecnologías de cero y bajas emisiones a nivel nacional*. Unidad de Planeación Minero-Energética, Steer. Recuperado el 2024, de [https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Informe\\_final\\_Ascenso\\_tecnologico.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Informe_final_Ascenso_tecnologico.pdf)
- Contaduría General de la Nación. (2024). *Categorización subsidiaria de Departamentos, distritos y municipios*. Obtenido de <https://www.contaduria.gov.co/documents/20127/36288/HISTORICOS.xlsx/f51281b5-e6e7-a569-b429-798b00aa613c>
- Contaduría General de la Republica. (2023). *Categorización de Departamentos, distritos y municipios*. Obtenido de <https://www.contaduria.gov.co/categorizacion-de-departamentos-distritos-y-municipios>
- Copete López, L. H., & Herrera Múnera, B. A. (Diciembre de 2011). *Tecnologías de Recuperación de Calor*. (S. I. GÓMEZ, Ed.) Medellín, Antioquia, Colombia. Obtenido de Instituto Tecnológico Metropolitano: <https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/1928/TECNOLOG%c3%8dAS%20DE%20RECUPERACI%c3%93N%20DE%20CALOR.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Corferias. (13 de Noviembre de 2023). *El Salón del Automóvil Edición Especial, la mejor respuesta y oportunidad para el sector*. Obtenido de Noticia: [https://corferias.com/es/noticia/6727/el\\_salon\\_del\\_automovil\\_edicion\\_especial\\_la\\_mejor\\_respuesta\\_y\\_oportunidad\\_para\\_el\\_sector#:~:text=Bogot%C3%A1%2C%2014%20noviembre%20de%202023](https://corferias.com/es/noticia/6727/el_salon_del_automovil_edicion_especial_la_mejor_respuesta_y_oportunidad_para_el_sector#:~:text=Bogot%C3%A1%2C%2014%20noviembre%20de%202023)
- Corficolombiana. (28 de Febrero de 2023). *Perspectiva Sectorial Energía*. Corporación Financiera Colombiana S.A. Corficolombiana, Equipo de Investigaciones Económicas Dirección de Sectores y Sostenibilidad, Bogotá. Obtenido de Investigaciones Económicas Corficolombiana: <https://investigaciones.corficolombiana.com/documents/38211/0/Informe%20Sectorial%20Sector%20Electrico%2024012023%20VF.pdf/6f0862d8-aacb-40fd-cc3e-0c95916bceba>
- Corredor Becerra, O. (2008). *Evaluación del Potencial Energético de la biomasa residual proveniente de cultivos Energéticos*. Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Facultad Fisico-Química Escuela de Ingeniería Química, Bucaramanga.

- Obtenido de <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/1c0dd491-c22c-4b16-93d1-fab620dc5eea/content>
- CREE. (2023). *Hoja de ruta del Gas Natural en Colombia*. Oficial, 2023. Recuperado el 2024, de <https://creenergia.org/wp-content/uploads/2023/05/Ruta-gas-natural.pdf>
- CREG. (23 de Octubre de 2023). *Historia en Colombia*. Obtenido de Comisión de Regulación de Energía y Gas: <https://creg.gov.co/publicaciones/7824/historia-en-colombia/>
- Cruz Moreno, J. N., Rodríguez Bello, S., Vanejas Rojas, C. A., & Rivera, M. (03 de Julio de 2023). *Estrategias para la industria automotriz en Colombia con ausencia de*. Obtenido de Universidad Santo Tomas de Aquino: <https://repository.usta.edu.co/server/api/core/bitstreams/e5dde970-8b86-4831-892d-6657c8fc7031/content>
- CuidemoselPlaneta.Org. (22 de Marzo de 2022). *Cadmio, ¿qué es y para qué se emplea?* Obtenido de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=BxckVvsP1E8>
- Curi, A., Granda J.V., W., Lima, H., & Sousa T., W. (2006). *Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros*. (I. Tecnológica, Editor) doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642006000600017>
- CVN. (10 de Abril de 2017). *Qué es el FOB*. Obtenido de <https://cvn.com.co/que-es-el-fob-valor-free-on-board/>
- DANE. (2005). *Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)*. Obtenido de Presentación Censo General 2005 NBI.: [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/censo/Bol\\_nbi\\_censo\\_2005.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/censo/Bol_nbi_censo_2005.pdf)
- Decreto 1077. (26 de Mayo de 2015). *Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio*. Obtenido de Alcaldía de Bogotá: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77216>
- Decreto 2051. (13 de Noviembre de 2019). *Por el cual se modifica parcialmente el Arancel de Aduanas para la importación de vehículos con motor de funcionamiento exclusivo con gas natural y el Decreto 1116 de 2017 para vehículos eléctricos*. Recuperado el 2024, de Sistema Único de Información Normativa: <https://www.suin-juriscal.gov.co/viewDocument.asp?id=30038341>
- Di Terlizzi Escallón, S., Gama Rodríguez, I., & Jaramillo Quintero, T. (2021). Transición energética en Colombia: No necesariamente una realidad que se sustenta en el cambio climático. *46*, 105-128. doi:<https://doi.org/10.18041/0121->

- Díaz, V. P. (19 de Abril de 2023). El carbón es un actor fundamental para el proceso de la transición energética. *La Republica*. Recuperado el 2024, de <https://www.larepublica.co/empresas/el-carbon-es-un-actor-fundamental-en-la-transicion-energetica-3595471>
- DNP. (3 de Mayo de 2023). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo*. Oficial, Departamento Nacional de Planeación, Bogotá. Obtenido de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-05-04-bases-plan-nacional-de-inversiones-2022-2026.pdf>
- Dow. (2024). *N-Methyldiethanolamine (MDEA) [N-metildietanolamina (MDEA)]*. Obtenido de <https://www.dow.com/es-es/pdp.n-methyldiethanolamine-mdea.85619z.html#overview>
- Dufour, J., & Rodríguez, R. (22 de Mayo de 2012). *Captura de CO2 mediante separación criogénica*. Obtenido de *Energía y Sostenibilidad*: <https://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2012/05/22/131542>
- Durán, S. (2023). *¿Cómo funciona la energía hidroeléctrica?* Obtenido de Eurekaando: <https://www.eurekaando.org/blog/como-funciona-la-energia-hidroelectrica/>
- DW. (08 de Agosto de 2021). Arranca la turbina mareomotriz "más potente del mundo". Obtenido de <https://www.dw.com/es/la-turbina-mareomotriz-m%C3%A1s-potente-del-mundo-comienza-a-exportar-energ%C3%ADa-verde-a-la-red-terrestre/a-58749444>
- DW. (08 de Junio de 2023). *Un océano de codicia*. (DW, Editor, & Youtube, Productor) Recuperado el 2024, de DW Documental: <https://www.youtube.com/watch?v=c56eg0hOLuw>
- Dzierjarski, B., Serafin, J., Anderson, K., & Krzyzyska, R. (Diciembre de 2023). O2 capture materials: a review of current trends and future challenges [Materiales de captura de O2: una revisión de las tendencias actuales y los desafíos futuros]. *Materials Today Sustainability*, 24(100483). doi:<https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100483>
- Eastman, S. A. (26 de Julio de 2023). *El mercado de los búfalos crecería más de 400% en 2027, con 1,6 millones de cabezas*. Obtenido de Agronegocios: [https://www.agronegocios.co/finca/el-mercado-de-los-bufalos-creceria-mas-de-400-en-2027-con-1-6-millones-de-cabezas-3665533#google\\_vignette](https://www.agronegocios.co/finca/el-mercado-de-los-bufalos-creceria-mas-de-400-en-2027-con-1-6-millones-de-cabezas-3665533#google_vignette)
- Echeverri, L. (18 de Mayo de 2023). *Colombia ya es el noveno país con más caballos del mundo con casi 1,6 millones*. Obtenido de Agronegocios: <https://www.agronegocios.co/agricultura/colombia-ya-es-el-noveno-pais-con-mas-caballos-del-mundo-3617892>

- Ecopetrol. (9 de Julio de 2024). *Exploración*. Obtenido de Que hacemos: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/NuestraEmpresa/QueHacemos/Exploracion/Exploracion>
- Enel. (2022 de Septiembre de 2022). *Central Hidroeléctrica El Guavio: conoce todo sobre esta planta de generación de energía*. Obtenido de Enel Historias: <https://www.enel.com.co/es/historias/a202209-conoce-todo-de-la-central-hidroelectrica-el-guavio.html>
- Enel. (27 de Septiembre de 2022). *Central Hidroeléctrica El Guavio: conoce todo sobre esta planta de generación de energía*. Obtenido de Enel: <https://www.enel.com.co/es/historias/a202209-conoce-todo-de-la-central-hidroelectrica-el-guavio.html>
- Enel. (23 de Agosto de 2023). *El Parque Solar Fundación inicia su etapa de pruebas*. Obtenido de Enel prensa: <https://www.enel.com.co/es/prensa/news/d202308-inicio-pruebas-parque-solar-fundacion.html>
- Enel. (26 de Marzo de 2024). *El Parque Solar El Paso, de Enel Colombia, declara su operación comercial*. Obtenido de Enel Prensa: <https://www.enel.com.co/es/prensa/news/d202403-parque-solar-el-paso-declara-operacion-comercial.html>
- Energías Renovables. (06 de Septiembre de 2011). *Corea del Sur inaugura la planta mareomotriz más grande del mundo*. (Equipo de redacción de Energías Renovables) Obtenido de Energías del Mar: [https://www.energias-renovables.com/energias\\_del\\_mar/corea-del-sur-inaugura-la-planta-mareomotriz](https://www.energias-renovables.com/energias_del_mar/corea-del-sur-inaugura-la-planta-mareomotriz)
- EPA. (25 de Junio de 2024). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*. Obtenido de Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.: <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- EPM. (17 de Noviembre de 2022). *La Central Guadalupe I, origen de la cadena Guatron, cumple 90 años de buena energía*. Obtenido de Institucional: <https://www.epm.com.co/institucional/sala-de-prensa/noticias-y-novedades/la-central-guadalupe-i-origen-de-la-cadena-guatron-cumple-90-anos-de-buena-energia/>
- EPM. (2024). *Centrales hidroeléctricas EPM*. Obtenido de Institucional EPM: <https://www.epm.com.co/institucional/sobre-epm/nuestras-plantas/plantas-de-energia/centrales-hidroelectricas-epm/>

- Erica. (2024). *Aislamiento Térmico, Conductividad, Calor específico, Transferencia de Calor*. Obtenido de <https://www.eric.es/aislamiento-termico>
- Estatuto Tributario Nacional [ETN]. (2024). *Art. 468-1. Bienes gravados con la tarifa del cinco por ciento (5%)*. Obtenido de Estatuto: <https://estatuto.co/468-1>
- Ethos Power. (29 de Junio de 2019). *Why lithium iron phosphate (LiFePO<sub>4</sub>) batteries are suitable for industrial and commercial applications [Por qué las baterías de fosfato de hierro y litio (LiFePO<sub>4</sub>) son adecuadas para aplicaciones industriales y comerciales]*. Obtenido de Ethos Power: <https://ethospower.org/blog/learn-about-lithium-batteries/>
- Ewert, C. (23 de Octubre de 2024). *Mol: ¿una nueva definición!* Obtenido de Consejo Profesional de Química Colombia: <https://www.cpqcol.gov.co/mol-una-nueva-definicion/>
- FAO. (2024). *Propiedades Químicas*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- FenalCarbon. (13 de Marzo de 2025). *Informe del Comportamiento del mercado de los carbones y el coque*. Obtenido de <https://drive.google.com/file/d/1Z2fMmSw4SAgfgBT7GJN429qKNVgBhorz/view>
- ForteQuim. (2024). *Dietanolamina*. Obtenido de Aminos: <https://fortequim.com/producto/dietanolamina/>
- Fraunhofer ISE. (2024). *Photovoltaics Report [Informe sobre energía fotovoltaica]*. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, PSE Projects GmbH, Freiburg. Obtenido de <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
- Fuerzas de Defensa Israelí FDI. (10 de Enero de 2022). *Guerra de Yom Kipur (octubre 1973)*. Obtenido de Guerras y Operaciones: <https://www.idf.il/es/minisites/guerras-y-operaciones/guerra-de-yom-kipur-octubre-1973/>
- Fundación Energia. (07 de Julio de 2008). *Tecnologías de captura y Almacenamiento de CO<sub>2</sub>*. Obtenido de Capítulo 6: <http://www.fundacionenergia.es/pdfs/Carb%C3%B3n%20Futuro/Cap%C3%ADtulo%206.1.pdf>
- Ge, M., Jhoanes, F., & Vigna, L. (2 de Septiembre de 2021). *Cuatro gráficos que explican las emisiones de gases de efecto invernadero por país y por sector*. Obtenido de World

- Resources Institute: <https://es.wri.org/insights/cuatro-graficos-que-explican-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-por>
- Giraldo, C. (10 de Mayo de 2024). *Colombia recicla 53% de las baterías usadas en motores de combustión*. Obtenido de ProQuest: <https://www.proquest.com/docview/3053687354?sourcetype=Wire%20Feeds>
- Global Bajaj. (2024). *Boxer CT100 KS*. Obtenido de <https://colombia.globalbajaj.com/es-CO/BRANDS/Boxer/Boxer-CT100-KS>
- Global Market Insights. (Abril de 2023). *Metal Marco Orgánico Tamaño del mercado*. Obtenido de Industry Analysis: <https://www.gminsights.com/es/industry-analysis/metal-organic-frameworks-market>
- GNU. (2024). *Beneficios del Gas Natural para Motores Vehiculares*. Obtenido de GNU: <https://www.gasnaturalgnu.com/beneficios-del-gas-natural-para-motores-vehiculares/>
- González , A., Molina , W., & Gómez , O. (1 de Agosto de 2016). *Energías Derivadas del Mar*. Obtenido de Energiasderivadasdelmar.wordpress.com: <https://energiasderivadasdelmar.wordpress.com/>
- Govindjee, G. &. (2004). *Chlorophyll A Fluorescence: A Signature of Photosynthesis [Fluorescencia de la clorofila A: una firma de la fotosíntesis]*. Springer. doi:10.1007/978-1-4020-3218-9.
- Grupo UMA. (2024). *Boxer CT100 KS*. Obtenido de Grupo UMA: <https://grupouma.com/colombia/motos/boxer/boxer-ct100-ks/#:~:text=Rinde%20hasta%20370%20km%20x%20gal%C3%B3n>
- H2LAC. (2024). *Colombia*. Obtenido de <https://h2lac.org/mapas/#1711539804571-10>
- H2news. (29 de Octubre de 2024). *La IEA presentó el Global Hydrogen Review 2024 destacando los avances y desafíos en la expansión del hidrógeno de bajas emisiones*. Obtenido de La Plataforma de Noticias de Hidrógeno Renovable de Chile para el Mundo: <https://h2news.cl/2024/10/29/la-iea-presento-el-global-hydrogen-review-2024-destacando-los-avances-y-desafios-en-la-expansion-del-hidrogeno-de-bajas-emisiones/#:~:text=Con%20la%20Revisi%C3%B3n%20Global%20del,su%20adopci%C3%B3n%20a%C3%BAn%20enfrenta%20desa>
- Haran, B. (07 de Julio de 2008). *Zirconium [Circonio] (version 1) - Periodic Table of Videos [Tabla periódica de vídeos] [Video]*. (Youtube, Editor, & School of Chemistry at The

- University of Nottingham) Obtenido de Periodic Videos:  
<https://www.youtube.com/watch?v=7p9H0FubPv8>
- Henao, D. A. (22 de Julio de 2024). El mercado de motos y ciclomotores eléctricos ha caído más de 8,88% durante 2024. *La República*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/empresas/mercado-de-motos-electricas-en-colombia-3912940>
- Hidroituango. (2024). *Características del proyecto*. Obtenido de <https://www.hidroituango.com.co/caracteristicas-del-proyecto/>
- HISOUR. (2018). *Células solares de cobre y seleniuro de indio y cobre*. Recuperado el 30 de Mayo de 2025, de Web Archive: Arte Cultura Historia: <https://web.archive.org/web/20220319232623/https://www.hisour.com/es/copper-indium-gallium-selenide-solar-cells-39668/>
- Houston CCS Alliance. (Septiembre de 2022). *¿Qué es la captura y almacenamiento de carbono (CAC)?* Obtenido de Houston CCS Alliance: [https://houstonccs.com/wp-content/uploads/2022/09/HCCS\\_What-Is-CCS\\_Fact-Sheet\\_SP.pdf](https://houstonccs.com/wp-content/uploads/2022/09/HCCS_What-Is-CCS_Fact-Sheet_SP.pdf)
- ICA. (2024). *Censos Pecuarios Nacional*. Obtenido de Pecuario: <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>
- IDAE. (2007). *Biomasa Cultivos Energéticos*. Madrid, Madrid, España: BESEL, S.A. (Departamento de Energía). Recuperado el Noviembre de 2024, de [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_cultivos\\_energeticos\\_07\\_4bd9c8e7.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_cultivos_energeticos_07_4bd9c8e7.pdf)
- IDEAM. (2018). *Atlas de Viento de Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología Estudios Ambientales IDEAM, Unidad de Planeación Minero Energética UPM, Bogotá. Obtenido de <https://www.andi.com.co/uploads/viento.compressed.pdf>
- IDEAM-2. (2022). *Informe del Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero 1990-2018 y Carbono Negro 2010-2018 de Colombia*. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, Bogotá. Obtenido de <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Annex%20BUR3%20COLOMBIA.pdf>
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer [Fundamentos de la transferencia de calor y masa]* (6 ed.). Estados Unidos: John Wiley & Sons. Obtenido de <https://hyominsite.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/03/fundamentals-of-heat-and-mass-transfer-6th-edition.pdf>

- IPP Journal. (17 de Mayo de 2024). *Construction completed for 300 MW compressed air energy storage in China [Se completa la construcción de un sistema de almacenamiento de energía de aire comprimido de 300 MW en China]*. Obtenido de Projects: <https://ippjournal.com/update/construction-completed-for-300-mw-compressed-air-energy-storage-in-china>
- IRENA. (2017). *Electricity Storage and Renewables: Cost And Markets to 2030 [Almacenamiento de electricidad y energías renovables: costos y mercados hasta 2030]*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Obtenido de [https://www.connaissancedesenergies.org/sites/connaissancedesenergies.org/files/pdf-actualites/IRENA\\_Electricity\\_Storage\\_Costs\\_2017\\_Summary.pdf](https://www.connaissancedesenergies.org/sites/connaissancedesenergies.org/files/pdf-actualites/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017_Summary.pdf)
- ITAIPIU. (Diciembre de 2015). *Demostrativo anual de visitantes*. Obtenido de Estadísticas: <https://www.itaipu.gov.py/es/turismo/estadisticas>
- Jiménes, J. f., Castellanos, F., & Mendoza, O. H. (2020). *Plomo- (Pb)*. En: *Atlas Geoquímico de Colombia*. Servicio Geológico de Colombia, Bogotá. Recuperado el 2024, de [https://srvags.sgc.gov.co/Archivos\\_Geoportal/Amenaza\\_Sismica/Atlas\\_Geoquimico\\_2020/pdf/27.Pb.pdf](https://srvags.sgc.gov.co/Archivos_Geoportal/Amenaza_Sismica/Atlas_Geoquimico_2020/pdf/27.Pb.pdf)
- Jiménez, J. F., Duarte, J., Pérez, A., & Castellanos, F. (2020). *Vanadio (V)*. En: *Atlas Geoquímico de Colombia*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. Obtenido de [https://srvags.sgc.gov.co/Archivos\\_Geoportal/Amenaza\\_Sismica/Atlas\\_Geoquimico\\_2020/pdf/40.V.pdf](https://srvags.sgc.gov.co/Archivos_Geoportal/Amenaza_Sismica/Atlas_Geoquimico_2020/pdf/40.V.pdf)
- Jímenez, J., Duarte, J., Pérez, A., Castellanos, F., & Rincón, A. (2020). *Litio-Li* En: *Atlas Geoquímico de Colombia*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. Obtenido de [https://srvags.sgc.gov.co/Archivos\\_Geoportal/Amenaza\\_Sismica/Atlas\\_Geoquimico\\_2020/pdf/19.Li.pdf](https://srvags.sgc.gov.co/Archivos_Geoportal/Amenaza_Sismica/Atlas_Geoquimico_2020/pdf/19.Li.pdf)
- Jiménez, N. G. (14 de Febrero de 2024). *La demanda mundial de carbón llego a sus maximos niveles en 2023*. Recuperado el 2024, de FenalCarbon: <https://fenalcarbon.org.co/2024/02/14/la-demanda-mundial-de-carbon-llego-a-sus-maximos-niveles-en-2023/>
- Kamolov, A., Turakulov, Z., Rejabov, S., Diaz-Sainz, G., Gómez-Coma, L., Norkobilov, A., . . . Irabien, A. (19 de Enero de 2023). Decarbonization of Power and Industrial Sectors: The Role of Membrane Processes [Descarbonización de los sectores energético e industrial: el papel de los procesos de membrana]. *Membranes*, 13(2). doi:<https://doi.org/10.3390/membranes13020130>

- Kapadnis, R. S., Bansode, S. B., Supekar, A. T., Kale, S. S., & Pathan, H. (30 de Septiembre de 2020). Cadmium Telluride/Cadmium Sulfide Thin Films Solar Cells: A Review [Células solares de película delgada de telururo de cadmio/sulfuro de cadmio: una revisión]. *ES Energy & Environment*, 10, 3-12. doi:10.30919/eseec8c706
- Kelley, K. D., Clinton, S. T., Polyak, D., & Kimball, B. E. (2017). *Vanadium [Vanadio]*. US Department of the interior, US Geological Survey, Virginia. Recuperado el 2024, de <https://pubs.usgs.gov/pp/1802/u/pp1802u.pdf>
- KIA. (2024). *KIA Picanto* . Obtenido de Picanto: <https://www.kia.com.co/nuestros-vehiculos/picanto/especificaciones/vibrant-mt>
- Kodama, E., & Kurashima, Y. (Junio de 1999). Development of a compact sodium sulphur battery [Desarrollo de una batería compacta de sodio y azufre]. *Power Engineering Journal*, 13(3), 136-141. doi:10.1049/pe:19990306
- Korvus Technology. (10 de Noviembre de 2022). *Sputtering: What is it and how does sputter deposition work? [Deposición catódica: ¿qué es y cómo funciona?]*. Obtenido de KorvusTech: <https://korvustech.com/sputtering/>
- Kothandaraman, A. (Junio de 2010). *Carbon Dioxide Capture by Chemical Absorption: A Solvent Comparison Study [Captura de dióxido de carbono por absorción química: un estudio comparativo de disolventes] (Tesis de Doctorado)*. Massachusetts Institute of Technology. Obtenido de Massachusetts Institute of Technology: [https://sequestration.mit.edu/pdf/Anusha\\_Kothandaraman\\_thesis\\_June2010.pdf](https://sequestration.mit.edu/pdf/Anusha_Kothandaraman_thesis_June2010.pdf)
- La nota Económica. (18 de Abril de 2024). “*Colombia, un potencial exportador de Hidrogeno Verde para Alemania*”, según estudio. Obtenido de La Nota Económica: <https://lanotaeconomica.com.co/movidas-empresarial/colombia-un-potencial-exportador-de-hidrogeno-verde-para-alemania-segun-estudio/>
- Laboratoriumdiscounter. (2024). *Dietanolamina*. Obtenido de Quimicos: <https://www.laboratoriumdiscounter.nl/es/quimicos/a-z/d/dietanolamina/>
- Ley 10. (16 de Marzo de 1961). *Por el cual se dictan disposiciones en el ramo de petróleos*. Recuperado el 2024, de Juriscol: <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30019367>
- Ley 142. (11 de Julio de 1994). *Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones*. Obtenido de Departamento de la Función Pública: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752>

- Ley 1715. (13 de Mayo de 2014). *Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional*. Obtenido de Departamento de la Función Pública: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>
- Ley 1819. (29 de Diciembre de 2016). *Por medio de la cual se adopta una reforma tributaria estructural, se fortalecen los mecanismos para la lucha contra la evasión y la elusión fiscal, y se dictan otras disposiciones*. Obtenido de Secretaria del Senado de la República de Colombia: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=79140>
- Ley 1964. (11 de Julio de 2019). *Por medio de la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia y se dictan otras disposiciones*. Obtenido de Sistema Único de Información Normativa: <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30036636>
- Ley 2099. (10 de Julio de 2021). *Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones*. Obtenido de Departamento Administrativo de la Función Pública: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>
- Ley 2128. (4 de Agosto de 2021). *Por medio de la cual se promueve el abastecimiento, continuidad, confiabilidad y cobertura del gas combustible en el país*. Obtenido de Secretaria del Senado de la República: [http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_2128\\_2021.html](http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_2128_2021.html)
- Ley 2128. (4 de Agosto de 2021). *Por medio de la cual se promueve el abastecimiento, continuidad, confiabilidad y cobertura del gas combustible en el país*. Obtenido de Secretaria del Senado de la República: [http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_2128\\_2021.html](http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_2128_2021.html)
- Ley 99. (22 de Diciembre de 1993). *Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA*. Obtenido de Departamento de la Función Pública: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>
- Linden, D., & Reddy, T. B. (2001). *Handbook of Batteries [Manual de baterías]* (3 ed.). New York, United States of America: McGraw-Hill. Obtenido de Scientific Research: <https://dl.icdst.org/pdfs/files/b334382400c223631bea924f87b0a1ba.pdf>

- López Sánchez, G. (26 de Junio de 2018). *Los MOF, materiales con múltiples potencialidades, incluyendo la de extraer agua de la humedad del aire de zonas desérticas*. Obtenido de Actualidad, Actualidad Técnica, Tecnología: <https://www.madrimasd.org/podemos-conseguir-miles-miles-litros-agua-aire-desierto?origen=notiweb>
- López Suárez, A. (08 de Julio de 2022). Listas 12 plantas termoeléctricas en caso de que no entre Hidroituango. *El Colombiano*. Obtenido de <https://www.elcolombiano.com/negocios/listas-12-plantas-termoelectricas-en-caso-que-no-entre-hidroituango-DG17990740>
- Lozano, J. D. (2019). *Análisis del beneficio económico por arbitraje en Colombia*. Académico, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Bogotá. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/b6bfca16-678f-454b-ad16-4dfd70c2b1d2/content>
- Madiautos. (2024). *Mazda CX30*. Obtenido de Mazda: <https://mazda.madiautos.com.co/vehiculos/mazda-cx30/mazda-cx-30-versiones/>
- Mantilla, O. J. (20 de Agosto de 2021). *370 kms por galón: el consumo que alcanzó la Bajaj Boxer en reciente estudio*. Obtenido de Dos Ruedas: <https://www.elcarrocolombiano.com/dos-ruedas/370-kms-por-galon-el-consumo-que-alcanzo-la-bajaj-boxer-en-reciente-estudio/>
- Márquez, L. A. (2024). *Real Academia Española*. Obtenido de <https://dbe.rah.es/biografias/35553/marcelo-de-villalobos>
- Medina, S. G. (10 de 04 de 2024). *Racionamiento de agua en Bogotá: jueves 11 de abril inicia primer turno*. Obtenido de Bogotá: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/habitat/racionamiento-de-agua-en-bogota-jueves-11-de-abril-inician-medidas>
- Mendoza, O. G., & Rincón, A. Y. (2020). *Zirconio-(Zr)*. En: *Atlas Geoquímico de Colombia*. Obtenido de Servicio Geológico Colombiano: [https://srvags.sgc.gov.co/Archivos\\_Geoportal/Amenaza\\_Sismica/Atlas\\_Geoquimico\\_2020/pdf/43.Zr.pdf](https://srvags.sgc.gov.co/Archivos_Geoportal/Amenaza_Sismica/Atlas_Geoquimico_2020/pdf/43.Zr.pdf)
- Mendoza, O. H., Portilla, K. A., Castellanos, F., & Orejuela, C. J. (2020). *Cadmio (cd)* En: *Atlas Geoquímico de Colombia*. Servicio Geológico Colombiano., Bogotá. Obtenido de [https://srvags.sgc.gov.co/Archivos\\_Geoportal/Amenaza\\_Sismica/Atlas\\_Geoquimico\\_2020/pdf/9.Cd.pdf](https://srvags.sgc.gov.co/Archivos_Geoportal/Amenaza_Sismica/Atlas_Geoquimico_2020/pdf/9.Cd.pdf)

- Metatek. (2024). *Full Tensor Gravity Gradiometry [Gradiometría de gravedad tensorial completa]*. Obtenido de Full Tensor Gravity Gradiometry from Metatek: <https://metatek-group.com/technology/full-tensor-gravity-gradiometry/>
- Min. Energía Boletín. (6 de Julio de 2022). *Proyectos de hidrógeno verde y azul y de gestión eficiente de la energía podrán aplicar a incentivos tributarios*. Obtenido de Ministerio de Minas y Energías: <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/proyectos-de-hidr%C3%B3geno-verde-y-azul-y-de-gesti%C3%B3n-eficiente-de-la-energ%C3%ADa-podr%C3%A1n-aplicar-a-incentivos-tributarios/>
- Min. Energía ByB. (2024). *Biogás y Biometano*. Obtenido de Sobre el Biogás y Biometano y su aporte hacia la Transición energética: <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/hidrocarburos/funcionamiento-del-sector/biog%C3%A1s-y-biometano/>
- Min. Energía FMJ. (2024). *Formato de Memoria Justificada*. Oficial., Ministerio de Energía, Bogotá. Obtenido de [https://www.minenergia.gov.co/documents/11755/Memoria\\_justificativa\\_decreto\\_importaci%C3%B3n\\_de\\_gas\\_para\\_comentarios.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/11755/Memoria_justificativa_decreto_importaci%C3%B3n_de_gas_para_comentarios.pdf)
- Min. Energía GN. (2024). *Gas Natural*. Obtenido de Ministerio de Minas y Energía: <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/hidrocarburos/funcionamiento-del-sector/gas-natural/>
- Min. Energía HRH. (2021). *Hoja de Ruta del Hidrógeno*. Ministerio de Minas y Energía. Obtenido de [https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja\\_Ruta\\_Hidrogeno\\_Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja_Ruta_Hidrogeno_Colombia_2810.pdf)
- Min. Energía HRTEJ. (2023). *Hoja de Ruta para la Transición Energética Justa*. Oficial, Ministerio de Minas y Energía, Bogotá. Obtenido de [https://minenergia.gov.co/documents/13272/Hoja\\_de\\_ruta\\_transicion\\_energetica\\_justa\\_TEJ\\_2025.pdf](https://minenergia.gov.co/documents/13272/Hoja_de_ruta_transicion_energetica_justa_TEJ_2025.pdf)
- Min. Energía Prensa. (27 de Marzo de 2023). *Primer bus impulsado con hidrógeno que rodará en Bogotá es presentado por MinEnergía*. Obtenido de Ministerio de Energía: <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/primer-bus-impulsado-con-hidr%C3%B3geno-que-rodar%C3%A1-en-bogot%C3%A1-es-presentado-por-minenerg%C3%ADa/#:~:text=El%20hidr%C3%B3geno%20es%20el%20energ%C3%A9tico%20que%20permite%20descarboniza>

- Min. Minas y Energía. (2023). *Potencial energético Subnacional y Oportunidades de descarbonización en usos de energía final*.
- Min. Transporte. (2022). *Estrategia Nacional de Transporte Sostenible*. Ministerio de Transporte. Obtenido de <https://mintransporte.gov.co/publicaciones/10754/transporte-sostenible/>
- Min. Vivienda. (2012). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Título F*. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico, Bogotá D.C. Obtenido de <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/2020-08/titulo-f-del-ras-2000.pdf>
- MMTA. (2024). *In-Indium [Indio]*. Obtenido de Minor Metals Trade Association UK: <https://mmta.co.uk/metals/in/>
- Mohamed , K., Gros-Bonnivard, R., Jaud , P., Valle-Marcos , J., Amann, J.-M., & Bouallou , C. (Enero de 2010). Pre-combustion, post-combustion and oxy-combustion in thermal power plant for CO2 capture [Precombustión, postcombustión y oxicomcombustión en centrales térmicas para captura de CO2]. *Applied Thermal Engineering*, 30(1), 53-62. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.05.005>
- Montecelos, J. T. (2019). *Vehículos eléctricos*. Madrid España: Ediciones Paraninfo SA. Obtenido de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=FMqwDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Veh%C3%ADculos+el%C3%A9ctricos+montecelos&ots=sJ4LFFw88S&sig=KTxOIypYtZGO3GrvADgKgaH8zLg#v=onepage&q=Veh%C3%ADculos%20el%C3%A9ctricos%20montecelos&f=false>
- Motor Mundial. (06 de Junio de 2024). *¿Existen las motos diésel?* Recuperado el Octubre de 2024, de Motor: <https://www.motor.mapfre.es/motos/noticias-motos/motos-diesel-existen/>
- NAMA. (2020). *Bombas de calor una guía para el usuario*. Ministerio de la Energía de Chile, Proyecto de Apoyo a la NAMA “Energías Renovables para Autoconsumo” GIZ. Santiago de Chile: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Recuperado el 2024, de 2020: <https://4echile.cl/wp-content/uploads/2020/10/Gu%C3%ADa-Bombas-de-Calor.pdf>
- NASA. (13 de Febrero de 2019). *Opportunity: NASA Rover Completes Mars Mission [Oportunidad: El rover de la NASA completa su misión a Marte][Video]*. Obtenido de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=1LI-VHYxWXU>

- Naturgas. (23 de Septiembre de 2024). *Con planta piloto en Cartagena, Promigas produce 1,5 toneladas de hidrógeno verde*. Obtenido de Naturgas: <https://naturgas.com.co/con-planta-piloto-en-cartagena-promigas-produce-15-toneladas-de-hidrogeno-verde/>
- Naturgas. (27 de Diciembre de 2024). *Estos son los éxitos y fracasos de Ecopetrol buscando petróleo y gas natural en el 2024*. Obtenido de Asociación Colombiana de Gas Natural.: <https://naturgas.com.co/estos-son-los-exitos-y-fracasos-de-ecopetrol-buscando-petroleo-y-gas-natural-en-el-2024/>
- Navarro Martinez, S. (2021). *Potencial exploratorio de las ocurrencias de Vanadio en black shales del miembro superior de la formación paja, Norte de Santander, Colombia*. Tesis de Pregrado. Obtenido de <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/3366>
- NIU N-GT. (2024). *N-GT*. Obtenido de Scooters: <https://www.niucolombia.com/n-gt>
- NovoMOF. (2024). *Carbon capture [Captura de carbono]*. Obtenido de Technology: <https://novomof.com/technology/carbon-capture/>
- NovoMof. (2024). *Water harvesting [Recolección de agua]*. Obtenido de Technology NovoMOF: <https://novomof.com/technology/water-harvesting/>
- NovoMof2. (2024). *Biogas upgrading [Mejora del biogás]*. Obtenido de Technology: <https://novomof.com/technology/biogas-upgrading/>
- NovoMof3. (2024). *Gas purification [Purificación de gases]*. Obtenido de Technology NovoMOF: <https://novomof.com/technology/gas-purification/>
- Nuevo, D. (13 de Marzo de 2024). *El reformado con vapor*. Obtenido de Hidrogeno: <https://eshidrogeno.com/reformado/>
- ODS. Nueva York. (Septiembre de 2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de Departamento de Sostenibilidad, Organización de Naciones Unidas ONU: <https://www.un.org/es/impacto-acad%C3%A9mico/page/objetivos-de-desarrollo-sostenible>
- OEC CA. (2022). *Carbón activado; materias minerales naturales activadas; negro de origen animal, incluido el agotado*. Obtenido de 3802 (Sistema Armonizado 1992 para 4 dígitos): <https://oec.world/es/profile/hs/activated-carbon>
- OEC Cadmio. (2024). *Cadmio y sus manufacturas, incluidos los desperdicios y desechos*. Obtenido de Observatorio Económico de Complejidad: <https://oec.world/es/profile/hs/cadmium>

- OEC Ge y Zr. (2024). *Óxidos de germanio y dióxido de circonio*. Obtenido de Observatorio Económico de Complejidad: <https://oec.world/es/profile/hs/germanium-oxides-and-zirconium-dioxide>
- OEC Li. (2022). *Acumuladores eléctricos: iones de litio, incluidos los separadores, ya sea rectangular (incluido el cuadrado)*. Obtenido de Observatorio de Complejidad Económica: <https://oec.world/es/profile/hs/lithium-ion-batteries>
- OEC Pb. (2022). *Acumuladores eléctricos de plomo-ácido (vehículo)*. Obtenido de <https://oec.world/en/profile/hs/lead-acid-electric-accumulators-vehicle>
- OEC Si. (2024). *Dioxido de Silicio en Colombia*. Obtenido de Observatorio Economico de Complejidad: <https://oec.world/es/profile/bilateral-product/silicon-dioxide/reporter/col>
- OECD. (2023). *Perspectivas económicas de America Latina 2022*. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. Santo Domingo - República Dominicana: ONU-CEPAL- Banco de Desarrollo de America Latina- UE. Obtenido de [https://www.oecd.org/es/publications/2022/11/latin-american-economic-outlook-2022\\_fd17f22b.html](https://www.oecd.org/es/publications/2022/11/latin-american-economic-outlook-2022_fd17f22b.html)
- ONU. (12 de Enero de 2023). *Programa para el Medio ambiente*. Recuperado el 28 de Mayo de 2024, de ¿Es el gas natural el combustible de transición que el mundo necesita?: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/es-el-gas-natural-el-combustible-de-transicion-que-el-mundo>
- OPAEP. (2024). *Historia - La definición de la organización*. Obtenido de Organización de Países Árabes Exportadores de Petróleo (OPAEP): <https://www.oapecorg.org/Home/About-Us/History>
- OPAEP Miembros. (2024). *Países miembros*. Obtenido de OPAEP: <https://www.oapecorg.org/Home/About-Us/Member-Countries>
- Ortega, I., & Gutiérrez, M. (29 de Septiembre de 2020). *Almacenamiento térmico: el camino hacia la optimización de la gestión energética*. Recuperado el 2024, de CIC energi GUNE: <https://cicenergigune.com/es/blog/almacenamiento-termico-optimizar-gestion-energetica#>
- Ortiz Flórez, A. F. (2010). *Caracterización del Cuesco de la Palma Africana y estimación de la constante cinética en procesos de gasificación*. Académico, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería Mecánica, Bogotá. Recuperado el 2024, de

- <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/5ce44e97-f7d9-4154-b357-1f31d55921f1/content>
- Ortiz, L. D. (15 de Diciembre de 1999). *Llegada del vacuno español a Suramérica*. Obtenido de Real Academia de Ciencias Veterinarias de España RACVE: <https://www.racve.es/publicaciones/llegada-del-vacuno-espanol-a-suramerica/>
- Pearson, C. (29 de Noviembre de 2021). *Pressure Swing Adsorption (PSA) Technology – How It Works [Tecnología de adsorción por cambio de presión (PSA): cómo funciona]*. Obtenido de Apex Gasgen: <https://www.apexgasgenerators.com/post/pressure-swing-adsorption-psa-technology-how-it-works>
- Peñaherrera, P. R. (18 de octubre de 2022). La transición energética y el rol del petróleo como materia prima en lugar de fuente de energía. *PetroEnergia*. Recuperado el 2024, de PetroEnergia: <https://www.petroenergia.info/post/la-transici%C3%B3n-energ%C3%A9tica-y-el-rol-del-petr%C3%B3leo-como-materia-prim-a-en-lugar-de-fuente-de-energ%C3%ADa>
- Pérez Ruiz, J. A. (21 de Junio de 2019). *Procesos industriales en los Centros de Procesamiento de Gas*. Obtenido de LinkedIn: <https://www.linkedin.com/pulse/procesos-industriales-en-los-centros-de-procesamiento-p%C3%A9rez-ruiz/>
- Pérez-Sepa, M. A., Angueta-Ponce, A. V., Guasumba-Maila, J. E., & Diego-Andres, C. T. (2022). *Estimación de la vida útil de las baterías de los vehículos híbridos causas y consecuencias*. Instituto Superior Tecnológico Tecnológico ecuatoriano, Tecnología Superior en Electromecánica Automotriz., Quito. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8637987>
- Pham, T., & Space, B. (13 de Enero de 2020). Insights into the Gas Adsorption Mechanisms in Metal–Organic Frameworks [Perspectivas sobre los mecanismos de adsorción de gases en estructuras metalorgánicas]. *Topics in Current Chemistry*, 378(14). doi:<https://doi.org/10.1007/s41061-019-0276-x>
- Pinto, A. M. (2013). *Encuentro, Destrucción y Ocultamiento de las Indias Occidentales*. (E. d. Facultad de Ciencias Humanas, Ed.) Bucaramanga, Santander, Colombia: División Publicaciones UIS. doi:ISBN: 978-958-8777-61-0
- PND 2022-2026. (2023). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026: Colombia Potencia Mundial de la vida*. Bogotá. Obtenido de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Publicaciones/plan-nacional-de-desarrollo-2022-2026-colombia-potencia-mundial-de-la-vida.pdf>

- Polo, J. M., Rodríguez, J., & Sarmiento, A. (11 de Noviembre de 2008). Potencial de generación de energía a lo largo de la costa colombiana mediante el uso de corrientes inducidas por mareas. *Revista de Ingeniería*(28), 7. doi:<https://doi.org/10.16924/revinge.28.13>
- Polyak, D. (2023). *Vanadium Statistics and Information [Estadísticas e información sobre el vanadio]*. USGS, National Minerals Information Center. Recuperado el 2024, de <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/vanadium-statistics-and-information>
- Popa, I. O., Ibañez Casao, Á., Pastor-Flores, P., & Barrera, F. (16 de Junio de 2022). Introducción a las baterías de flujo redox de vanadio (VBFR) y su monitorización. *Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A*, 10, 2. Recuperado el 2024, de <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-cientifica-del-sur/quimica-general/introduccionalasbateriasdeflujoredoxdevanadiovbfrysumonitorizacion-iulian-popa/65177500>
- Portafolio. (23 de Abril de 2024). *El carbón es fundamental para la transición energética de Colombia': Carlos Cante, presidente ejecutivo de Fenalcarbón, explica la importancia que tiene este mineral para el país y su verdadero papel en la matriz eléctrica nacional*. Obtenido de Portafolio: <https://www.proquest.com/docview/3043718565?pq-origsite=primo&sourcetype=Trade%20Journals>
- Prensa Presidencia. (3 de Octubre de 2024). *Consortio Ecopetrol-Petrobras confirma hallazgo histórico de reservas de gas en el pozo Sirius costa afuera*. Obtenido de Presidencia de la República: <https://www.presidencia.gov.co/prensa/Paginas/Consortio-Ecopetrol-Petrobras-confirma-hallazgo-historico-de-reservas-de-gas-en-el-pozo-Sirius-costa-afuera-241003.aspx>
- PRTR España. (2007). *Partículas PM10*. Obtenido de Ministerio de la Transición Ecológica: <https://prtr-es.es/particulas-pm10,15673,11,2007.html>
- Publimotos. (Julio de 2021). *¿Motocicletas diesel? | Sí han existido... conócelas*. Obtenido de Mundo: <https://publimotos.com/actualidad/mundo/motocicletas-diesel-si-han-existido-conocelas/>
- Puentes Quiroz , L. E., & Velandia Charris, L. A. (2024). *Revisión Sistemática de Tecnologías para Captura de CO2*. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga: Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Químico. Obtenido de

<https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/eb1cdd81-405d-4bda-a68e-defa2d183369/content>

Quintero González, J. R., & Quintero González, L. (15 de Octubre de 2015). Sistemas de producción y potencial energético de la energía mareomotriz. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(1), 7 (39-45). Obtenido de [https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria\\_sogamoso/article/view/4078/4150](https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/4078/4150)

Quiroga Mancipe, W. A. (2024). *Diseño de celdas para electrólisis alcalina del agua: estudio del estado del arte para la producción de hidrógeno por celdas de electrólisis alcalina de agua*. Tesis de Pregrado Ingeniería Metalúrgica., Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingeniería Físicoquímica Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Bucaramanga. Obtenido de <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/5d571d8f-5835-403c-85e8-0a9cf793f7e0/content>

Ramon. (15 de Octubre de 2015). *Appleton Edison: La primer hidroeléctrica del mundo*. Obtenido de JAPAC: <https://japac.gob.mx/2015/10/12/3122/>

Reacciona Explora. (20 de Mayo de 2013). *K41 Jardín submarino - Youtube*. (Universidad de Girona) Obtenido de Capítulo 41 del programa de divulgación científica Kopernik.: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_19Y3lAmn1k](https://www.youtube.com/watch?v=_19Y3lAmn1k)

Reacciona Explora. (22 de Mayo de 2013). *K50 aplicaciones del Germanio*. Obtenido de [https://www.youtube.com/watch?v=\\_CEbkMSbDuU](https://www.youtube.com/watch?v=_CEbkMSbDuU)

REHAU. (2024). *¿Qué es un fancoil y para qué sirve?* Obtenido de <https://www.rehau.com/es-es/que-es-fancoil>

REN21. (2024). *Hydropower [Energía hidroeléctrica]*. Obtenido de Renewables Global Status Report 2024 Collection: [https://www.ren21.net/gsr-2024/modules/energy\\_supply/02\\_market\\_and\\_industry\\_trends/05\\_hydropower/](https://www.ren21.net/gsr-2024/modules/energy_supply/02_market_and_industry_trends/05_hydropower/)

Renault. (2024). *Renault Duster*. Obtenido de Vehículos: <https://www.renault.com.co/vehiculos/duster.html>

Repsol. (2024). *Sacándole el máximo partido a las mareas*. Obtenido de <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-mareomotriz/index.cshtml>

Resolución 0367 Min. Ambiente. (12 de Marzo de 2018). *Por la cual se adiciona la Resolución 1988 de 2017*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible:

<https://archivo.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/20-res%20367%20de%202018.pdf>

Resolución 0638 UPME. (06 de Diciembre de 2007). *Por medio de la cual se modifica el artículo 4° y anexos 1, 2 y 3 y se adicionan dos artículos a la Resolución UPME número 0520 del 9 de octubre de 2007 que estableció lo relacionado con el Registro de Proyectos de Generación y la forma como deben ser.* Obtenido de Unidad de Planeación Minero-Energética: [https://www1.upme.gov.co/Normatividad/0638\\_2007.pdf](https://www1.upme.gov.co/Normatividad/0638_2007.pdf)

Resolución 1274 Min. Ambiente. (30 de Junio de 2006). *Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para la construcción y operación de rellenos sanitarios y se adoptan otras determinaciones.* Obtenido de Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial: [https://www.anla.gov.co/documentos/normativa/terminos\\_referencia/Res1274-30-06-06.pdf](https://www.anla.gov.co/documentos/normativa/terminos_referencia/Res1274-30-06-06.pdf)

Resolución 1390 Min. Ambiente. (27 de Septiembre de 2005). *Por la cual se establecen directrices y pautas para el cierre, clausura y restauración o transformación técnica a rellenos sanitarios de los sitios de disposición final a que hace referencia el artículo 13 de la Resolución 1045 de 2003 que no cumplan las.* Obtenido de Alcaldía de Bogotá: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=17799>

Resolución 143 UPME. (10 de Marzo de 2016). *Por la cual se modifica el artículo quinto y se adicionan artículos y anexos a la Resolución UPME 0520 de Octubre de 2007 por medio de la cual se establece el Registro de Proyectos de Generación y se toman otras disposiciones.* Obtenido de Unidad de Planeación Minero-Energética: [https://www1.upme.gov.co/Documents/143\\_2016.pdf](https://www1.upme.gov.co/Documents/143_2016.pdf)

Resolución 1529 Min. ambiente. (6 de Agosto de 2010). *Por la cual se modifica la Resolución 1684 de 2008.* Obtenido de Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40114>

Resolución 1684 Min. Ambiente. (25 de Septiembre de 2008). *Por la cual se modifica parcialmente la Resolución 1390 de 2005 y se toman otras determinaciones.* Obtenido de Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=33203>

Resolución 1822 Min. Ambiente. (22 de Septiembre de 2009). *Por la cual se modifica parcialmente la Resolución 1684 de 2008.* Obtenido de Ministerio de Ambiente, Vivienda

- y Desarrollo Territorial:  
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=37500>
- Resolución 1890 Min. Ambiente. (27 de Septiembre de 2011). *Por la cual se enuncian alternativas para la disposición final de los residuos sólidos en los municipios y distritos que dieron aplicación a lo dispuesto en las Resoluciones 1390 de 2005, 1684 de 2008, 1822 de 2009 y 1529 de 2010.* Obtenido de Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial:  
[https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion\\_minambientevdt\\_1890\\_2011.htm](https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion_minambientevdt_1890_2011.htm)
- Resolución 1988 Min. Ambiente. (28 de Septiembre de 2017). *Por la cual se adoptan las metas ambientales y se establecen otras disposiciones.* Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible:  
<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-1988-de-2017.pdf>
- Resolución 40304 Min. Minas. (15 de Octubre de 2020). *Por la cual se adopta el Plan de Abastecimiento de Gas Natural y se adoptan otras disposiciones.* Obtenido de Ministerio de Minas y Energía:  
[https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_minminas\\_40304\\_2020.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_minminas_40304_2020.htm)
- Resolución 40393 Min. Minas. (27 de Marzo de 2015). *Por la cual se establecen los requisitos para la aprobación de la viabilidad técnica y financiera de los proyectos de inversión relacionados con el estudio y diseño, construcción, rehabilitación, mantenimiento, mejoramiento, ampliación, interventoría, equ.* Obtenido de Ministerio de Vivienda, ciudad y territorio: [https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion\\_minminas\\_40393\\_2015.htm](https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion_minminas_40393_2015.htm)
- Resolución 520 UPME. (11 de Octubre de 2007). *Por medio de la cual se establece el registro de proyectos de generación con el cual deben ser registrados los proyectos de generación y cogeneración de energía eléctrica a operar en el Sistema Interconectado Nacional.* Obtenido de Gestor Normativo Alejandria 2.0 CREG:  
[https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_upme\\_0520\\_2007.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_upme_0520_2007.htm)
- Resolución 60 CREG. (20 de Julio de 2019). *Por la cual se hacen modificaciones y adiciones transitorias al Reglamento de Operación para permitir la conexión y operación de plantas solares fotovoltaicas y eólicas en el SIN y se dictan otras disposiciones.* Obtenido de CREG:  
[https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_creg\\_0060\\_2019.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0060_2019.htm)

- Ricci, A. (03 de Junio de 2024). Conoce si necesitas licencia de conducción para manejar una moto eléctrica: esto dice la ley de Colombia. *La República Peru*. Obtenido de <https://larepublica.pe/datos-lr/colombia/2024/06/02/conoce-si-necesitas-licencia-de-conduccion-para-manejar-una-moto-electrica-esto-dice-la-ley-de-colombia-lrtmco-22506>
- Rivera, J. (11 de Noviembre de 2018). Viabilidad del proceso de gasificación de residuos con alto contenido en material plástico. doi:10.35376/10324/33067
- Rizo, C., A, J., Cano Salazar, L., Flores-guia, T., & Cabrera-Munguia, D. A. (03 de Marzo de 2021). *Estructuras metal-orgánicas (MOFs) nanoestructuradas para la liberación controlada de fármacos*. Obtenido de Scielo: <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69634>
- Robledo Gómez, A. F. (2019). *Estudio de Factibilidad técnico-económica del uso de un sistema de cogeneración para la recuperación de calor en una planta cementera en Colombia*. Académico, Instituto Tecnológico Metropolitano, Facultad de Ingenierías, Medellín. Recuperado el 2024, de [https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/1385/Rep\\_Itm\\_mae\\_Robledo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/1385/Rep_Itm_mae_Robledo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Roca, J. A. (20 de Agosto de 2023). El proceso de reformado autotérmico gana impulso para la producción de hidrógeno azul mediante captura y almacenamiento de carbono. *Periodico de la Energía*. Obtenido de Periodico de la Energía: <https://elperiodicodelaenergia.com/el-proceso-de-reformado-autotermico-gana-impulso-para-la-produccion-de-hidrogeno-azul-mediante-captura-y-almacenamiento-de-carbono/>
- Roca, R. (17 de Febrero de 2024). *Así es cómo una enorme 'cometa' de 12 metros y 28 toneladas inyecta por primera vez energía mareomotriz a la red*. Obtenido de Periódico de la Energía: <https://elperiodicodelaenergia.com/asi-es-como-una-enorme-cometa-de-12-metros-y-28-toneladas-inyecta-por-primera-vez-energia-mareomotriz-a-la-red/>
- Rock Identifier. (2024). *Telurio*. Obtenido de Tellurium: <https://rockidentifier.com/es/wiki/Tellurium.html>
- Rodríguez Cifuentes, D. A. (2 de Septiembre de 2022). *Energía Mareomotriz para Colombia*. Obtenido de Universidad Militar Nueva Granada: <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/aee84160-2abc-40fe-ae79-9dfab9b7d05b/content>
- Rojas, S. A. (2008). *Consideraciones técnicas y económicas de vehículos a gas natural*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e ingeniería, Lima. Obtenido de

- <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/8855a9a4-baa9-4151-816d-ee3640674ed7/content>
- Román, D. F. (2 de Mayo de 2024). *Boletín Energía180: Avances en Baterías de Sodio-Azufre para Almacenamiento Energético*. Obtenido de LinkedIn: <https://www.linkedin.com/pulse/bolet%C3%ADn-energ%C3%ADa180-avances-en-bater%C3%ADas-de-para-energ%C3%A9tico-rom%C3%A1n-kz1jf/>
- Ros Marín, J. A., & Barrera Doblado, Ó. (2017). *Vehículos Eléctricos e híbridos*. Madrid, España: Ediciones Paraninfo.
- Rubio, S. R., Sierra, F. E., & Guerrero, C. A. (1 de Septiembre de 2011). Gasification from waste organic materials [Gasificación a partir de materiales orgánicos de desecho]. *Ingeniería e Investigación*, 31(3), 17-25. doi:<https://doi.org/10.15446/ing.investig.v31n3.26374>
- RUNT. (31 de Dic de 2023). *RUNT en cifras*. Obtenido de Runt: <https://www.runt.gov.co/sites/default/files/documentos/Balance%20de%20cifras%20del%20sector%202023%20RUNT.pdf>
- Salazar Sierra, C. (7 de Julio de 2023). *Los generadores descartan tocar cargo por confiabilidad ante el fenómeno de El Niño*. Obtenido de La República: <https://www.larepublica.co/economia/los-generadores-descartan-tocar-cargo-por-confiabilidad-ante-el-fenomeno-de-el-nino-3652793>
- Sánchez Pérez, J. (09 de 09 de 2021). *Modelado de sistemas de gestión térmica en baterías para vehículos híbridos mediante el uso de nanofluidos*. (U. P. València, Ed.) doi:<http://hdl.handle.net/10251/174149>
- Santander Competitivo. (10 de Diciembre de 2014). *Proyectos Estratégicos*. Obtenido de Comité Regional de Competitividad e Innovación: <https://santandercompetitivo.org/proyectos-estrategicos/en-funcionamiento/central-hidroelctrica-sogamoso/>
- Sebastiano Milesi, S. (27 de Agosto de 2014). Energía eólica marina, energía limpia . *Revista de Marina*, 3, 42-50. Obtenido de <https://revistamarina.cl/revistas/2014/3/milesi.pdf>
- Servicio Geológico Colombiano. (2024). *Presentación en el marco del evento "Cadenas Productivas"*. Obtenido de <https://www.anm.gov.co/cadenas%2Aproductivas%2AArenas%2Asil%C3%ADceas%2Aen%2Aa%2Aindustria%2Acolombiana%2Apaneles%2Asolares%2Ay%2Atransici%C3%B3n%2Aenerg%C3%A9tica>

- SETO. (2024). *Cadmium telluride [Telururo de cadmio]*. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy Solar Energy Technologies Office. Obtenido de <https://www.energy.gov/eere/solar/cadmium-telluride>
- Shaw, V. (16 de Mayo de 2024). *Entra en funcionamiento en China el mayor proyecto de almacenamiento de energía en aire comprimido del mundo*. Obtenido de PV Magazine: <https://www.pv-magazine-latam.com/2024/05/16/entra-en-funcionamiento-en-china-el-mayor-proyecto-de-almacenamiento-de-energia-en-aire-comprimido-del-mundo/>
- Shell. (Noviembre de 2020). *El gas natural y la transición energética*. . Obtenido de <https://www.shell.com.co/energia-e-innovacion/gas-natural/gas-natural-y-transicion-energetica.html#gas>
- Shivaji , S., & Alan L. , M. (Julio de 2003). *Gas Separation by Zeolites [Separación de gases mediante zeolitas]*. Obtenido de Beta Chem UW: [http://beta.chem.uw.edu.pl/people/AMyslinski/nowy/zarzadzanie\\_01/literature\\_HWW/01.pdf](http://beta.chem.uw.edu.pl/people/AMyslinski/nowy/zarzadzanie_01/literature_HWW/01.pdf)
- SIAME 2. (2024). *Sistema de Información Ambiental Minero Energético*. Obtenido de UPME: <https://www1.upme.gov.co/siame/Paginas/atlas-del-potencial-energetico-de-la-biomasa.aspx>
- SIAME. (2024). *Atlas del potencial energético de la Biomasa residual en Colombia*. Obtenido de Sistema de Información Ambiental Minero-Energético: <https://www1.upme.gov.co/siame/Paginas/atlas-del-potencial-energetico-de-la-biomasa.aspx>
- Sierra, C. S. (28 de Junio de 2023). Colombia está en el top 40 del Índice de Transición Energética, pero bajó frente a 2021. *La República*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/economia/colombia-esta-en-el-top-40-del-indice-de-transicion-energetica-pero-bajo-frente-a-2021-3646770>
- SIPG. (26 de Julio de 2024). *Documento definitivo: Estudio Técnico para el Plan de Abastecimiento de Gas Natural 2023 - 2038*. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/sipg/Paginas/plan-abastecimiento-GN.aspx>
- SLB. (03 de Marzo de 2024). *How SLB reservoir evaluation optimizes near-field exploration [Cómo la evaluación de yacimientos SLB optimiza la exploración de campos cercanos]*. Obtenido de SLB: <https://www.slb.com/videos/how-slb-reservoir-evaluation-optimizes-near-field-exploration>

- Solidworks. (2011). *Coeficiente de transferencia de calor por convección*. Obtenido de [https://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection\\_Topics/Convection\\_Heat\\_Coefficient.htm](https://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection_Topics/Convection_Heat_Coefficient.htm)
- Somerauto. (2024). *Mazda CX30*. Obtenido de Mazda: <https://somerauto.com.co/vehiculo/mazda-cx-30/>
- Starker Avanti S/P. (2024). *Avanti S/p*. Obtenido de Motos Electricas: <https://www.autecoelectric.com/moto-electrica-starker-avanti-s/p>
- Starker Avanti X. (09 de 2023). *Especificaciones Técnicas Avanti X*. Obtenido de Starker: <http://solugreen.co/wp-content/uploads/2023/09/Ficha-tecnica-Avanti-X.pdf>
- Starker Reactor. (2024). *Reactor*. Obtenido de Motos Electricas: <https://www.autecoelectric.com/moto-electrica-starker-reactor/p>
- Starker Skuty One. (2024). *Skuty One*. Obtenido de Auteco Electric: <https://www.autecoelectric.com/moto-electrica-starker-skuty-one/p>
- Starker Skuty One Ficha. (10 de 07 de 2023). *Manual de Garantía y Mantenimiento*. Obtenido de Auteco Mobility: <https://media.autecomobility.com/recursos/pdf/manuales/Starker/Manual-de-garantia-y-mantenimiento-skuty-one-2022.pdf>
- Suárez, A. (28 de Diciembre de 2023). *El Volvo EX30 llega oficialmente a Colombia en 2024, estos serán sus detalles*. Obtenido de FuelCarMagazine: <https://fuelcarmagazine.com/noticias/colombia/el-volvo-ex30-llega-oficialmente-a-colombia-en-2024-estos-seran-sus-detalles/>
- Suárez, K. (07 de Noviembre de 2024). AHMSA, la caída de un gigante de acero: de la trama de sobornos de Odebrecht a los 5.000 millones de dólares en deuda. *El País*. Obtenido de <https://elpais.com/mexico/economia/2024-11-08/ahmsa-la-caida-de-un-gigante-de-acero-de-la-trama-de-sobornos-de-odebrecht-a-los-5000-millones-de-dolares-en-deuda.html>
- Sumoto del Cauca. (2020). *Piaggio Ape Chasis - Blanco 2020*. Obtenido de Piaggio: <https://sumotodelcauca.com/producto/piaggio-ape-chasis-blanco-2020/>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2023). *Informe Nacional de Disposición*. Bogotá. Obtenido de <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Nacional-de-Disposicion-Final-de-Residuos-Solidos-2022.pdf>

- Susuki. (2024). *DR 150*. Obtenido de Motocicletas Susuki: <https://suzuki.com.co/motocicletas/enduro/dr-150>
- Susuki. (2024). *GN 125 Euro 3*. Obtenido de Motocicletas Sport: <https://suzuki.com.co/motocicletas/sport/gn-125-euro-3>
- Thema, J., & Roa García, M. (2023). *La transición energética en Colombia*. Universidad de los Andes. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Johannes\\_Thema/publication/372477627\\_La\\_transicion\\_energetica\\_en\\_Colombia\\_Situacion\\_actual\\_proyecciones\\_desafios\\_narrativas\\_y\\_politicas\\_publicas\\_-\\_en\\_relacion\\_con\\_la\\_transicion\\_energetica\\_en\\_Alemania/links/64b90e6b8de7](https://www.researchgate.net/profile/Johannes_Thema/publication/372477627_La_transicion_energetica_en_Colombia_Situacion_actual_proyecciones_desafios_narrativas_y_politicas_publicas_-_en_relacion_con_la_transicion_energetica_en_Alemania/links/64b90e6b8de7)
- Toyota. (2024). *Toyota Hilux*. Obtenido de Hilux: <https://www.toyota.com.co/vehiculo/hilux-3/>
- Toyota Tech. (26 de Junio de 2022). *Toyota Corolla Cross*. Obtenido de Manual: <https://www.toyota-tech.eu/HYBRID/HVDM/EN/hvdm%20Corolla%20Cross.pdf>
- Trading Economics In. (2024). *Indio - Precios*. Obtenido de Commodity: <https://es.tradingeconomics.com/commodity/indium>
- Trading Economics Te. (Diciembre de 05 de 2024). *Telurio - Contrato De Futuros - Precios*. Obtenido de <https://es.tradingeconomics.com/commodity/tellurium>
- Tuninetti, J., Rafti, M., & Fracaroli, A. M. (Febrero de 2019). Metal-organic frameworks (MOFS): structural multifunctionality and integration into diverse platforms [Marcos metalorgánicos (MOFS): multifuncionalidad estructural e integración en diversas plataformas]. *Anales de la Asociación de Química Argentina*, 105(2), 21. Recuperado el 2024, de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/126471>
- UNAL. (15 de Octubre de 2015). *Colombia necesita zeolitas, pero no las produce*. Obtenido de Ciudad y Territorio: <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/colombia-necesita-zeolitas-pero-no-las-produce>
- UNAL2. (2024). *Hidroeléctrica Betania (Huila)*. Recuperado el 2024, de Conflictos ambientales: [https://conflictosambientales.unal.edu.co/oca/env\\_problems/viewEnvProblem/32](https://conflictosambientales.unal.edu.co/oca/env_problems/viewEnvProblem/32)
- UniAndes. (15 de Febrero de 2024). *¿Qué es y por qué ocurre el Fenómeno del Niño?* Obtenido de Universidad de los Andes: <https://www.youtube.com/watch?v=Y1A9QpUM5aU>



- Minero Energética: <https://www1.upme.gov.co/siel/Pages/Inscripcion-proyectos-generacion.aspx>
- UPME Leña. (2022). *Plan Nacional de Sustitución de leña y otros combustibles ineficientes y altamente contaminante para la cocción doméstica de alimentos*. Consulta, Unidad de Planeación Minero-Energética., Subsección Hidrocarburos, Bogotá. Obtenido de [https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Eliminados/Tomo\\_II\\_Enfoque\\_territorial\\_dic2\\_obsoleto.pdf](https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Eliminados/Tomo_II_Enfoque_territorial_dic2_obsoleto.pdf)
- UPME Plan. (2023). *Plan Indicativo de Cobertura de Energía Eléctrica 2019-2023*. Oficial, Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero Energética, Bogotá. Recuperado el 2024, de [https://www1.upme.gov.co/siel/PIEC/2019-23/PIEC\\_2019-2023\\_VF.pdf](https://www1.upme.gov.co/siel/PIEC/2019-23/PIEC_2019-2023_VF.pdf)
- UPME Reg. (2024). *Registro de proyectos de generación de energía eléctrica*. Obtenido de Unidad de Planeación Minero Energética: <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Registro.aspx>
- UPME X. (24 de Febrero de 2024). *Las obras del Plan de Abastecimiento de Gas incluyen infraestructura de Regasificación del Pacífico, gasoducto Yumbo Buenaventura, 3 obras con bidireccionalidades, interconexión Costa Caribe - Centro [Imagen Adjunta] [Tweet]*. Obtenido de <https://x.com/UPMEOficial/status/1364553186447663107/photo/1>
- UPRA. (2024). *Resultados Preliminares Evaluaciones Agropecuarias Primer Semestre 2024*. Obtenido de [https://upra.gov.co/es-co/Evas\\_Documentos/01\\_ResEVASemI\\_2024.pdf](https://upra.gov.co/es-co/Evas_Documentos/01_ResEVASemI_2024.pdf)
- UPRA BASE Agrícola 2019-2033. (2024). *Evaluaciones Agropecuarias municipales BASE Agrícola 2019-2033*. Fuente: EVA -UPRA, con base en información de: Municipios, SICA de la Federación Nacional de Cafeteros, ENAM -DANE y Fedearroz; y agremiaciones de productores locales.
- UPRA Base Pecuaria. (2023). *Base pecuaria Evas 2019 – 2023*. Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. Obtenido de [https://upra.gov.co/es-co/Evas\\_Documentos/BasePecuaria20192023.xlsx](https://upra.gov.co/es-co/Evas_Documentos/BasePecuaria20192023.xlsx)
- USGS. (Enero de 2024). *Mineral Commodity Summaries [Resúmenes de productos minerales 2024]*. U.S. Geological Survey. Obtenido de U.S. Geological Survey: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-indium.pdf>

- USGS Te. (2023). *Tellurium [Telurio]*. Mineral Commodity Summaries Tellurium, U.S. Geological Survey. Obtenido de <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-tellurium.pdf>
- USGS V. (2024). *Vanadium [Vanadio]*. U.S. Geological Survey. Recuperado el 2024, de <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-vanadium.pdf>
- Vásques, R. -B. (2009). *El ganado Romosinuano en la producción de carne en Colombia*. Obtenido de [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/17355/Ver\\_Documento\\_17355.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/17355/Ver_Documento_17355.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Vásquez, R. R., Martínez, R., Ballesteros Ch, H., Grajales, H., Abuabara, Y., & Pérez, J. E. (2006). *El ganado Romosinuano en la producción de carne en Colombia*. Obtenido de Repositorio Agrosavia: [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12818/41774\\_43784.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12818/41774_43784.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Velásquez Ordoñez, R. (2017). Esquema para la transición energética en el sector eléctrico. *Tesis de maestría*. (U. N.–s. Medellín, Ed.) Medellín, Antioquia, Colombia. Obtenido de Repositorio UNAL: <https://repository.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/60122/1085288499.2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Viñals-Verde, M., Bell Garcia, A., Michelena Álvarez, G., & Ramill Mes, M. (2015). *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, Cuba. Recuperado el 2024, de <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223123848002.pdf>
- Volvo. (2024). *Ex30* . Obtenido de Cars: <https://www.volvocars.com/co/cars/ex30-electric/>
- Wang, X., & Economides, M. (2009). Chapter 7 - Gas-To-Liquids (GTL) [Capítulo 7 - Conversión de gas a líquido (GTL)]. En M. E. Xiuli Wang (Ed.), *Advanced Natural Gas Engineering* (págs. 243-287). Gulf Publishing Company. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-1-933762-38-8.50014-9>.
- WEF. (2023). *Fostering Effective Energy Transition 2024 [Fomento de una transición energética eficaz 2024]*. World Economic Forum. Obtenido de [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Fostering\\_Effective\\_Energy\\_Transition\\_2024.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Fostering_Effective_Energy_Transition_2024.pdf)

- World Car Awards. (2025). *World Car Awards [Premios mundiales del automóvil]*. (C. S. Nakamura, Productor) Obtenido de WCA 2025: <https://www.worldcarawards.com/web/>
- World Urban Award. (4 de Marzo de 2024). *World Urban Car Volvo EX-30 [Carro urbano mundial Award]*. Obtenido de Archive Web: [https://web.archive.org/web/20240304221024/https://www.worldcarawards.com/web/eligible\\_vehicles.asp?cat=10](https://web.archive.org/web/20240304221024/https://www.worldcarawards.com/web/eligible_vehicles.asp?cat=10)
- Yamaha. (2024). *Nmax Gpd155a*. Obtenido de Yamaha Incolmotos: <https://www.incolmotos-yamaha.com.co/vehiculo/gpd155a/15956/>
- Yamaha. (2024). *XTZ150*. Obtenido de Yamaha Incolmotos: <https://www.incolmotos-yamaha.com.co/vehiculo/xtz150/9869/>
- Yip, N. Y., & Elimelech, M. (2 de Abril de 2012). Thermodynamic and Energy Efficiency Analysis of Power Generation from Natural Salinity Gradients [Análisis termodinámico y de eficiencia energética de la generación de energía a partir de gradientes naturales de salinidad]. *Environmental Science & Technology*, 46(9), 5230-5239. doi:10.1021/es300060m

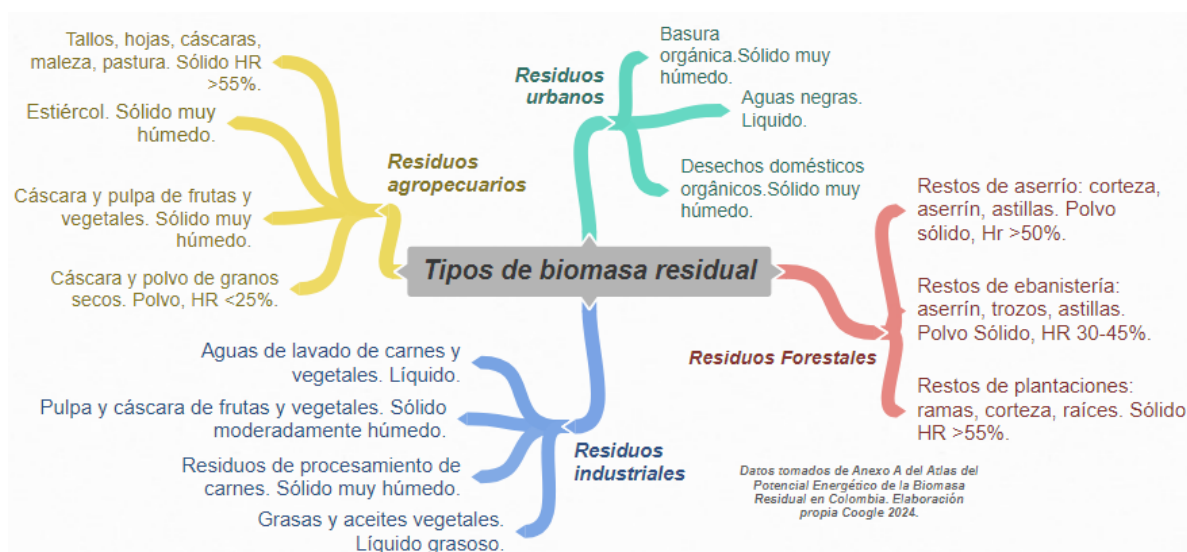
## Apéndice A Biomasa Residual

En Colombia, respecto a producción agrícola, pecuaria y residuos de disposición final, se tiene el potencial energético en aprovechar subproductos orgánicos como residuos de cosechas, podas urbanas, efluentes ganaderos y lodos de aguas residuales que, según el SIAME, (2024), estas materias pueden generar energía mediante procesos de combustión exotérmica, donde el contenido calórico de la biomasa permite transformar residuos en fuentes energéticas útiles.

Por tanto, se puede decir que la biomasa residual hace referencia a los subproductos que se derivan de las transformaciones naturales o industriales que se llevan a cabo en la materia orgánica, la figura 63 muestra los tipos y características físicas de los residuos de biomasa residual, mientras que las figuras 64, 65 y 66, detallan el poder calórico inferior (PCI) de los residuos agrícolas, pecuarios y urbanos, respectivamente.

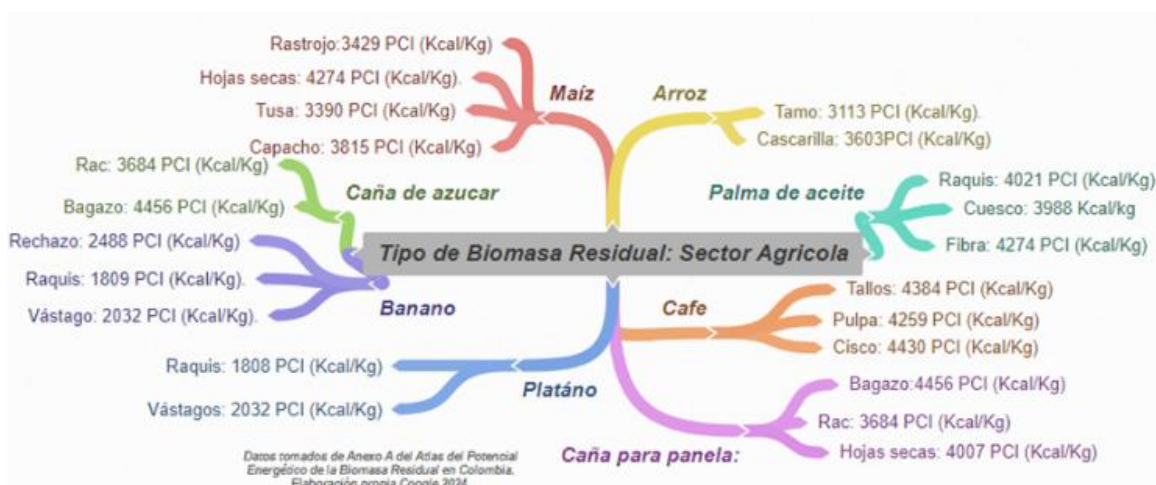
**Figura 63**

*Biomasa residual tipos y características físicas*



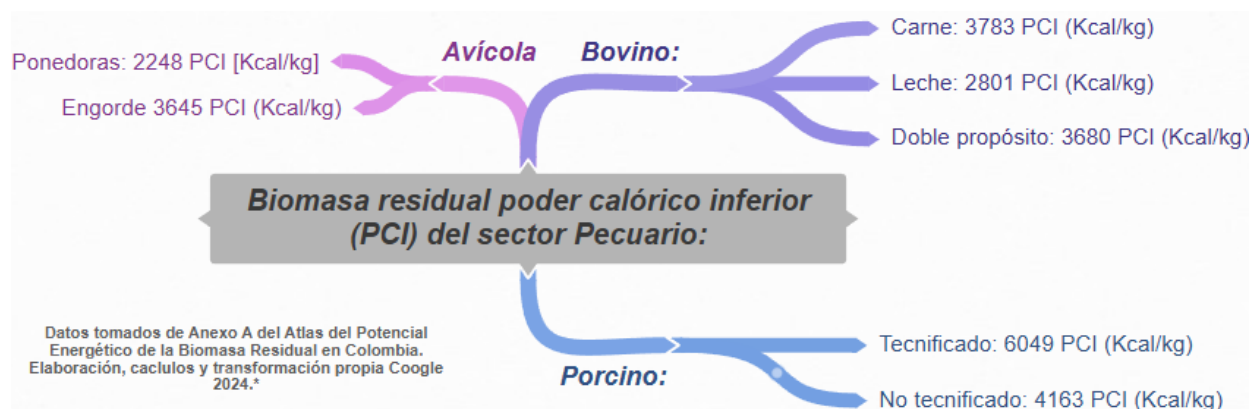
**Figura 64**

*Biomasa residual poder calórico inferior (PCI) del sector agrícola en Colombia principales residuos*



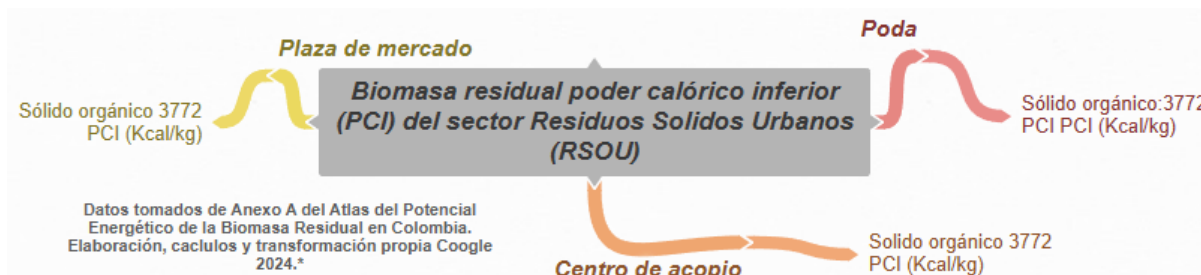
**Figura 65**

*Biomasa residual poder calórico inferior (PCI) del sector Pecuario en Colombia principales residual*



**Figura 66**

*Biomasa residual poder calórico inferior (PCI) del sector Residuos sólidos Urbanos (RSOU) en Colombia principales residuos*



Conforme al Atlas potencial energético de biomasa residual en Colombia, existen estimaciones para los distintos tipos de residuos más comunes de biomasa que permite hacer cálculos para establecer situaciones de aprovechamiento de residuos; con ese fin se procede a realizar el siguiente ejercicio de transformación energética.

**Apéndice B ¿Cuánta biomasa residual se necesita para encender una bombilla vida útil?**

Para ilustrar el potencial de la biomasa como fuente de energía, se puede calcular cuánta biomasa residual se necesitaría para alimentar una bombilla a lo largo de su vida útil por medio de procesos exotérmicos, siendo la bombilla un producto que simboliza los avances industriales, tecnológicos, de la vida urbana y la modernidad. El análisis, se basa en los datos del Poder Calorífico Inferior (PCI) de biomasa por sectores (agrícola, pecuario y residuos sólidos urbanos), Obsérvese los datos de Biomasa residual poder calórico inferior (PCI) expuestas en las figuras 64, 65 y 66, conociendo estos valores para cada tipo de residuo por kilo del mismo se puede señalar por ejemplo el raquis de banano por cada kilo tiene la posibilidad ofrecer 1809 Kcal.

**Ecuación 1**

*Factor de Conversión*

$$1 \text{ MWh} = 860.000 \text{ kcal.} \quad (1).$$

## Ecuación 2

*Energía total consumida por cada tipo de bombilla*

$$\text{Energía total (Wh)} = \text{Potencia (W)} \times \text{Vida útil en horas(h)} \quad (2).$$

## Tabla 18

*Energía para encender bombillas de distintos tipos durante su vida útil*

<b>Bombillas Incandescentes</b> Vida útil: 750 h. Prom. 60W.	<b>Bombillas Incandescentes Halógenas</b> Vida útil: 1000 h. Prom. 43W.	<b>Bombillas Fluorescentes Compactas</b> Vida útil: 10,000 h. Prom. 14.4W.	<b>Bombillas LED</b> Vida útil: 20,000 h. Prom. 7.7W.
Bombilla de 25W. $\text{Energía} = 25W \times 750h. = 18,750Wh. = 18.75kWh.$	Bombilla de 18W. $\text{Energía} = 18W \times 1000h. = 18,000Wh. = 18kWh.$	Bombilla de 7W. $\text{Energía} = 7W \times 10,000h = 70,000Wh = 70kWh$	Bombilla de 3-4W. $\text{Energía} = 3.5W \times 20,000h = 70,000Wh = 70kWh$
Bombilla de 40W. $\text{Energía} = 40W \times 750h. = 30,000Wh. = 30kWh.$	Bombilla de 29W. $\text{Energía} = 29W \times 1000h. = 29,000Wh. = 29kWh.$	Bombilla de 9W. $\text{Energía} = 9W \times 10,000h = 90,000Wh = 90kWh$	Bombilla de 4-6W. $\text{Energía} = 5W \times 20,000h = 100,000Wh = 100kWh$
Bombilla de 60W. $\text{Energía} = 60W \times 750h = 45,000Wh = 45kWh$	Bombilla de 43W. $\text{Energía} = 43W \times 1000h = 43,000Wh = 43kWh$	Bombilla de 14W. $\text{Energía} = 14W \times 10,000h = 140,000Wh = 140kWh$	Bombilla de 7-9W. $\text{Energía} = 8W \times 20,000h = 160,000Wh = 160kWh$

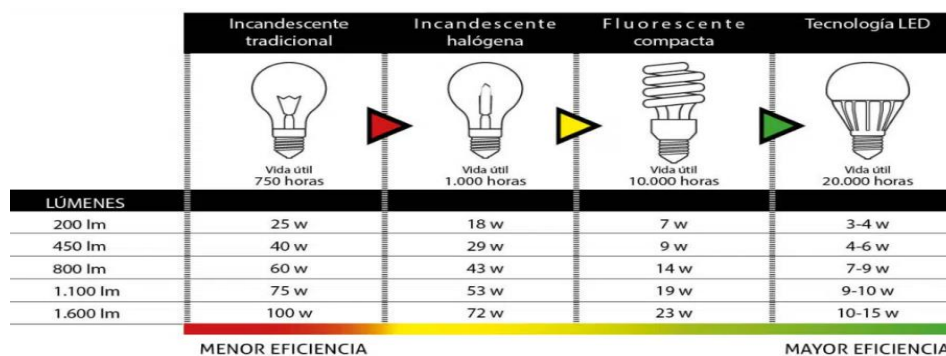
Bombilla de 75W. $Energía = 75W \times 750h = 56,250Wh = 56.25kWh$	Bombilla de 53W. $Energía = 53W \times 1000h = 53,000Wh = 53kWh$	Bombilla de 19W. $Energía = 19W \times 10,000h = 190,000Wh = 190kWh$	Bombilla de 9-10W. $Energía = 9.5W \times 20,000h = 190,000Wh = 190kWh$
Bombilla de 100W. $Energía = 100W \times 750h = 75,000Wh = 75kWh$	Bombilla de 72W. $Energía = 72W \times 1000h = 72,000Wh = 72kWh$	Bombilla de 23W. $Energía = 23W \times 10,000h = 230,000Wh = 230kWh$	Bombilla de 10-15W. $Energía = 12.5W \times 20,000h = 250,000Wh = 250kWh$

Nota. Elaboración y cálculos propios.

Para el cálculo se necesita conocer la vida útil y potencia de las bombillas utilizando para ellos 4 clases, las Incandescentes, las Halógenas, las fluorescentes y las Led como se exponen en la Figura 67.

**Figura 67**

*Tipos de bombillas, principales características*



Nota. Adaptado de Celer (2024).

Dado la gran cantidad de tipos de bombillas por cada clase, se utiliza el promedio de todos los tipos de bombilla por clase para realizar el ejercicio, en ese sentido se tienen los siguientes datos.

- Promedio Bombilla Incandescente.
  - = 750h vida útil × 60W
  - = 45.000 Wh
  - = 45kWh
- Promedio Bombilla Fluorecente.
  - = 10000h vida útil × 14.4W
  - = 144000 Wh
  - = 144K Wh
- Promedio Bombilla Halógena.
  - = 1000h vida útil × 43W
  - = 43000 Wh
  - = 43K Wh
- Promedio Bombilla LED.
  - = 20000h vida útil × 7.7W
  - = 154000 Wh
  - = 154K Wh

Luego, ya teniendo la energía total promedio necesaria por cada clase de bombilla durante toda su vida útil, esta energía se convierte en la cantidad de biomasa necesaria en kilos, considerando el Poder Calorífico Inferior (PCI) específico de cada tipo de residuo para ello primero se utiliza la siguiente:

### Ecuación 3

*PCI a energía potencial por kilogramo*

$$\text{PCI en kWh/kg} = \left( \frac{\text{Residuo PCI}^{\text{kcal/kg}}}{860} \right) = \text{Energía Potencial por kilo kWh/kg} \quad (3).$$

Ya teniendo los valores de energía total para las bombillas y convertidos los valores de kCal/kg a kWh/h, se procede a conocer la cantidad de kilos que se necesitarían si la eficiencia fuera del 100% la cual se calcula conforme la siguiente:

### Ecuación 4

*Biomasa requerida (kg)*

$$\text{Biomasa requerida (kg)} = \frac{\text{Energía total (kWh)}}{\text{Energía potencial por kilo (kWh/kg)}} \quad (4).$$

Finalmente, los valores de biomasa se ajustan según una eficiencia hipotética ya que las reales dependen de muchos factores, como el tipo de tecnología, la calidad de la misma, el nivel de desarrollo de la planta, así como los sistemas y mecanismo propios y adaptados a las necesidades originarios que impulsaron el proyecto, como por ejemplo en el caso de los ingenios azucareros, sus proyectos de uso de biomasa para generación eléctrica están adaptados a los residuos de la caña de azúcar, pero, posiblemente no sean igual de efectivos si se utiliza otro tipo de residuo y así mismo con el arroz, o los que usan residuos sólidos de destino final, tendrán procesos que con ciertos residuos no son necesarios y viceversa.

Aun así, en la biomasa requerida para generar energía no es posible un aprovechamiento del 100% debido a pérdidas como calor residual y cenizas. Por ello, los valores se ajustan según tres niveles de eficiencia hipotéticos para tecnologías de biomasa: Cogeneración (30%), Ciclo Abierto (20%) y Termoquímico (18%). Su cálculo se hace utilizando la siguiente ecuación:

### **Ecuación 5**

*Biomasa calculada y ajustada a niveles de eficiencia*

$$\text{Biomasa residual ajustada por Tecnología (Kg)} = \frac{\text{Biomasa requerida (kg)}}{\text{Eficiencia de la tecnología}} \quad (5).$$

## **Resultados**

Los resultados, expresados en kilogramos de biomasa, muestran las cantidades necesarias para encender bombillas promedio teniendo en cuenta sus distintas clases, potencia y su vida útil, teniendo en cuenta las eficiencias hipotéticas de conversión energética. A modo de ejemplo, se analizan el peor y el menor desempeño conforme al PCI, en las bombillas LED. El raquis de banano y plátano, con menor desempeño calórico, requiere grandes cantidades de biomasa para

una bombilla LED promedio (7.7 W, 20,000 horas), se necesitan 73 kg con 100% de eficiencia, 244 kg al 30%, 366 kg al 20% y 407 kg al 18%. En contraste, el residuo tecnificado de porcino, con mayor poder calórico, requiere solo 21 kg con 100% de eficiencia y 73 kg al 30% para la misma bombilla. Estos resultados subrayan la importancia de optimizar la eficiencia en tecnologías de conversión para maximizar el aprovechamiento de la biomasa, en las figuras 68 y 69 se muestran los demás resultados para las otras bombillas y residuos.

### **Figura 68**

*Resultado Biomasa requeridas para encender una bombilla durante su vida útil Bombilla Incandescente y Halógena*

Biomásas requeridas para encender una bombilla en toda su vida útil en promedio.											
Sector:	Tipo de Biomasa:	Energía potencial por tipos de residuo 1 kg equivalente en kWh/kg:	Biomasa requerida para mantener una bombilla Incandescente (promedio) encendida durante sus 750 h de vida útil X 60W=45,000Wh=45kWh				Biomasa requerida para mantener una Incandescentes Halógenas (promedio) encendida durante sus 1000 h de vida útil X 43W=43,000Wh=43kWh				
			Biomasa requerida (Kg):	Tecnología de Cogeneración (Kg):	Tecnología de Ciclo Abierto (Kg):	Tecnología Termoquímica (Kg):	Biomasa requerida (Kg):	Tecnología de Cogeneración (Kg):	Tecnología de Ciclo Abierto (Kg):	Tecnología Termoquímica (Kg):	
Agrícola:	Palma de aceite	Cuesco: 4.63 kWh/kg	9,71	32,39	48,59	53,99	9,28	30,96	46,44	51,6	
		Fibra: 4.96 kWh/kg	9,07	30,24	45,36	50,4	8,66	28,9	43,35	48,16	
		Raquis: 4.67 kWh/kg	9,63	32,11	48,17	53,53	9,2	30,69	46,04	51,15	
	Caña de azúcar	Rac: 4.28 kWh/kg	10,51	35,04	52,57	58,41	10,04	33,49	50,23	55,82	
		Bagazo: 5.18 kWh/kg	8,68	28,95	43,43	48,26	8,3	27,67	41,51	46,12	
	Caña de panela	Bagazo: 5.18 kWh/kg	8,68	28,95	43,43	48,26	8,3	27,67	41,51	46,12	
		Hojas secas: 4.65 kWh/kg	9,67	32,25	48,38	53,76	9,24	30,82	46,24	51,37	
		Rac: 4.28 kWh/kg	10,51	35,04	52,57	58,41	10,04	33,49	50,23	55,82	
	Café	Pulpa: 4.95 kWh/kg	9,09	30,3	45,45	50,5	8,68	28,96	43,43	48,26	
		Cisno: 5.15 kWh/kg	8,73	29,12	43,68	48,54	8,34	27,83	41,75	46,39	
		Tallos: 5.09 kWh/kg	8,84	29,46	44,2	49,11	8,44	28,16	42,24	46,93	
	Maiz	Rastrojo: 3.98 kWh/kg	11,3	37,68	56,53	62,81	10,8	36,01	54,02	60,02	
		Tusa: 3.94 kWh/kg	11,42	38,07	57,1	63,45	10,9	36,38	54,57	60,63	
		Capacho: 4.43 kWh/kg	10,15	33,86	50,79	56,43	9,7	32,36	48,53	53,93	
		Hojas secas: 4.96 kWh/kg	9,07	30,24	45,36	50,4	8,66	28,9	43,35	48,16	
	Arroz	Tamo:3.64 kWh/kg	12,36	41,2	61,81	68,68	11,81	39,38	59,07	65,63	
		Cascarella: 4.18kWh/kg	10,76	35,88	53,82	59,8	10,28	34,29	51,44	57,15	
	Banano	Raquis: 2.10 kWh/kg	21,42	71,42	107,14	119,04	20,47	68,25	102,38	113,76	
		Vástago: 2.36 kWh/kg	19,06	63,55	95,33	105,93	18,22	60,73	91,1	101,22	
		Rechazo: 2.89 kWh/kg	15,57	51,9	77,85	86,5	14,87	49,6	74,39	82,66	
Plátano	Raquis: 2.10 kWh/kg	21,42	71,42	107,14	119,04	20,47	68,25	102,38	113,76		
	Vástago: 2.36 kWh/kg	19,06	63,55	95,33	105,93	18,22	60,73	91,1	101,22		
Promedio y/o conteo	8 tipos de biomasa.	22 tipos de residuo.	12,03	40,12	60,18	66,87	11,50	38,34	57,51	63,90	
Pecuario:	Avícola	Ponedoras: 2.61 kWh/kg	17,24	57,47	86,2	95,78	16,47	54,92	82,38	91,53	
		Engorde: 4.23 kWh/kg	10,63	35,46	53,19	59,1	10,16	33,88	50,83	56,47	
	Bovino	Leche: 3.25 kWh/kg	13,84	46,15	69,23	76,9	13,23	44,1	66,15	73,5	
		Doble propósito: 4.27 kWh/kg	10,53	35,12	52,69	58,54	10,07	33,57	50,35	55,95	
		Carne: 4.39 kWh/kg	10,25	34,16	51,25	56,94	9,79	32,65	49,97	54,42	
	Porcino	Tecnificado: 7.03 kWh/kg	6,4	21,33	32	35,56	6,11	20,39	30,58	33,98	
		No tecnificado: 4.84 kWh/kg	9,29	30,99	46,48	51,65	8,88	29,61	44,42	49,36	
Promedio y/o conteo	3 tipos de biomasa.	7 tipos de residuos	11,16857143	37,24	55,86285714	62,06714286	10,67285714	35,58857143	53,38285714	59,31571429	
Residuos Sólidos Urbanos RSOU:	Plaza mercado	Sólido orgánico: 4.38 kWh/kg	10,27	34,24	51,36	57,07	9,81	32,72	49,09	54,54	
	Centro Acopio	Sólido orgánico: 4.38 kWh/kg	10,27	34,24	51,36	57,07	9,81	32,72	49,09	54,54	
	Poda	Sólido orgánico: 4.38 kWh/kg	10,27	34,24	51,36	57,07	9,81	32,72	49,09	54,54	
Promedio y/o conteo	3 tipos de Biomasa	3 tipos de residuos.	10,27	34,24	51,36	57,07	9,81	32,72	49,09	54,54	

Fuente: Elaboración y cálculos propios, Microsoft Excel (Office 2021).

**Figura 69** Resultado Biomasa requeridas para encender una bombilla durante su vida útil  
Bombillas Fluorescentes y Led

Biomásas requeridas para encender una bombilla en toda su vida útil en promedio.											
Sector:	Tipo de Biomasa:	Energía potencial por tipos de residuo 1 kg equivalente en kWh/kg:	Biomasa requerida para mantener una bombilla Fluorescentes Compactas (promedio) encendida durante sus sus 10000 h de vida útil X 14.4 W=14400Wh=144kWh				Biomasa requerida para mantener una LED (promedio) encendida durante sus 20000 h de vida útil X 7.7 W=154,000Wh=154kWh				
			Biomasa requerida (Kg):	Tecnología de Cogeneración (Kg):	Tecnología de Ciclo Abierto (Kg):	Tecnología Termoquímica (Kg):	Biomasa requerida (Kg):	Tecnología de Cogeneración (Kg):	Tecnología de Ciclo Abierto (Kg):	Tecnología Termoquímica (Kg):	
			Agrícola	Palma de aceite	Cuesco: 4.63 kWh/kg	31,10	103,67	165,51	172,79	33,26	110,87
Fibra: 4.96 kWh/kg	29,03	96,77			145,16	161,29	31,05	103,49	155,24	172,49	
Raquis: 4.67 kWh/kg	30,84	102,78			154,18	171,31	32,98	109,92	164,88	183,20	
Caña de azúcar	Rac: 4.28 kWh/kg	33,64		112,15	168,22	186,92	35,98	119,94	179,91	199,90	
	Bagazo: 5.18 kWh/kg	27,80		92,66	139,00	154,44	29,73	99,10	148,65	165,17	
Caña de panela	Bagazo: 5.18 kWh/kg	27,80		92,66	139,00	154,44	29,73	99,10	148,65	165,17	
	Hojas secas: 4.65 kWh/kg	30,97		103,23	154,84	172,04	33,12	110,39	165,59	183,99	
	Rac: 4.28 kWh/kg	33,64		112,15	168,22	186,92	35,98	119,94	179,91	199,90	
Café	Pulpa: 4.95 kWh/kg	29,09		96,97	145,45	161,62	31,11	103,70	155,56	172,84	
	Cisco: 5.15 kWh/kg	27,96		93,20	139,81	155,34	29,90	99,68	149,51	166,13	
	Tallos: 5.09 kWh/kg	28,29		94,30	141,45	157,17	30,26	100,85	151,28	168,09	
Maíz	Rastrojo: 3.98 kWh/kg	36,18		120,60	180,90	201,01	38,69	128,98	193,47	214,96	
	Tusa: 3.94 kWh/kg	36,55		121,83	182,74	203,05	39,09	130,29	195,43	217,15	
	Capacho: 4.43 kWh/kg	32,51		108,35	162,53	180,59	34,76	115,88	173,81	193,13	
	Hojas secas: 4.96 kWh/kg	29,03		96,77	145,16	161,29	31,05	103,49	155,24	172,49	
Arroz	Tamo: 3.64 kWh/kg	39,56		131,87	197,80	219,78	42,31	141,03	211,54	235,04	
	Cascarilla: 4.18 kWh/kg	34,45		114,83	172,25	191,39	36,84	122,81	184,21	204,68	
Banano	Raquis: 2.10 kWh/kg	68,57		228,57	342,86	380,95	73,33	244,44	366,67	407,41	
	Vástago: 2.36 kWh/kg	61,02		203,39	305,08	338,98	65,25	217,51	326,27	362,52	
	Rechazo: 2.89 kWh/kg	49,83		166,09	249,13	276,82	53,29	177,62	266,44	296,04	
Plátano	Raquis: 2.10 kWh/kg	68,57		228,57	342,86	380,95	73,33	244,44	366,67	407,41	
	Vástago: 2.36 kWh/kg	61,02		203,39	305,08	338,98	65,25	217,51	326,27	362,52	
Promedio y/o conteo	8 tipos de biomasa.	22 tipos de residuo.		38,52	128,40	192,60	214,00	41,20	137,32	205,98	228,86
Pecuario	Avícola	Ponedoras: 2.61 kWh/kg		55,17	183,91	275,86	306,51	59,00	196,68	295,02	327,80
		Engorde: 4.23 kWh/kg	34,04	113,48	170,21	189,13	36,41	121,36	182,03	202,26	
	Bovino	Leche: 3.25 kWh/kg	44,31	147,69	221,54	246,15	47,38	157,95	236,92	263,25	
		Doble propósito: 4.27 kWh/kg	33,72	112,41	166,62	187,35	36,07	120,22	180,33	200,36	
		Carne: 4.39 kWh/kg	32,80	109,34	164,01	182,23	35,08	116,93	175,40	194,89	
	Porcino	Tecnificado: 7.03 kWh/kg	20,48	68,28	102,42	113,80	21,91	73,02	109,53	121,70	
No tecnificado: 4.84 kWh/kg		29,75	99,17	148,76	165,29	31,82	106,06	159,09	176,77		
Promedio y/o conteo	3 tipos de biomasa.	7 tipos de residuos	35,75	119,18	176,77	198,64	38,24	127,46	191,19	212,43	
Residuos Sólidos Urbanos RSOU	Plaza mercado	Sólido orgánico: 4.38 kWh/kg	32,88	109,59	164,38	182,65	35,16	117,20	175,80	195,33	
	Centro Acopio	Sólido orgánico: 4.38 kWh/kg	32,88	109,59	164,38	182,65	35,16	117,20	175,80	195,33	
	Poda	Sólido orgánico: 4.38 kWh/kg	32,88	109,59	164,38	182,65	35,16	117,20	175,80	195,33	
Promedio y/o conteo	3 tipos de Biomasa	3 tipos de residuos.	32,88	109,59	164,38	182,65	35,15	117,8	175,8	195,33	

Fuente: Elaboración y cálculos propios.