



HIDRÓGENO VERDE EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

Estatus actual,
potencialidades,
planificación y
regulación

Título: Hidrógeno Verde en América Latina y el Caribe. Estatus actual, potencialidades, planificación y regulación

Este documento ha sido publicado bajo la Presidencia Ejecutiva de Sergio Díaz-Granados y la Vicepresidencia Corporativa de Programación Estratégica de Christian Asinelli.

Autores

MRC Consultants and Transaction Advisers
PSR

Gerencia de infraestructura para el desarrollo
Dirección de Energía, Gas y Minería Estratégica

Gestión editorial
Dirección de Comunicación Estratégica

Edición y corrección
Rafael Osío Cabrices

Diseño gráfico
Cleiman

© CAF 2025

La información contenida en este informe refleja los datos disponibles al momento de su elaboración y no necesariamente representa la situación actual.

Las ideas y planteamientos contenidos en este documento son de exclusiva responsabilidad de los autores y no comprometen la posición oficial de CAF. Los términos empleados y la presentación de los datos que en ella aparecen no implican toma alguna de posición por parte de CAF en cuanto al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o regiones ni respecto de sus autoridades, fronteras o límites.

Acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional (CC-BY-NC-ND 4.0). Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



HIDRÓGENO VERDE EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE



ÍNDICE DE CONTENIDOS

01.

INTRODUCCIÓN

PAG / 18

02.

DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

PAG / 21

PANORAMA GLOBAL	22
Demanda actual	
Demanda futura: proyecciones	
EL MERCADO DE HIDRÓGENO EN ALC	36
Situación actual	
Desarrollo del mercado	
COSTO NIVELADO DE PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO VERDE (LCOH)	47
Mercado global	
Mercado en ALC	

03.

POTENCIALIDADES DE PRODUCCIÓN EN ALC

PAG / 55

ARGENTINA	60
Principales proyectos de producción de hidrógeno	
Proyectos de infraestructura y consumo de hidrógeno	
BRASIL	70
Principales proyectos de producción de hidrógeno	
Proyectos de infraestructura y consumo de hidrógeno	
CHILE	78
Principales proyectos de producción de hidrógeno	
Proyectos de infraestructura y consumo de hidrógeno	
COLOMBIA	90
Principales proyectos de producción de hidrógeno	
Proyectos de infraestructura y consumo de hidrógeno	
COSTA RICA	100
Principales proyectos de producción de hidrógeno	
Proyectos de infraestructura y consumo de hidrógeno	
TRINIDAD Y TOBAGO	106

04.

DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

PAG / 119

Principales proyectos de producción de hidrógeno	
Proyectos de infraestructura y consumo de hidrógeno	
URUGUAY	111
Principales proyectos de producción de hidrógeno	
Proyectos de infraestructura y consumo de hidrógeno	

05.

INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PARA EL DESARROLLO

PAG / 126

DESCARBONIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN ACTUAL Y TRANSICIÓN HACIA EL H ₂ V EN EL LARGO PLAZO	128
Argentina	
Barbados	
Bolivia	
Brasil	
Chile	
Colombia	
Costa Rica	
Ecuador	
El Salvador	
Jamaica	
México	
Panamá	
Paraguay	
Perú	
República Dominicana	
Trinidad y Tobago	
Uruguay	
Venezuela	
ACTUACIÓN FRENTE A LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL Y SOCIAL	194
Argentina	

06.

PROPUESTAS PARA EL H₂V DENTRO DEL PROCESO DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA JUSTA

PAG / 239

Brasil	
Chile	
Colombia	
Costa Rica	
Trinidad y Tobago	
Uruguay	
CertHiLAC	
REGLAS ECONÓMICAS PARA SU DESARROLLO (FINANCIAMIENTO, FACILITACIÓN DE CREACIÓN DE MERCADOS, Y OTROS PUNTOS)	212
Argentina	
Brasil	
Chile	
Colombia	
Costa Rica	
Trinidad y Tobago	
Uruguay	
ESQUEMAS DE APOYO AL DESARROLLO DE LA INDUSTRIA Y LA INNOVACIÓN	225
Argentina	
Brasil	
Chile	
Colombia	
Costa Rica	
Perú	
Trinidad y Tobago	
Uruguay	

TRANSICIÓN ENERGÉTICA JUSTA: CONTEXTO INTERNACIONAL	240
Argentina	
Brasil	
Chile	
Colombia	
Costa Rica	
Trinidad y Tobago	
Uruguay	
PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES	255

07.

BIBLIOGRAFÍA
PAG / 261

08.

GLOSARIO
PAG / 275

ÍNDICE DE FIGURAS, CUADROS Y TABLAS

Figura 1: Demanda de hidrógeno por sector y por región histórica y en el escenario de Emisiones Netas Cero para 2050, 2019-2030	23
Figura 2: Diferentes proyecciones de la demanda de hidrógeno en 2030 y 2050 según la IEA	27
Figura 3: Comparación de escenarios de demanda y producción de hidrógeno: IEA vs IRENA (2030 y 2050)	28
Figura 4: Capacidad de producción comprometida hasta 2030	30
Figura 5: Suministro actual y futuro de hidrógeno de bajo carbono	31
Figura 6: La demanda de hidrógeno varía ampliamente según el escenario	32
Figura 7: Demanda global de hidrógeno por sector y aplicación, Escenario de Emisiones Netas Cero	33
Figura 8: Comparación de las proyecciones de la demanda global de hidrógeno hacia 2050	34
Figura 9: Producción de hidrógeno en ALC por país y uso por sector industrial en 2022	37
Figura 10: Demanda y exportaciones de hidrógeno y combustibles derivados de hidrógeno por sector a nivel global y en ALC en Escenario APS	39
Figura 11: Demanda potencial de electricidad para la producción de hidrógeno electrolítico de proyectos anunciados en América Latina y el Caribe, 2030, y generación de electricidad, 2022	40
Figura 12: Exportación de H ₂ V y derivados de ALC	41

Figura 13: Comercio de hidrógeno de bajas emisiones por región importadora, basado en proyectos anunciados, objetivos de políticas y en el Escenario de Emisiones Netas Cero para 2050, 2030	42
Figura 14: Puntuación general del índice H2LAC en 2024	44
Figura 15: Evolución del índice H2LAC, 2021-2024	45
Figura 16: Composición del LCOH en 2030	48
Figura 17: LCOH en 2030 con base en diversas estimaciones	49
Figura 18: Evolución del LCOH, 2020-2050	50
Figura 19: LCOH para 2030	53
Figura 20: Proyecciones del LCOH para 2030 y 2050 en ALC	53
Figura 21: Visión general de la cantidad y la capacidad instalada de proyectos de hidrógeno en operación, en desarrollo y anunciados	60
Figura 22: Competitividad y potencial de producción de hidrógeno	61
Figura 23: Destinos locales del hidrógeno argentino producido	62
Figura 24: Producción y comercialización de hidrógeno en Argentina	63
Figura 25: Costos actuales (USD/kg) del hidrógeno en diferentes regiones de Argentina	64
Figura 26: Proyección de costos de H2 azul y H2 verde	65
Figura 27: Datos principales en Argentina	65

Figura 28: Proyectos de hidrógeno en Argentina	66
Figura 29: Proyecciones de producción de H2 en Brasil	71
Figura 30: Usos directos del hidrógeno en Brasil, en Mt, en los escenarios de neutralidad de carbono hasta 2050 proyectados para el país	72
Figura 31: Índice actual de LCOH de H ₂ V de Brasil	73
Figura 32: Datos principales en Brasil	73
Figura 33: Panorama de los proyectos de hidrógeno en Brasil	74
Figura 34: Proyectos de hidrógeno en operación en Brasil	75
Figura 35: Generación renovable de Chile	79
Figura 36: Proyecciones de mercados chilenos de H ₂ V y derivados	80
Figura 37: Desarrollo proyectado de aplicaciones del H ₂ V	81
Figura 38: Proyección de demanda por H ₂ V (ktonH2), según destino, en escenario consistente con el carbono neutralidad al 2050	82
Figura 39: Proyecciones de costo nivelado de H ₂ V (USD/kg H2)	83
Figura 40: Datos principales en Chile	84
Figura 41: Panorama de los proyectos de hidrógeno en Chile	85
Figura 42: Proyectos de hidrógeno en operación en Chile	86
Figura 43: Ocho potenciales hubs de producción y demanda de hidrógeno en la zona central de Chile	89
Figura 44: Metas de Colombia en materia de hidrógeno de bajas emisiones a 2030	92
Figura 45: Estimaciones de la demanda interna del hidrógeno en Colombia entre 2030 y 2050	93

Figura 46: Desarrollo de las aplicaciones de hidrógeno de bajas emisiones en Colombia	94
Figura 47: Proyección de costos de H2 verde por regiones, y del H2 azul y H2 gris en Colombia	95
Figura 48: Datos principales en Colombia	96
Figura 49: Proyectos de hidrógeno en Colombia	97
Figura 50: Demanda (2030 y 2050) del H ₂ V en Costa Rica	100
Figura 51: Potencial de producción de H ₂ V en Costa Rica	101
Figura 52: Formas de producción y costos de hidrógeno en Costa Rica	102
Figura 53: Datos principales en Costa Rica	103
Figura 54: Proyectos de hidrógeno en Costa Rica	104
Figura 55: Aplicación potencial del H ₂ V en T&T	107
Figura 56: Variación y promedio del LCOH para T&T	108
Figura 57: Datos principales en Trinidad y Tobago	109
Figura 58: Proyecto de hidrógeno en Trinidad y Tobago	109
Figura 59: Producción y comercialización de hidrógeno en Uruguay	113
Figura 60: Potencial de generación de renovables	114
Figura 61: Curva de costo de producción para hidrógeno (USD/kg H2) por región en Uruguay	115
Figura 62: Datos principales en Uruguay	116
Figura 63: Proyectos de hidrógeno en Uruguay	117
Figura 64: Proyección de producción de H ₂ V (en millones de toneladas) por país en 2030, 2040 y 2050, en el escenario Business as Usual	121

Figura 65: Proyección de producción de H₂V (en millones de toneladas) por país en 2030, 2040 y 2050, en el escenario de Transición Energética 121

Figura 66: Proyección de demanda eléctrica para la producción de H₂V en 2050 (en TWh) y representación de esa demanda en relación con la oferta actual de energía eléctrica de cada país en el escenario BaU 123

Figura 67: Proyección de producción de H₂V (en millones de toneladas) por país en 2030, 2040 y 2050, en el escenario de Transición Energética 123

Figura 68: H2LAC Index 2024 128

Tabla 1: Estado de situación de cada país 129

Tabla 2: Elementos de la ENH Argentina 132

Tabla 3: Directrices para el PNH2 de Brasil 141

Figura 69: Prioridades establecidas para el ciclo 2023 – 2025 del Plan Trienal 144

Tabla 4: Principios y principales objetivos para la Política Nacional de Hidrógeno de Bajas Emisiones de Brasil 146

Tabla 5: Definiciones de Hidrógeno Ley N° 14.948/2024 de Brasil 147

Tabla 6: Visión y Objetivos de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Chile 149

Tabla 7: Etapas de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Chile 150

Figura 70: Ventanas Temporales de Implementación del Plan de Acción Hidrógeno Verde 2023-2030 de Chile 154

Tabla 8: Pilares de la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia 155

Tabla 9: Períodos de la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia 157

Figura 71: Línea de tiempo de regulación en torno al hidrógeno verde en Costa Rica 161

Tabla 10: Componentes de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Costa Rica 2022 2050 162

Tabla 11: Metas a 2030 de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Costa Rica 2022-2050 165

Figura 72: Fases y metas de la Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde en Ecuador 167

Tabla 12: Acciones priorizadas en Normativa y Regulación, Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde en Ecuador 168

Figura 73: Riesgos asociados al despliegue del Hidrógeno Verde en Ecuador 171

Figura 74: Actividad E5. L.4. A.2 de la Política Energética Nacional de El Salvador 2020 2050 173

Figura 75: Actividad E5. L.5. A.2 de la Política Energética Nacional de El Salvador 2020-2050 173

Tabla 13: Elementos clave de la ENHIVE de Panamá 178

Tabla 14: Metas de la ENHIVE de Panamá 180

Tabla 15: Propuesta de valor de Trinidad y Tobago: aprovechamiento de la infraestructura existente 186

Tabla 16: Fases de la Hoja de Ruta del hidrógeno verde y derivados de Uruguay 190

Figura 76: Metas de la Hoja de Ruta del hidrógeno verde y derivados de Uruguay 191

Figura 77: Elementos clave y actividades de la Hoja de Ruta del hidrógeno verde y derivados de Uruguay 192

Figura 78: Impactos socioeconómicos y ambientales del desarrollo del sector hidrógeno verde en Uruguay 207

Tabla 17: Sistema de Certificación de CerHiLAC 211

Tabla 18: Acciones para el financiamiento y la creación de mercados en la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Costa Rica 223

Figura 79: Metas de empleo 2030 - 2050, ENH de Argentina 242

Tabla 19: Acciones para fortalecer las capacidades laborales y promoción del empleo en la ENH argentina 243

Tabla 20: Acciones para una Transición Energética Justa en la Hoja de Ruta del Hidrógeno de Colombia 251

Figura 80: Eje 2 - Acciones de Capacitación y Formación 253

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AL	América Latina
ALC	América Latina y el Caribe
ALK	Electrolizador alcalino
ANCAP	Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland
ANEEL	Agencia Nacional de Energía Eléctrica
ANP	Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles
APS	Escenario de Políticas Anunciadas
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BIDC	Barbados Investment and Development Corporation
CAMMESA	Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico (Argentina)
CAPEX	Gastos de Capital
CAREM	Reactor modular argentino
CCEE	Cámara de Comercialización de Electricidad
CCUS	Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono
CDN	Contribución Determinada a Nivel Nacional
CELA	Clean Energy Latin America
CEN	Coordinador Eléctrico Nacional
CNCE	Centro Nacional de Control de Energía
CNPE	Consejo Nacional de Política Energética
CO ₂	Dióxido de Carbono
CORFO	Corporación de Fomento de la Producción (Chile)
DCH	Dirección de Comercio e Hidrógeno
DE	Desarrollo Energético
DRI	Reducción Directa de Hierro
EAE	Evaluación Ambiental Estratégica

EC	El Caribe
EIA	U.S. Energy Information Administration
ENAP	Empresa Nacional de Petróleo (Chile)
ENH	Estrategia Nacional del Hidrógeno (Argentina)
ENHIVE	Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Panamá
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FENOGE	Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía
FFI	Fortescue Future Industries
FID	Decisión Final de Inversión
FNCE	Fuentes No Convencionales de Energía
FNCER	Fuentes No Convencionales de Energía Renovable
FODA	Análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas
FONHIDRO	Fondo Nacional de Fomento del Hidrógeno (Argentina)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GIZ	Agencia Alemana para la Cooperación Internacional
GNC	Gas Natural Comprimido
GW	Gigavatio
H ₂	Hidrógeno
H ₂ LAC	Índice del Hidrógeno para América Latina y el Caribe
H ₂ V	Hidrógeno Verde
HVO	Aceite Vegetal Hidrogenado
I+D	Investigación y Desarrollo
I+D+i	Investigación, Desarrollo e Innovación
ICCT	Consejo Internacional de Transporte Limpio
IEA	International Energy Agency (Agencia Internacional de Energía)
IPEA	Instituto de Investigaciones Económicas Aplicadas
IRA	Ley de Reducción de la Inflación
IRENA	Agencia Internacional de Energías Renovables
ISO/TC 197	Comité Técnico ISO para tecnologías de hidrógeno
kg	kilogramos
kton	mil toneladas
kWh	kilovatio-hora
LCOH	Nivel de Costo del Hidrógeno (Levelized Cost of Hydrogen)
MCTI	Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Brasil)
MDIC	Ministerio de Desarrollo, Industria y Comercio Exterior (Brasil)

MeOH	Metanol
MIEM	Ministerio de Industria, Energía y Minería (Uruguay)
MME	Ministerio de Minas y Energía (Brasil)
Mt	millones de toneladas
MW	megavatio
NH ₃	Amoníaco
NOA	Noroeste Argentino
NZE	Emisiones Netas Cero
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
ONS	Operador Nacional del Sistema Eléctrico
PEM	Electrolizador de Membrana de Intercambio Protónico
PHBC	Programa de Desarrollo de Hidrógeno Bajo en Emisiones de Carbono
PIB	Producto Interno Bruto
PNE 2050	Plan Nacional de Energía 2050
PNH2	Programa Nacional de Hidrógeno (Brasil)
PPA	Acuerdo de Compra de Energía (Power Purchase Agreement)
PtX	Power-to-X
RECOPE	Refinadora Costarricense de Petróleo
RED II y RED III	Directivas de Energías Renovables de la Unión Europea
RIGI	Régimen de Incentivo para Grandes Inversiones
RJ	Rio de Janeiro
SAF	Combustibles de Aviación Sostenible (Sustainable Aviation Fuels)
SBCH2	Sistema Brasileño de Certificación del Hidrógeno
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
SENER	Secretaría de Energía (México)
SIN	Sistema Interconectado Nacional
STEPS	Políticas Declaradas
T&T	Trinidad y Tobago
ton	toneladas
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética (Colombia)
USD	Dólares de Estados Unidos
UTE	Compañía Usinas y Transmisiones Eléctricas
WEF	Foro Económico Mundial
XM	Compañía Expertos en Mercados
ZPE	Zona de Procesamiento de Exportación

RESUMEN EJECUTIVO

América Latina y el Caribe (ALC) se ha posicionado como una región estratégica en el desarrollo del hidrógeno verde (H_2V) debido a su abundancia de recursos naturales renovables y a las proyecciones de un mercado energético en transformación. Este informe detalla el estado actual, las potencialidades de producción y las estrategias de planificación necesarias para consolidar ALC como un actor clave en la transición energética global.

El diagnóstico realizado en este estudio sobre la situación actual del desarrollo del hidrógeno verde revela un panorama dominado por la producción global de hidrógeno a partir de combustibles fósiles, con apenas un 1% derivado de fuentes de bajas emisiones. En 2023 la producción global alcanzó los 97 millones de toneladas, de las que 4 millones, equivalentes al 4% del total, se produjeron en ALC. El consumo de hidrógeno en la región se concentra en refinerías de petróleo y la industria química, particularmente en Trinidad y Tobago, Brasil y México, donde se emplea en la producción de amoníaco y metanol. Sin embargo, los países de la región han comenzado a implementar iniciativas significativas para transitar hacia tecnologías limpias que reduzcan las emisiones de carbono asociadas a su producción.

Se espera que la demanda global de hidrógeno se multiplique en las próximas décadas, para llegar a entre 150 y 430 millones de toneladas anuales en 2050, según cuál de los escenarios previstos se haga realidad. En este marco, el H_2V desempeñará un papel fundamental en la descarbonización de sectores como el transporte de larga distancia, la industria pesada y la generación de electricidad. Para ALC, esta transformación implica tanto una oportunidad como un desafío, pues requiere una rápida adopción de tecnologías avanzadas, un marco regulatorio sólido y una infraestructura adecuada para la producción y la distribución.

Paralelamente, el análisis de las potencialidades de producción destaca que la región cuenta con ventajas competitivas claras para el desarrollo del H_2V . Chile, Brasil, Uruguay y Argentina poseen estrategias nacionales que incluyen metas claras de producción, infraestructura y exportación. Chile, por ejemplo, aspira

Un enfoque clave en estas políticas es la descarbonización de los sectores productivos actuales mediante el reemplazo gradual del hidrógeno gris por H_2V . En Brasil y Chile se prioriza el uso del hidrógeno en la producción de amoníaco y metanol, mientras que en Uruguay y Argentina se promueve su integración en procesos industriales y en el transporte pesado.

a producir 160 millones de toneladas anuales para 2050, aprovechando su capacidad de generación solar y eólica. Asimismo, los recursos renovables de Brasil y Argentina, combinados con su infraestructura industrial, les otorgan una posición privilegiada en el mercado global emergente.

La identificación de distintos *hubs* estratégicos en la región subraya la importancia de una planificación integrada. Estos *hubs*, ubicados en países como Colombia, México, Trinidad y Tobago, Brasil y Chile, buscan optimizar la infraestructura compartida, promover la competitividad y facilitar la exportación de hidrógeno y sus derivados hacia mercados internacionales, principalmente Europa y Asia. La viabilidad económica de estos proyectos dependerá de acuerdos internacionales que garanticen la demanda y promuevan inversiones en tecnologías clave como electrolizadores y sistemas de almacenamiento.

Un punto a destacar es la planificación a corto, mediano y largo plazo, elemento esencial para que ALC capitalice sus recursos y potencialidades. En términos generales, en el corto plazo la región debe priorizar la creación de marcos regulatorios, incentivos financieros y estándares de certificación que aseguren la competitividad del H_2V en los mercados internacionales. A mediano plazo, será crucial fortalecer la infraestructura, garantizar el acceso a tecnologías avanzadas y promover la formación de talento calificado para operar en un sector en rápida expansión. A largo plazo, la región debe consolidar su capacidad exportadora,

integrando la producción de hidrógeno con la transición energética global y promoviendo una transición justa que genere empleo y fomente la inclusión social.

En términos de instrumentos de desarrollo, la región ha comenzado a implementar políticas públicas destinadas a fomentar la producción y el uso del H₂V. Sin embargo, estas acciones varían ampliamente entre países, lo que refleja distintas capacidades regulatorias y de planificación. Chile, Brasil, Uruguay, Colombia y Argentina se destacan por sus estrategias nacionales de hidrógeno, que incluyen objetivos de corto, mediano y largo plazo, junto con incentivos para la inversión y el desarrollo tecnológico. Estas estrategias buscan no sólo impulsar la producción nacional, sino también posicionar a la región como un exportador competitivo en mercados globales de H₂V.

Un enfoque clave en estas políticas es la descarbonización de los sectores productivos actuales mediante el reemplazo gradual del hidrógeno gris por H₂V. En Brasil y Chile se prioriza el uso del hidrógeno en la producción de amoníaco y metanol, mientras que en Uruguay y Argentina se promueve su integración en procesos industriales y en el transporte pesado. Además, se están desarrollando mecanismos regulatorios y financieros que incluyen subsidios, incentivos fiscales y financiamiento verde para reducir los costos iniciales de los proyectos de hidrógeno. En este contexto, los acuerdos internacionales desempeñan un papel esencial para garantizar la demanda y facilitar la creación de cadenas de suministro eficientes.

El desarrollo de un marco normativo unificado en la región también se ha identificado como una prioridad. Los estándares de certificación para garantizar la sostenibilidad del H₂V, así como los esquemas de certificación de bajas emisiones, son fundamentales para acceder a los mercados internacionales más exigentes. Iniciativas como CertHiLAC están trabajando en la creación de sistemas de certificación regionales que permitan medir la huella de carbono del hidrógeno producido, para alinearse con las regulaciones de la Unión Europea y otros grandes mercados.

Por otra parte, es preciso hacer énfasis en que la transición energética debe ser justa e inclusiva, de manera que se aborden las desigualdades sociales y económicas existentes en ALC. En esta línea, el desarrollo del sector de H₂V ofrece oportunidades significativas para la generación de empleo, la diversificación económica y la formación de capacidades laborales en

comunidades vulnerables. Países como Costa Rica y Colombia han integrado en sus estrategias la capacitación y el desarrollo de competencias específicas para trabajadores en el sector del hidrógeno, fomentando una fuerza laboral calificada que pueda adaptarse a las nuevas demandas del mercado energético.

La inclusión de perspectivas de género y el fortalecimiento del desarrollo comunitario también son elementos clave para garantizar una transición inclusiva. Programas como los desarrollados en Chile promueven la participación equitativa de las mujeres en los proyectos de H₂V, no sólo como trabajadoras sino también como líderes en el sector. Estas iniciativas reflejan un compromiso por integrar la igualdad de género en la transición energética, aprovechando el desarrollo del H₂V para impulsar cambios estructurales en las dinámicas laborales y sociales.

Finalmente, se subraya la importancia de adoptar un enfoque holístico en el diseño de políticas, que considere tanto los beneficios ambientales como los impactos sociales y económicos. La integración del H₂V en los planes de transición energética debe ser vista como una oportunidad para reducir las emisiones de carbono, pero también como un medio para fomentar el desarrollo sostenible, mejorar la competitividad industrial y generar beneficios tangibles para las comunidades locales.

La transición hacia una economía baja en carbono y la mitigación del cambio climático se han convertido en prioridades globales, lo que ha posicionado al hidrógeno como un recurso estratégico clave. Gracias a su versatilidad, el hidrógeno podría facilitar la descarbonización de sectores industriales donde es difícil reducir emisiones y del transporte de larga distancia, además de desempeñar un rol como medio de almacenamiento de energía a largo plazo en determinadas aplicaciones.

Actualmente, la gran mayoría del hidrógeno es producido a partir de fuentes fósiles, como el gas natural y el carbón. Por ello será necesario implementar métodos de producción de bajas emisiones, basados en biomasa y biocombustibles, y el uso de fuentes fósiles con captura y almacenamiento de carbono para que el hidrógeno desempeñe un papel relevante en la transición energética global.

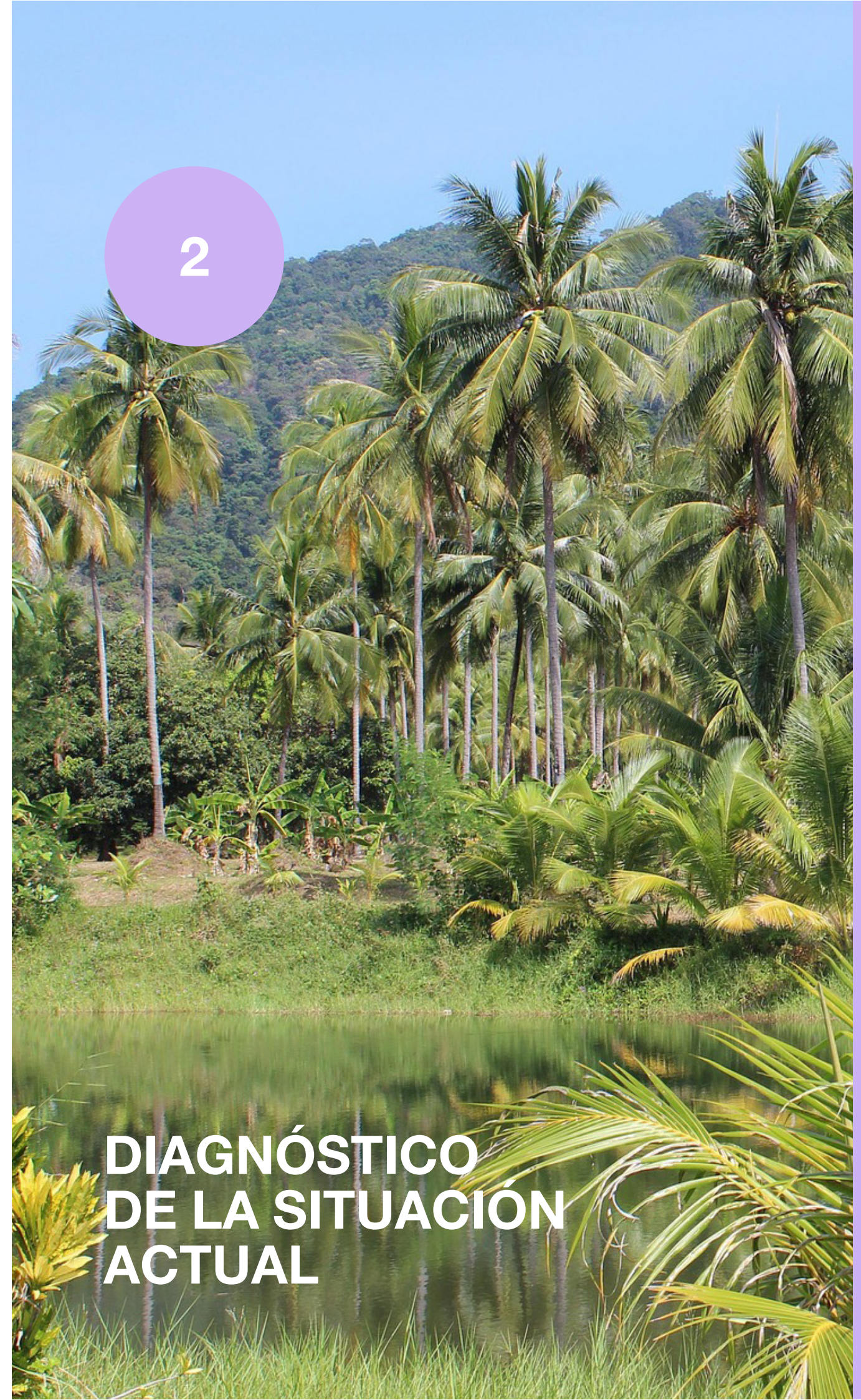
América Latina y el Caribe (ALC) cuenta con un potencial considerable para producir hidrógeno. La abundancia de recursos renovables en la región permite la producción de hidrógeno de bajo carbono, en especial H_2V , a costos competitivos. ALC está trabajando activamente en el desarrollo de un mercado de hidrógeno de bajas emisiones, con numerosos proyectos anunciados y una serie de políticas públicas y estrategias nacionales que respaldan el crecimiento de este mercado y sus derivados. De esta forma, ALC podría consolidarse como un importante productor de hidrógeno a nivel mundial, contribuyendo tanto a su propia descarbonización como a la reducción de emisiones en mercados externos.

Este informe ofrece una visión general del mercado actual y potencial del hidrógeno a nivel mundial hasta 2050, con un enfoque especial en ALC. El estudio explora la producción actual de hidrógeno, el precio del recurso divulgado en cada país y los principales sectores consumidores, además de analizar nuevas aplicaciones que podrían surgir en el contexto de la transición energética. Asimismo, el informe compara el desarrollo del mercado de hidrógeno de bajas emisiones con proyecciones de instituciones de referencia, abarcando tanto los proyectos en desarrollo como la evolución de los costos de producción.

Este diagnóstico de mercado se complementa con una evaluación específica para América Latina y el Caribe, en la cual se analiza en profundidad el desarrollo del mercado en los países más avanzados, destacando los principales proyectos anunciados, en desarrollo o en operación. Además, se examinan las políticas

públicas e instrumentos de incentivo implementados en distintos países de la región, detallando objetivos a corto, mediano y largo plazo, así como los instrumentos regulatorios para descarbonizar la demanda interna y expandir el uso del hidrógeno.

Finalmente, el informe presenta una perspectiva sobre el rol del hidrógeno renovable en los planes de transición energética de la ALC, explorando alternativas regulatorias que promuevan una transición justa e inclusiva en el sector. Este enfoque contempla el desarrollo industrial, la generación de empleo, la formación profesional y la inclusión de perspectivas de género. Al resaltar el potencial de la región para posicionarse como un proveedor competitivo de hidrógeno limpio, el estudio ofrece aportes valiosos para integrar el hidrógeno renovable en las estrategias de transición energética justa, al aprovechar las oportunidades únicas que ofrecen la demografía y el territorio de ALC.



DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Este capítulo abordará la evaluación de la situación actual del hidrógeno en América Latina y el Caribe (ALC), es decir, cómo se produce y utiliza el hidrógeno, actualmente en su mayoría derivado de combustibles fósiles, y cuáles son las perspectivas para la producción y el uso de hidrógeno limpio en el futuro en la región. Para ello, es necesario analizar el mercado de forma integral, comenzando con una evaluación global que permita identificar el potencial de desarrollo del mercado en ALC. Adicionalmente, se llevará a cabo un análisis del costo actual de producción de H₂V, acompañado de una proyección de su evolución futura.

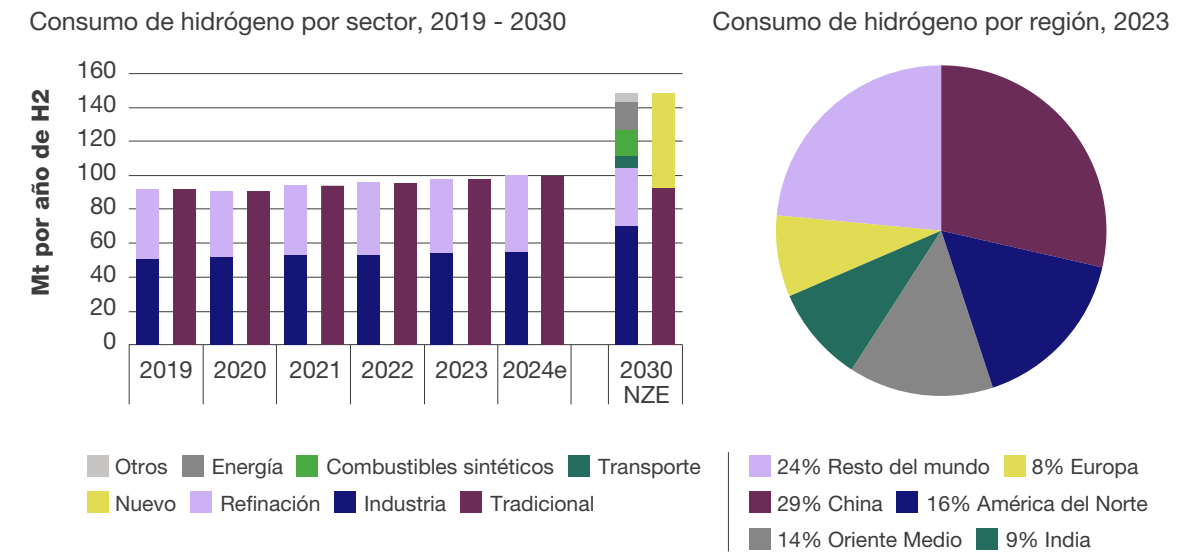
PANORAMA GLOBAL

● Demanda actual

La producción y el uso global de hidrógeno alcanzaron los 97 millones de toneladas en 2023, según la Agencia Internacional de Energía, IEA (IEA, 2024a), con un crecimiento de 2,5% en comparación con el año anterior. China es responsable por el mayor consumo del producto (29%), seguido de América del Norte (16%) y del Oriente Medio (14%). El consumo de hidrógeno en ALC fue de apenas 4 millones de toneladas, cerca del 4% del total mundial.

FIGURA 1:

Demanda de hidrógeno por sector y por región, histórica y en el escenario de Emisiones Netas Cero para 2050, 2019-2030



Fuente: IEA, 2024a

Actualmente, la demanda global de hidrógeno se concentra principalmente en la refinación de petróleo (43 Mt) y en usos industriales (54 Mt). En las refinerías, aproximadamente el 80% del hidrógeno es producido en las propias instalaciones, con un 45% proveniente de producción dedicada de hidrógeno y el resto generado como subproducto de otras operaciones, como el proceso de *cracking* en combustibles líquidos (gasolina y diésel). El 20% restante fue hidrógeno comercial, generalmente adquirido de plantas cercanas o incluso dentro de la misma refinería, pero operadas por terceros. Este hidrógeno comercial es mayoritariamente generado a partir de combustibles fósiles sin captura de carbono. En 2023, menos del 1% del hidrógeno empleado en refinerías se originó a partir de tecnologías de bajas emisiones. En 2030, bajo el escenario de Emisiones Netas Cero (NZE), que se explica poco más adelante, se proyecta que la demanda de hidrógeno en refinerías disminuya ligeramente a 35 Mt, como resultado de una reducción en la demanda de derivados del petróleo.

En el sector industrial, el hidrógeno desempeña un papel central en tres aplicaciones principales: la producción de amoníaco, que representa el 60% del consumo total; la producción de metanol, con un 30%; y la reducción directa

de hierro (DRI) en la industria siderúrgica, que consume el 10% restante. Casi todo este hidrógeno proviene de combustibles fósiles sin captura de carbono y se produce en las mismas instalaciones donde se utiliza. Aunque la captura de carbono es común en algunos subsectores industriales, la mayor parte del CO₂ capturado se utiliza para otros fines, como la producción de urea, y finalmente se libera. Sólo unos pocos proyectos almacenan el CO₂ bajo tierra¹.

En el caso del amoníaco, el hidrógeno es un insumo esencial para la fabricación de fertilizantes, un mercado cuya demanda se proyecta que continúe creciendo de manera sostenida debido al aumento global de la población y la necesidad de una producción agrícola más eficiente. En cuanto al metanol, se emplea en la fabricación de productos químicos y como base para combustibles alternativos, con estimaciones que sugieren un aumento significativo de su consumo para 2050, impulsado por la transición hacia soluciones más sostenibles. Finalmente, la reducción directa de hierro es una tecnología clave para la descarbonización del sector siderúrgico, que se espera registre un crecimiento acelerado en las próximas décadas debido a las políticas climáticas y las inversiones en tecnologías de bajas emisiones. A causa de estos factores, según las proyecciones para 2030 que se muestran en la Figura 1, la demanda industrial de hidrógeno crecerá a 70 Mt.

Fuera de estos usos predominantes, la adopción de hidrógeno en nuevas aplicaciones clave para la transición energética –como la industria pesada, el transporte de larga distancia, la producción de combustibles sintéticos y la generación y almacenamiento de electricidad– sigue siendo mínima, representando menos del 1% de la demanda mundial. En 2030, se espera que estas nuevas aplicaciones contribuyan con un consumo adicional de aproximadamente 45 Mt, distribuidos entre transporte (aproximadamente 5 Mt), generación de energía (20 Mt), combustibles sintéticos (15 Mt) y otros usos en aproximadamente 5 Mt. Este crecimiento refuerza el papel del hidrógeno en la transición energética, ampliando su alcance más allá de las aplicaciones tradicionales.

¹ En el documento *Global Hydrogen Review 2024* (IEA, 2024a), se destacan proyectos de almacenamiento de carbono que utilizan formaciones geológicas subterráneas. Uno de ellos es el proyecto Quest, ubicado en Canadá, que captura aproximadamente 1 millón de toneladas de CO₂ por año desde una instalación de producción de hidrógeno, almacenándolo de forma segura bajo tierra. Asimismo, el proyecto Polaris, liderado por Shell y también en Canadá, planea capturar 650 kt de CO₂ anualmente a partir de 2028, para ser almacenados en el Atlas Carbon Storage Hub como parte de una estrategia integrada de descarbonización.

La producción global de hidrógeno sigue dominada por el uso de combustibles fósiles sin mitigación. En 2022, el gas natural sin captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) representó aproximadamente 64% de la producción mundial, mientras que el carbón sin mitigación, mayormente en China, contribuyó con el 20%. El hidrógeno producido como subproducto, generado en refinerías y la industria petroquímica durante el reformado de combustibles líquidos, representó el 15% de la producción global y se utilizó para otros procesos de refinación y conversión.

Según la base de datos de proyectos de hidrógeno de la IEA (IEA, 2024b), actualizada por última vez en octubre de 2024, la producción actual de hidrógeno de bajas emisiones es de aproximadamente 0,8 Mt, lo que representa apenas el 0,8% de la producción global. La mayor parte de esta producción proviene de combustibles fósiles con CCUS, mientras que la producción de hidrógeno mediante electrólisis del agua sigue siendo minoritaria, representando el 29% del total.

• Demanda futura: proyecciones

La IEA y la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) presentan proyecciones detalladas sobre la demanda global de hidrógeno y la producción global de hidrógeno, respectivamente, mostrando coincidencias en la tendencia de crecimiento acelerado, aunque con matices en los supuestos de implementación y adopción tecnológica hacia 2030 y 2050.

La IEA examina tres escenarios para evaluar cómo diferentes políticas, compromisos y tecnologías impactarán el futuro energético global:

- **Emisiones Netas Cero (NZE):** establece una vía para limitar el calentamiento global a 1,5°C
- **Compromisos Anunciados (APS):** supone que todos los objetivos climáticos se cumplen
- **Políticas Declaradas (STEPS):** refleja las políticas actuales.

En el Escenario NZE (IEA, 2023b), el hidrógeno de bajas emisiones desempeñará un papel clave en la reducción de gases de efecto invernadero (GEI) para limitar el calentamiento global a 1,5°C, especialmente en sectores difíciles de

descarbonizar como la industria pesada y el transporte de larga distancia. Este escenario proyecta que el hidrógeno limpio será responsable del 4% de la reducción global de emisiones para 2050. La demanda de hidrógeno aumentará drásticamente, pasando de los niveles actuales a 150 Mton H₂/año en 2030 y alcanzando los 430 Mton H₂/año en 2050, lo que representa un crecimiento de más de cuatro veces. Para entonces, se estima que el 98% de esta demanda deberá provenir de hidrógeno de bajas emisiones. El 78% de la producción procederá de electricidad renovable, mediante tecnologías de electrólisis, mientras que el 22% restante dependerá de combustibles fósiles combinados con tecnologías de CCUS.

Para 2050, el uso del hidrógeno deberá distribuirse principalmente entre el transporte, que representará el 45% de la demanda, incluidos los combustibles derivados del hidrógeno, y el sector industrial, que utilizará el 32%. La generación de electricidad consumirá un 17% del hidrógeno, mientras que el sector de refinación sólo representará un 2% del total.

Este crecimiento de la demanda de hidrógeno está impulsado por la expansión del uso de tecnologías como la electrólisis alcalina, reconocida por su bajo costo y alta eficiencia en aplicaciones a gran escala, y la PEM (*Proton Exchange Membrane*), que ofrece flexibilidad para manejar la intermitencia de fuentes renovables. Además, tecnologías emergentes como la electrólisis de óxido sólido (SOEC) están en desarrollo, con un potencial prometedor en procesos industriales de alta temperatura.

El almacenamiento y el transporte de hidrógeno también desempeñarán un papel clave en la cadena de valor global. Según la IEA, el hidrógeno líquido almacenado a temperaturas criogénicas y los portadores químicos, como el amoníaco y el metanol, son alternativas tecnológicas que reducirán las barreras logísticas y facilitarán el transporte seguro y eficiente de grandes volúmenes de hidrógeno.

En el escenario STEPS², la producción mundial de hidrógeno aumenta a 110 Mt en 2030 y 140 Mt en 2050, con el hidrógeno de bajas emisiones representando apenas el 6% del total en 2030 y el 22% en 2050. En el escenario APS, la

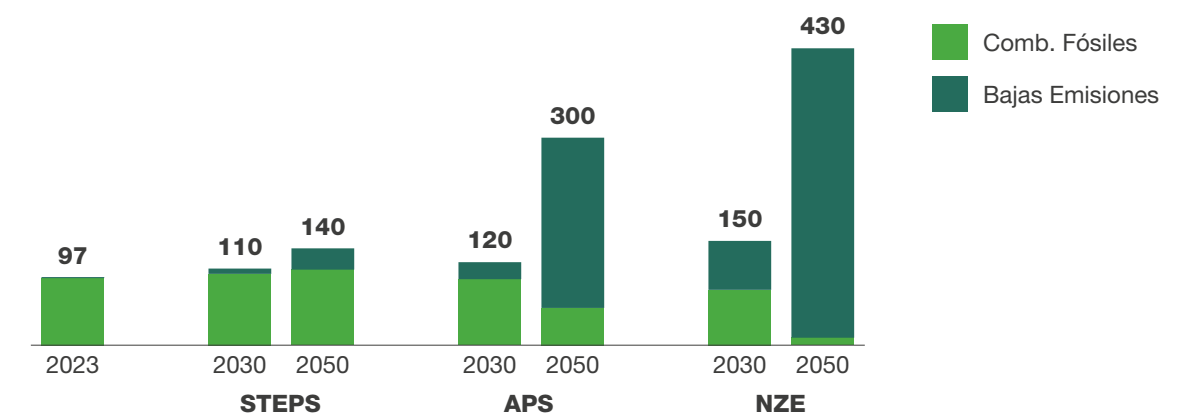
2. El Escenario de Políticas Declaradas (STEPS) está diseñado para brindar una idea de la dirección predominante de la progresión del sistema energético, basándose en una revisión detallada del panorama de políticas actuales.

producción mundial de hidrógeno alcanza alrededor de 120 Mt en 2030 y 300 Mt en 2050, y el hidrógeno de bajas emisiones representa el 21% del total en 2030 y el 82% en 2050 (IEA, 2024). Ambos escenarios quedan muy por debajo de lo que se requiere en el Escenario NZEF.

FIGURA 2:

Diferentes proyecciones de la demanda de hidrógeno en 2030 y 2050 según la IEA

Futura Demanda de Hidrógeno por Escenario (Mt/año)



Fuente: elaboración propia, con base en datos de IEA, 2024)

La IRENA, en su informe *World Energy Transitions Outlook 2024* (IRENA, 2024a), presenta dos escenarios principales para el desarrollo de la producción global de hidrógeno hacia 2030 y 2050: el *Planned Energy Scenario* (PES) y el 1.5°C Scenario. Ambos reflejan diferentes grados de ambición en la implementación de políticas, tecnologías y estrategias globales, pero coinciden en el papel esencial del hidrógeno para la descarbonización, especialmente en sectores difíciles de electrificar como el transporte marítimo, la aviación y el de procesos industriales.

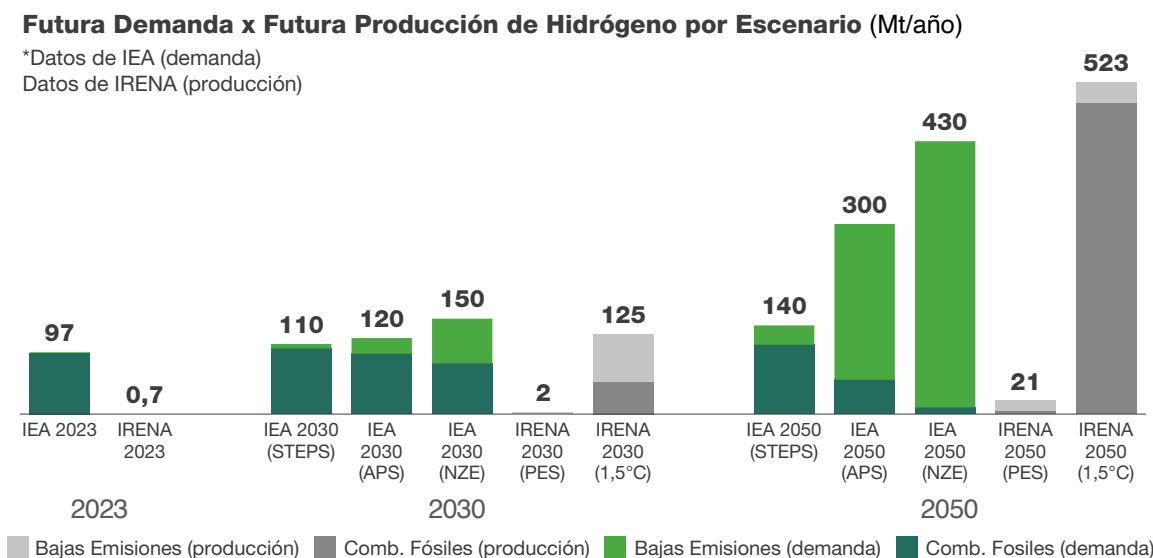
En el PES, que refleja políticas actuales y metas declaradas, la producción global de hidrógeno limpio crecerá a 2 Mt en 2030 y alcanzará 21 Mt en 2050. Este escenario asume un desarrollo más gradual, limitado por el ritmo actual de inversión e infraestructura, con una implementación tecnológica que aún depende de incentivos robustos y planes concretos de largo plazo.

Por otro lado, el Escenario 1,5°C, diseñado para alcanzar las metas del Acuerdo de París y limitar el calentamiento global a 1,5° C, proyecta una expansión drástica en la producción de hidrógeno limpio: a 125 Mt en 2030 y a 523 Mt en 2050. Este escenario anticipa que cerca del 40% del hidrógeno producido en 2030 provendrá de fuentes renovables, cifra que crecerá a 94% en 2050, consolidando al hidrógeno verde como la tecnología predominante.

La Figura 3 compara los escenarios de demanda de hidrógeno de la IEA (STEPS, APS, NZE) y los escenarios de producción de hidrógeno de la IRENA (PES y 1,5°C). Se destaca el crecimiento significativo en el escenario 1,5°C de la IRENA, con una producción que alcanza los 523 Mt en 2050.

FIGURA 3:

Comparación de escenarios de demanda y producción de hidrógeno: IEA vs IRENA (2030 y 2050)



Fuente: elaboración propia, con base en datos de IEA, 2023b e IRENA, 2024a

El Escenario de 1,5°C también destaca la necesidad urgente de expandir la infraestructura global de producción y transporte de hidrógeno. La capacidad de electrolizadores deberá crecer de 2,9 GW en 2023 a 470 GW en 2030 y alcanzar 5.470 GW en 2050, un aumento sin precedentes que exigirá

inversiones significativas y una planificación integrada en la cadena de suministro. Además, la electricidad necesaria para la producción de hidrógeno verde representará aproximadamente el 6% de la generación eléctrica mundial en 2030 y aumentará hasta 28% en 2050, impulsando la demanda de energía renovable en todo el mundo.

Por otro lado, la rápida expansión de la industria dependerá de la implementación de políticas públicas robustas y de la reducción continua de los costos de producción del hidrógeno verde. La expectativa sobre el aumento de la demanda es evidente en el modo en que han ido avanzando políticas públicas en diversos países con miras al desarrollo de una economía del hidrógeno. Un análisis reciente de mayo de 2024, realizado por la Universidad de Columbia (Center on Global Energy Policy, 2024), revela que 61 países han publicado estrategias nacionales u hojas de ruta para el hidrógeno, todos con planes de expandir la producción de hidrógeno renovable. Casi la totalidad de ellos menciona el uso de electricidad renovable, como la solar y la eólica, para la producción de H₂V mediante la electrólisis del agua. Según el mismo estudio, 42 de los 61 países aspiran a convertirse en exportadores, mientras que sólo 12 –incluyendo Alemania, los Países Bajos, Japón, Corea del Sur y Singapur– planean importar hidrógeno en el futuro.

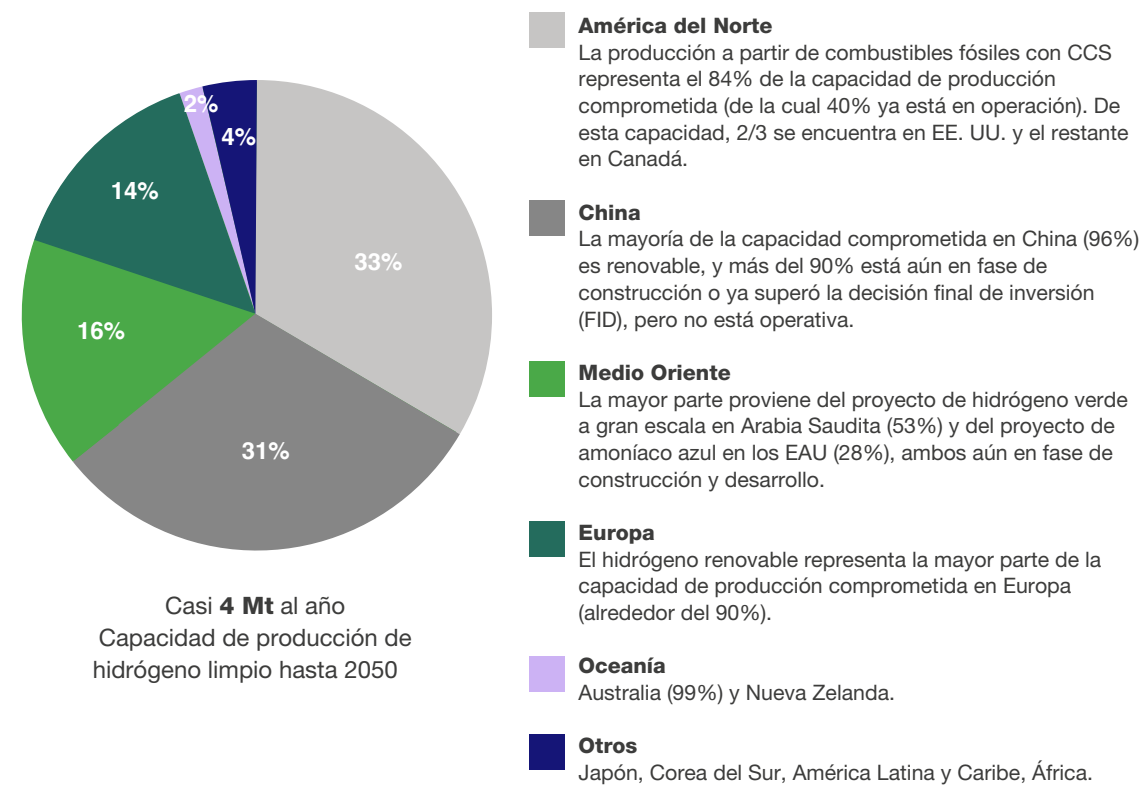
En este contexto, la cantidad de proyectos de hidrógeno de bajas emisiones anunciados en todo el mundo ha aumentado significativamente en los últimos años, impulsados por el potencial del hidrógeno de reducir emisiones y el creciente interés de los países en desarrollar economías limpias. Según el Global Hydrogen Review de la IEA de 2024, si se concretan todos los proyectos anunciados hasta el momento de elaboración del informe, se alcanzaría aproximadamente el 70% de la capacidad necesaria para cumplir con el escenario de cero emisiones netas para 2030.

Sin embargo, la gran mayoría de los proyectos anunciados se encuentra aún en etapas muy tempranas de planificación, como los estudios de viabilidad, o son simplemente conceptos de proyectos que no han recibido actualizaciones significativas desde su anuncio. Según la IEA, de una capacidad de producción anunciada de aproximadamente 49 Mton H₂/año, sólo los proyectos que suman una capacidad de aproximadamente 4 Mton H₂/año han superado la Decisión Final de Inversión (FID), están en construcción o ya están operativos (IEA, 2024b).

Esto significa que apenas el 7% de la capacidad total anunciada tiene altas probabilidades de concretarse.

De la capacidad comprometida, la mayor parte se encuentra en América del Norte (33%), seguida de China (32%) y el Medio Oriente (16%). Además, el 55% de esta capacidad está destinada a la producción de hidrógeno renovable, mientras que el resto proviene de combustibles fósiles con CCUS.

FIGURA 4:
Capacidad de producción comprometida hasta 2030



Fuente: elaboración propia, según la base de datos de proyectos de hidrógeno de bajo carbono de IEA, 2024b

Sin embargo, para 2030 la capacidad de producción de hidrógeno de bajo carbono debe superar lo que hasta ahora se ha confirmado. Varios proyectos están en etapas avanzadas de planificación y se espera que alcancen pronto la FID. De hecho, algunos de los proyectos de mayor envergadura ya han logrado esta decisión desde la última actualización de la base de datos de la IEA, por lo

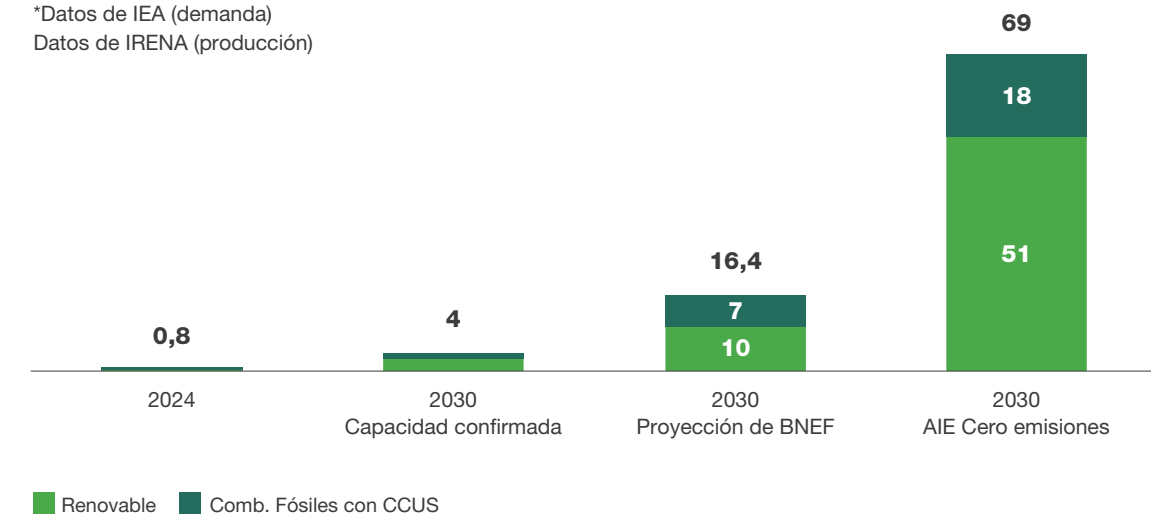
que no fueron considerados para calcular la cifra actual de 4 Mton H₂/año.

Una proyección del centro de investigación Bloomberg NEF (BNEF) prevé una producción de 16,4 Mton H₂/año de hidrógeno de bajo carbono para 2030, impulsada por políticas favorables y una creciente cartera de proyectos en desarrollo (BNEF, 2024). Como se observa en la Figura 5, aunque esta cifra representa una producción cuatro veces mayor que la capacidad confirmada actualmente, sigue siendo menos de una cuarta parte de la demanda necesaria en el escenario de Cero Emisiones Netas de la IEA (IEA, 2023b). Según la proyección, el suministro se concentrará en EE.UU. (37%), Europa (24%) y China (19%).

FIGURA 5:
Suministro actual y futuro de hidrógeno de bajo carbono

Futura Demanda x Futura Producción de Hidrógeno por Escenario (Mt/año)

*Datos de IEA (demanda)
Datos de IRENA (producción)



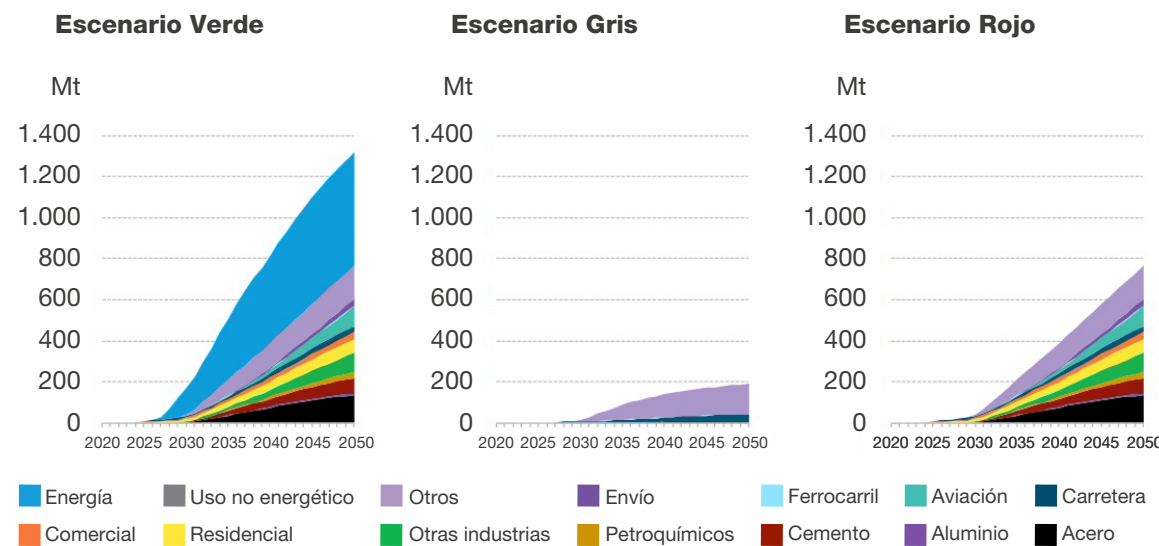
Fuente: elaboración propia, con base en IEA, 2023b y BNEF, 2024

A pesar de los avances tecnológicos, persisten barreras significativas para la adopción masiva del hidrógeno limpio, como la falta de políticas robustas, de infraestructura adecuada y de compromisos sólidos tanto por parte de la industria como de los gobiernos. Estas limitaciones han provocado retrasos en la ejecución de proyectos en comparación con las proyecciones anteriores.

En este contexto, el BNEF presenta tres escenarios en la Figura 6 para la demanda global de hidrógeno hacia 2050, que reflejan diferentes niveles de ambición y desarrollo tecnológico (BNEF, 2021). El Escenario Verde representa la mayor adopción del hidrógeno verde producido con electricidad renovable, con una demanda superior a 1.200 Mt. El Escenario Gris, más limitado, estima apenas 200 Mt, predominando el hidrógeno fósil debido a la falta de políticas y de incentivos. Finalmente, el Escenario Rojo propone un crecimiento intermedio, aproximadamente 750 Mt, impulsado principalmente por la producción de hidrógeno a partir de energía nuclear y su uso en sectores como la aviación y el transporte pesado.

FIGURA 6:

La demanda de hidrógeno varía ampliamente según el escenario



Fuente: BNEF, 2021

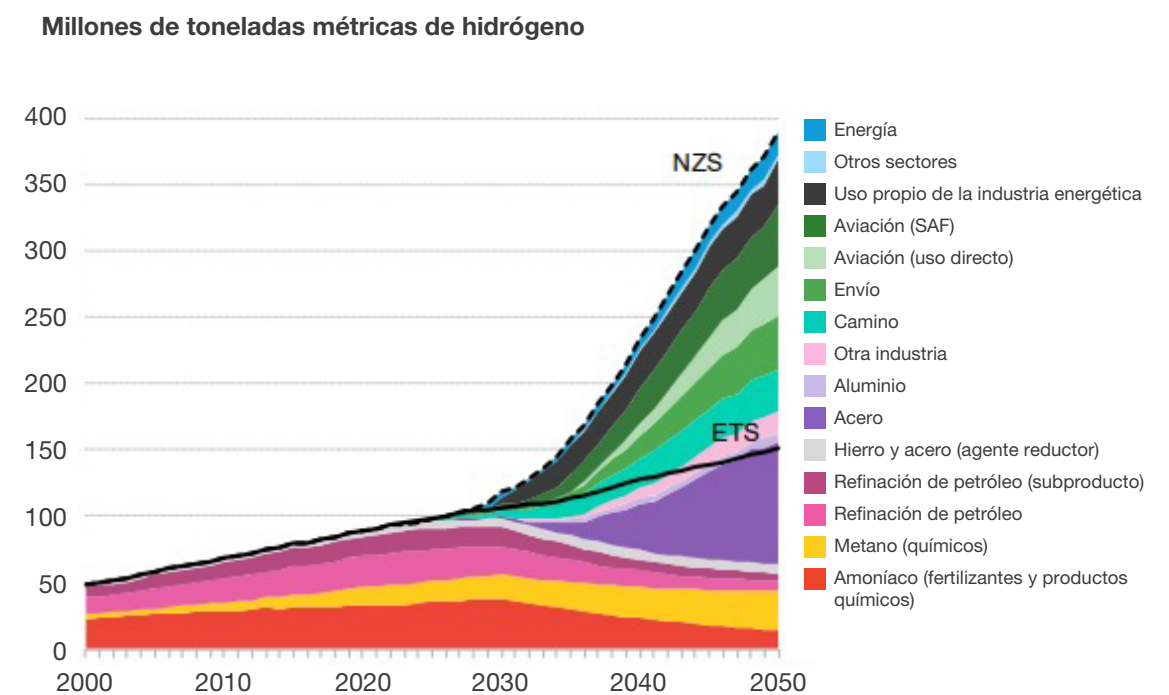
La Figura 7 presenta una proyección detallada de la demanda global de hidrógeno por sector y aplicación en el Net Zero Scenario (NZS) y el Economic Transition Scenario (ETS), elaborados en el informe más reciente de BNEF (BNEF, 2024). El escenario NZS, alineado con la meta de emisiones netas cero para 2050, muestra un crecimiento exponencial de la demanda, que superará los 400 millones de toneladas (Mt) hacia mediados de siglo. Este aumento estará

impulsado por sectores difíciles de descarbonizar, como la aviación (combustibles sostenibles y uso directo), el transporte marítimo, la generación de energía, la producción de acero y la industria química (metanol y amoníaco).

En contraste, el Economic Transition Scenario (ETS) refleja un desarrollo más moderado, alcanzando aproximadamente 150 Mt en 2050, con avances impulsados principalmente por la viabilidad económica de las tecnologías existentes, sin la implementación de políticas climáticas adicionales. En este escenario, la adopción del hidrógeno queda limitada a aplicaciones menos intensivas y a sectores selectos, como la industria y el transporte pesado.

FIGURA 7:

Demanda global de hidrógeno por sector y aplicación, Escenario de Emisiones Netas Cero



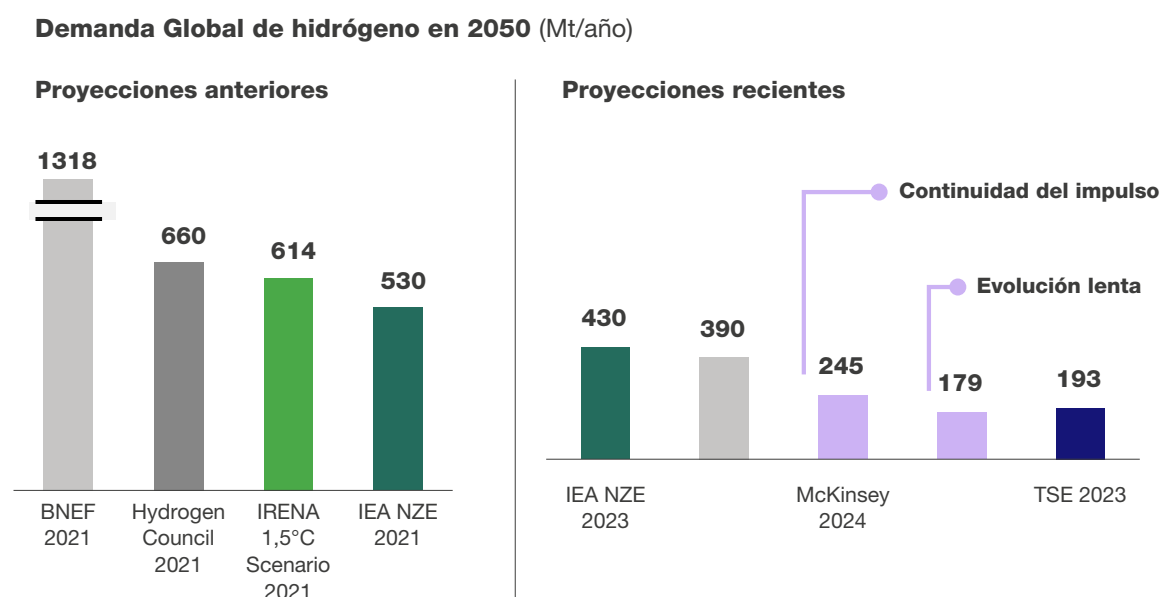
Fuente: BNEF, 2024

El informe *Global Energy Perspective* de McKinsey (2024) presenta diferentes proyecciones de demanda de hidrógeno hacia 2050, de acuerdo con el ritmo de la transición energética y de la implementación de políticas. Las estimaciones

oscilan entre 125 Mt/año y 585 Mt/año, reflejando escenarios que van desde un progreso moderado hasta una adopción acelerada del hidrógeno como vector energético clave (McKinsey & Company, 2024).

Si bien existen múltiples escenarios proyectados para la demanda global de hidrógeno hacia 2050, la Figura 8 muestra únicamente una selección específica de estimaciones, tanto anteriores como recientes. Estos escenarios fueron considerados por su relevancia en la discusión actual y por su reconocimiento dentro de la comunidad energética. Destacan, por ejemplo, las proyecciones de la IEA, BloombergNEF, McKinsey y el Hydrogen Council, que representan enfoques distintos en cuanto al ritmo de adopción del hidrógeno bajo en emisiones y a las políticas de transición energética. La visión más cautelosa respecto a la adopción del hidrógeno bajo en emisiones ha llevado a una reciente revisión a la baja de las proyecciones de demanda global de hidrógeno para 2050, incluidas las del Escenario de Cero Emisiones Netas (NZE) de la IEA.

FIGURA 8:
Comparación de las proyecciones de la demanda global de hidrógeno hacia 2050



Fuente: elaboración propia, con base en datos de diferentes fuentes: BNEF, 2021; Hydrogen Council, 2021; IRENA, 2021; IEA, 2021; IEA, 2023a; BNEF, 2024; McKinsey & Company, 2024; Thunder Said Energy, s.d.

El informe presenta cuatro escenarios diferentes, que reflejan el ritmo del progreso tecnológico, el nivel de implementación de políticas y las posibles limitaciones en el despliegue de energías renovables: un escenario para limitar el calentamiento global a 1,5°C (similar a la hoja de ruta de la IEA) y tres escenarios de desarrollo ascendente.

La más reciente proyección de septiembre de 2024 del centro de investigación McKinsey & Company estima una de las cifras más bajas, entre un 10% y un 25% inferior a lo anticipado en la versión anterior del informe (McKinsey & Company, 2024). El crecimiento proyectado ha sido revisado a la baja debido a aumentos significativos en los costos, que han afectado desproporcionadamente al hidrógeno, junto con la continua incertidumbre regulatoria. Se prevé que la demanda será menor de lo esperado en varios sectores, particularmente en el transporte por carretera y en los edificios.

El informe presenta cuatro escenarios diferentes, que reflejan el ritmo del progreso tecnológico, el nivel de implementación de políticas y las posibles limitaciones en el despliegue de energías renovables: un escenario para limitar el calentamiento global a 1,5°C (similar a la hoja de ruta de la IEA) y tres escenarios de desarrollo ascendente. Los dos escenarios más pesimistas son:

- **Continuidad del impulso:** En este escenario, las naciones equilibran su atención en la sostenibilidad con la asequibilidad y la seguridad del suministro energético, priorizando a menudo la economía. A pesar de las mejoras tecnológicas, las restricciones en la adopción de tecnologías de bajo carbono generan un despliegue desigual. Este escenario no alcanzaría los objetivos del Acuerdo de París, provocando efectos adversos en lo social, ambiental y económico (aumento proyectado de temperatura global para 2050: ~2,2°C).

- **Evolución lenta:** Aquí, la atención se centra en la asequibilidad energética y la seguridad del suministro, relegando la sostenibilidad a un segundo plano. Esta respuesta fragmentada reduce las inversiones en tecnologías de bajo carbono y disminuye los precios del CO₂, resultando en impactos negativos. Algunos países avanzan en sus objetivos de descarbonización, mientras que otros se quedan rezagados. Este escenario también fallaría en cumplir los objetivos del Acuerdo de París (aumento proyectado de temperatura global para 2050: ~2,6 °C).

EL MERCADO DE HIDRÓGENO EN ALC

• Situación actual

Según datos de la IEA, el consumo de hidrógeno en América Latina y el Caribe (ALC) hoy se concentra en las cinco economías más grandes (Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México), así como en Trinidad y Tobago (IEA, 2024a). En 2023, el consumo total de hidrógeno en la región fue de 4 Mt de hidrógeno, aproximadamente el 4% del total global. Casi el 90% de este hidrógeno se produjo a partir de la reforma de vapor del gas natural³.

Trinidad y Tobago es el mayor consumidor de hidrógeno en la región: su industria química utiliza hidrógeno para producir grandes volúmenes de amoníaco y metanol para exportación.

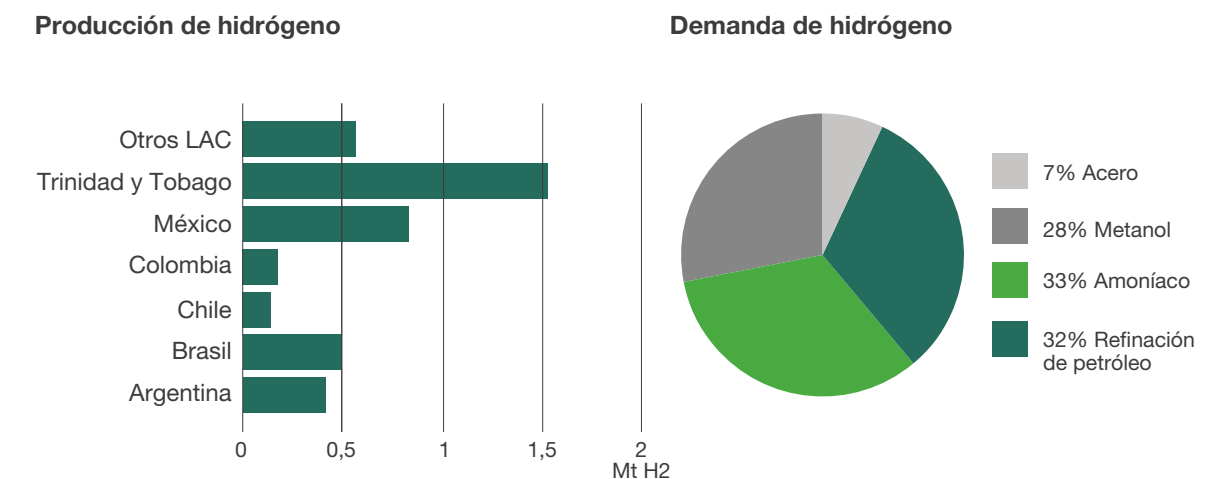
La Figura 9 muestra claramente la distribución de la producción de hidrógeno en ALC, con Trinidad y Tobago liderando como el mayor productor, superando 1,5 Mt/año, seguido por México y en menor medida por Argentina y Brasil. El resto de

³ La producción de hidrógeno a partir de la reforma del gas natural se realiza principalmente mediante el proceso de reformado con vapor (SMR). Este proceso, que puede dar lugar a hidrógeno gris (si el CO₂ se libera) o hidrógeno azul (si el CO₂ se captura), consiste en mezclar gas natural (metano) con vapor de agua y calentarlo a altas temperaturas en presencia de un catalizador para producir dióxido de carbono e hidrógeno. El hidrógeno se separa del dióxido de carbono y otras impurezas mediante técnicas de purificación como la absorción o las membranas selectivas.

la producción se reparte entre otros países de la región, como Chile y Colombia, donde aún predomina el uso del hidrógeno en aplicaciones tradicionales.

FIGURA 9:

Producción de hidrógeno en ALC por país y uso por sector industrial en 2022



Fuente: IEA, 2024a

La figura también muestra la distribución de la demanda de hidrógeno en sectores industriales clave, destacando al amoníaco como el segmento más relevante, con una participación del 33%. Sin embargo, en los últimos años, las dificultades para asegurar gas natural a precios competitivos han reducido el consumo de hidrógeno en este sector, lo que llevó, en 2019, al cierre completo de la producción de amoníaco en México y de una de las pocas plantas restantes en Brasil.

La refinación de petróleo representa el 32% de la demanda de hidrógeno de la región, con México, Brasil y Argentina liderando su consumo en procesos de hidrotratamiento para reducir el contenido de azufre en combustibles fósiles (IEA, 2024a). No obstante, este sector también ha visto una disminución en la demanda de hidrógeno debido al descenso en las actividades de refinación de petróleo durante la última década en la región.

Por su parte, la producción de metanol, que representa el 28%, tiene a Trinidad y Tobago como principal referente en la región, con el hidrógeno desempeñando un rol central en la industria petroquímica (Ministerio de Energía e Industrias

Energéticas de Trinidad y Tobago, 2021). Finalmente, el sector del acero, aunque limitado en la actualidad con apenas un 7% de la demanda, presenta oportunidades significativas a futuro, especialmente en Brasil y Argentina, donde el hidrógeno de bajas emisiones podría reemplazar al carbón en procesos siderúrgicos clave (IEA, 2024a).

Desarrollo del mercado

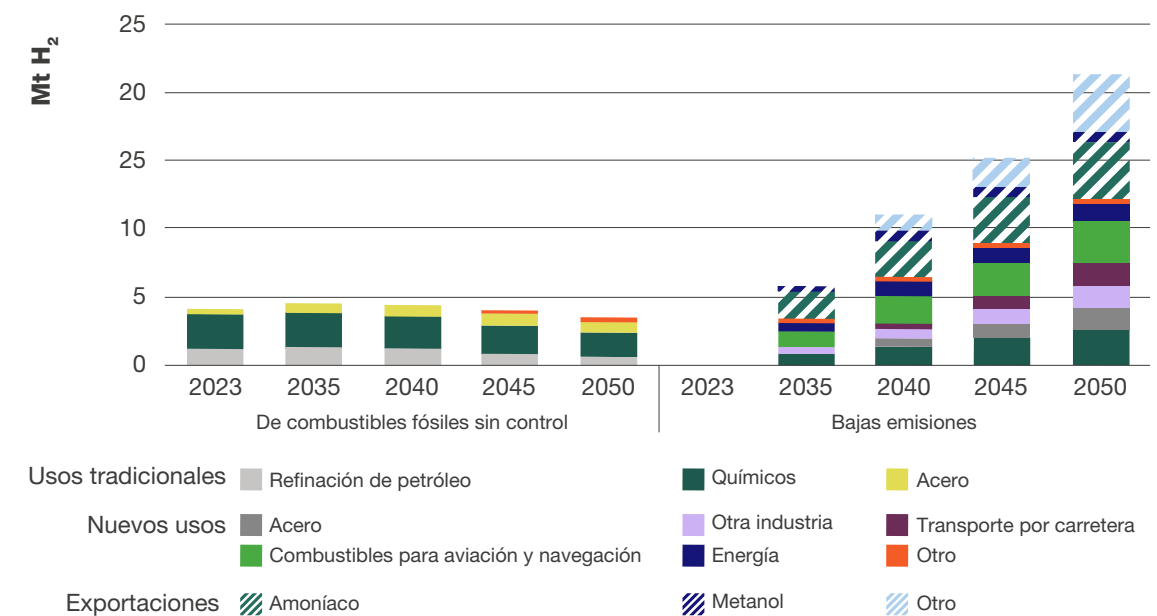
ALC se perfila como un actor clave en el panorama global de hidrógeno de bajas emisiones debido a su abundancia de recursos renovables, lo que permite producir hidrógeno a costos competitivos. Este hidrógeno puede utilizarse tanto a nivel local como en exportaciones para descarbonizar sectores difíciles de electrificar, apoyando la competitividad industrial y la creación de empleo. Países como Chile, Colombia, Uruguay, Argentina y Brasil han lanzado estrategias nacionales de hidrógeno, mientras otros están avanzando en sus propios planes, posicionando a la región en el mercado global emergente de H₂V.

Como resultado, se estima que la producción y demanda de hidrógeno también crezcan en ALC, de manera similar a otras regiones del mundo. Según la Figura 10, que presenta datos del informe de la IEA, en el escenario APS⁴, donde se cumplen todos los objetivos climáticos adoptados por los países, el consumo interno de hidrógeno en ALC aumentará un 90% para 2035 y casi se cuadruplicará para 2050 (IEA, 2024a). Las nuevas aplicaciones (en la producción de hierro y acero, la generación de electricidad, el transporte por carretera y los combustibles alternativos de aviación y marítimos) representan el 20% del consumo en 2035 y el 60% en 2050, por debajo del promedio mundial. La demanda de hidrógeno en la región no sólo está impulsada por el aumento del consumo interno, sino también por las crecientes exportaciones, principalmente en forma de combustibles basados en hidrógeno, que se estima se exportarán en el orden de los 3 Mt de H₂ en 2035 y los 9 Mt de H₂ en 2050.

4. El Escenario de Compromisos Anunciados (APS) es un escenario de cambio climático desarrollado por la IEA que asume que los gobiernos cumplirán sus compromisos relacionados con el clima.

FIGURA 10:

Demanda y exportaciones de hidrógeno y combustibles derivados de hidrógeno por sector a nivel global y en ALC en el Escenario APS



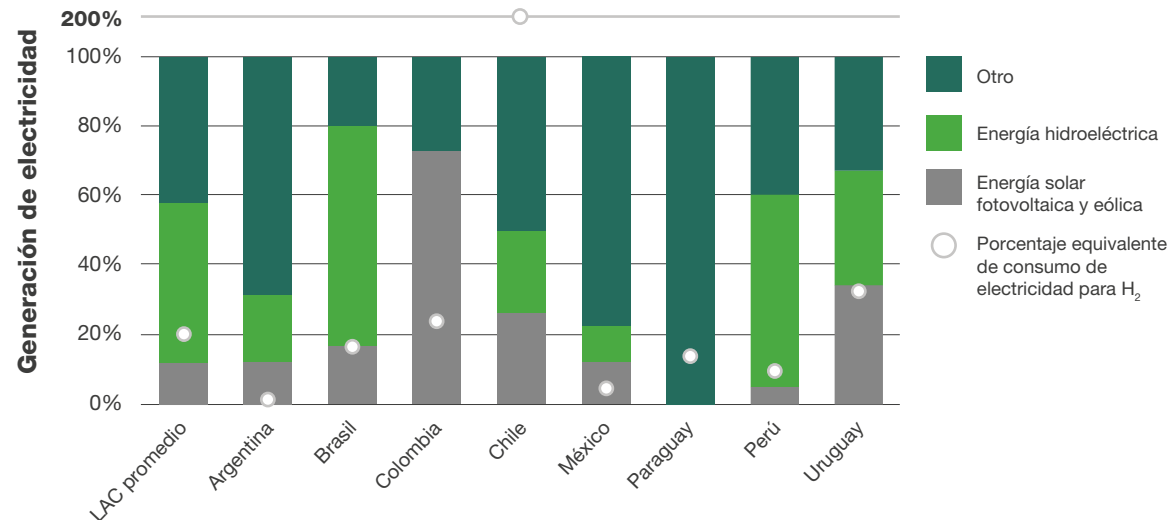
Fuente: IEA, 2024a

Según la IEA, los países de ALC han anunciado principalmente proyectos de hidrógeno de bajas emisiones basados en electrólisis del agua (IEA, 2024a). Si todos los proyectos anunciados se realizan, la producción anual de hidrógeno de bajas emisiones podría alcanzar los 7 Mt para 2030, lo que representaría casi el 15% del total mundial. Sin embargo, sólo el 0,2% de estos proyectos está en operación, construcción o cuenta con una decisión de inversión final, en comparación con más del 8% a nivel global. La mayoría de los proyectos en operación o construcción en ALC son pequeños (<5 MW de capacidad de electrólisis), aunque algunos países de la región están implementando proyectos de mayor escala.

Para permitir la expansión de la capacidad de producción de H₂V y sus derivados, los países de la región deberán expandir de manera significativa su capacidad de generación eléctrica. La Figura 11, creada por la IEA, muestra cuánto representaría el consumo eléctrico derivado de la producción de hidrógeno en la generación eléctrica total de cada país, en caso de que todos los proyectos anunciados se concretaran.

FIGURA 11:

Demanda potencial de electricidad para la producción de hidrógeno electrolítico de proyectos anunciados en América Latina y el Caribe, 2030, y generación de electricidad, 2022



Fuente: IEA, 2024a

El desarrollo del mercado de hidrógeno de bajas emisiones en ALC adquiere una relevancia global notable, especialmente si se consideran los posibles destinos del hidrógeno producido. La Figura 12 destaca los posibles socios comerciales para la región de ALC en la industria del H₂V, según informe del BID (BID, 2023). La identificación de estos socios es fundamental para entender el papel que la región puede jugar en el mercado global.

FIGURA 12:

Exportación de H₂V y derivados de ALC



Fuente: BID, 2023

Estudios han identificado 11 *hubs* potenciales de H₂V que servirían como nodos estratégicos entre consumidores, productores y exportadores, optimizando infraestructuras compartidas y aprovechando fuentes de energía renovable para reducir costos (BID, 2023). El análisis tiene en cuenta diversos factores, como el potencial actual de energía renovable, la competitividad logística, las regulaciones en materia de energías limpias, los proyectos ya existentes de H₂V y sus derivados, la infraestructura portuaria, y las oportunidades de especialización en sectores estratégicos.

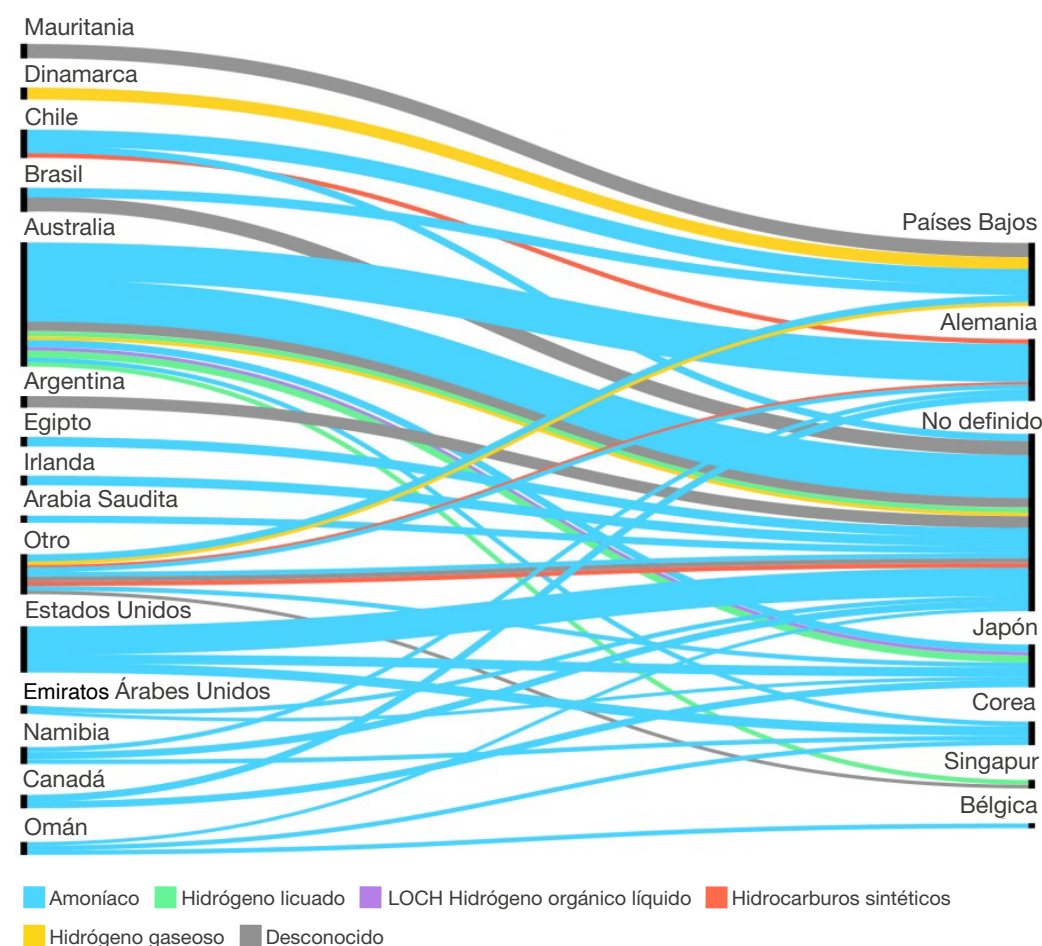
Los *hubs* identificados están en países que se encuentran en una fase avanzada de desarrollo para convertirse en exportadores de H₂V, entre ellos México, Colombia, Trinidad y Tobago, Brasil, Chile y Uruguay. Perú, Ecuador, Costa Rica y Bolivia se encuentran en etapas iniciales de desarrollo y se espera que impulsen la próxima ola de proyectos en la región.

La IEA destaca que Chile, Brasil y Argentina están posicionados como exportadores potenciales, con flujos significativos de hidrógeno proyectados para el año 2030. Estos flujos, en su mayoría en forma de amoníaco debido a su viabilidad técnica y económica para el transporte de larga distancia, tendrán como principales destinos la Unión Europea, Japón y Corea del Sur (IEA, 2023a).

La Figura 13 ilustra estos flujos potenciales de hidrógeno de bajas emisiones, mostrando cómo América Latina, especialmente Chile y Brasil, se conecta con los principales destinos globales, como Alemania, Países Bajos y Japón. Esta figura refuerza la importancia del comercio internacional de hidrógeno verde y destaca la predominancia del transporte en forma de amoníaco como una solución técnica viable para exportaciones a larga distancia. Esta tendencia refuerza la necesidad de infraestructura especializada para la producción y el transporte de derivados de hidrógeno en la región.

FIGURA 13:

Comercio de hidrógeno de bajas emisiones por región importadora, basado en proyectos anunciados, objetivos de políticas y en el Escenario de Emisiones Netas Cero para 2050, 2030



Fuente: IEA, 2023a

La IEA destaca que Chile, Brasil y Argentina están posicionados como exportadores potenciales, con flujos significativos de hidrógeno proyectados para el año 2030. Estos flujos, en su mayoría en forma de amoníaco debido a su viabilidad técnica y económica para el transporte de larga distancia, tendrán como principales destinos la Unión Europea, Japón y Corea del Sur (IEA, 2023a).

En este contexto, países como Chile y Brasil están tomando la delantera. Chile, por ejemplo, busca aprovechar sus abundantes recursos de energía solar y eólica para alcanzar una producción de 160 millones de toneladas anuales para 2050, en línea con su Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde (Ministerio de Energía de Chile, 2020). Brasil, por su parte, está desarrollando *hubs* estratégicos en el Nordeste, como el del Puerto de Pecém, conectando su infraestructura portuaria existente con las exportaciones, principalmente en forma de amoníaco y metanol (Gobierno del Estado de Ceará, 2023).

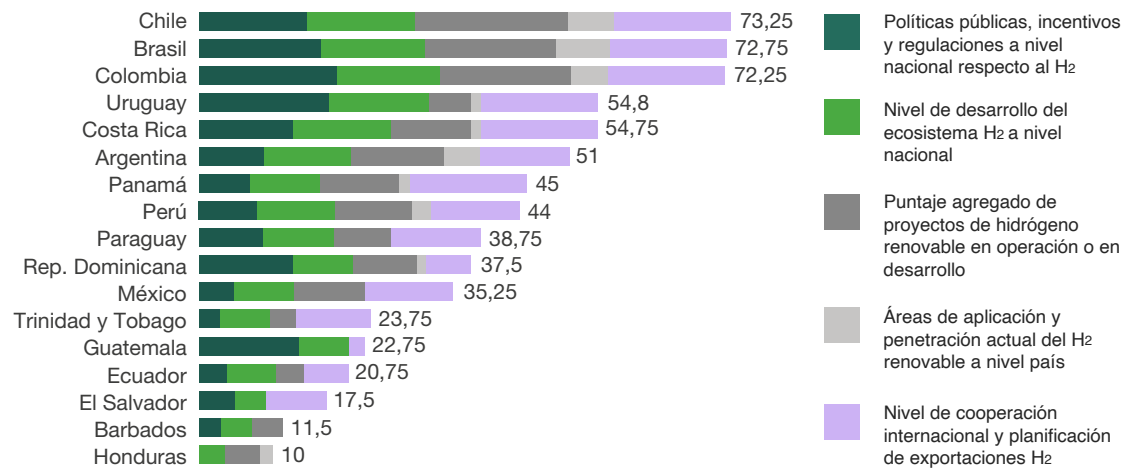
A pesar de este potencial, la falta de contratos firmes (FID) y de acuerdos a largo plazo sigue siendo un desafío crítico. La viabilidad económica de los proyectos depende de acuerdos bilaterales y de la garantía de demanda, factores clave para atraer inversiones. La asociación entre Alemania y Chile, por ejemplo, demuestra cómo los acuerdos internacionales y las políticas estructuradas pueden acelerar el desarrollo del mercado. Otro desafío crucial es la capacidad de respuesta de los fabricantes y tecnólogos ante la creciente demanda de equipos críticos, como electrolizadores y sistemas de transporte. Actualmente, América Latina depende de proveedores extranjeros, principalmente de Europa y Asia, donde la industria ya está consolidada. Para mitigar esta dependencia, Chile ha implementado

incentivos a través de CORFO, que ofrece cofinanciamiento para atraer a fabricantes de electrolizadores y fortalecer la producción local (CAF, 2023).

Para evaluar y comparar el avance de la economía del hidrógeno de bajas emisiones en los países de ALC, se desarrolló el índice H₂LAC, una iniciativa conjunta entre Hincio y New Energy (Hincio y New Energy, 2024). Basado en investigaciones y encuestas a representantes de varios países, este índice ofrece una visión integral del progreso en cinco diferentes sectores desde 2021.

FIGURA 14:

Puntuación general del índice H₂LAC en 2024



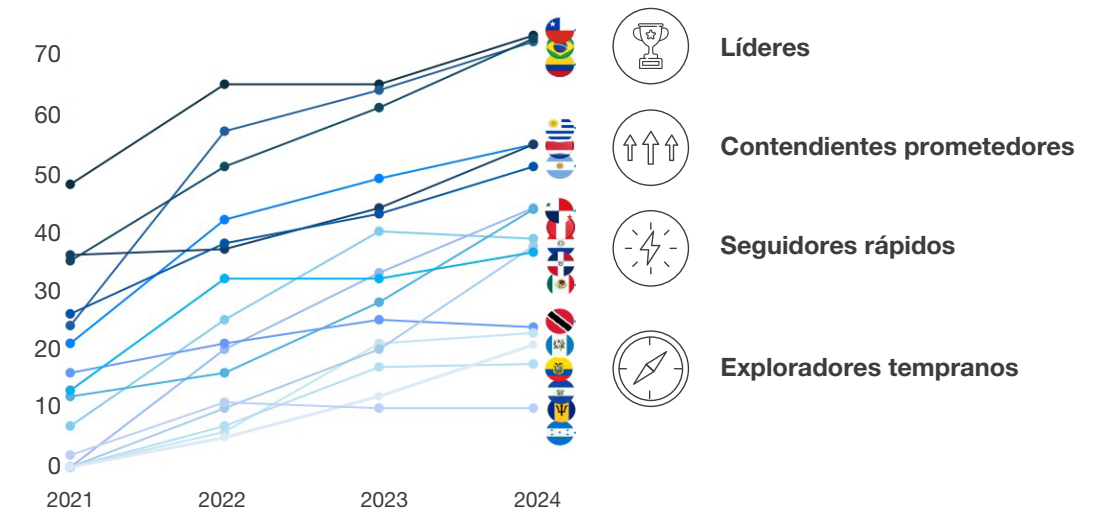
Fuente: Hincio, 2024

Según la evaluación más reciente, de 2024, Chile, Brasil y Colombia continúan liderando la región, con Brasil avanzando de la tercera a la segunda posición respecto a los resultados de 2023. El índice los describe como países que han aprovechado sus ventajas competitivas mediante el desarrollo de marcos regulatorios sólidos y ecosistemas locales robustos, aunque su futuro dependerá de asegurar la financiación y ejecutar proyectos con éxito.

Les siguen Uruguay, Costa Rica y Argentina, considerados “*promising contenders*” por su abundancia de recursos renovables y su potencial para expandir el sector del hidrógeno con proyectos emergentes que ya están despertando interés. El resto de los países se clasifican como “*fast followers*” o “*early explorers*”, según sus puntuaciones finales.

FIGURA 15:

Evolución del índice H₂LAC, 2021-2024



Fuente: Hincio, 2024

Sin embargo, a pesar del gran potencial para desarrollar una economía de hidrógeno de bajas emisiones en ALC, la región enfrenta desafíos importantes. Según un informe del Foro Económico Mundial (WEF, 2024), los cinco principales obstáculos en la región son:

- **Baja demanda:** La demanda de hidrógeno limpio es baja tanto para el consumo local como para la exportación. Sólo un número limitado de acuerdos de compra se ha concretado, y pocos proyectos han alcanzado decisiones finales de inversión (FID).
- **Lento desarrollo de infraestructura dedicada:** Aunque se han anunciado varios centros de hidrógeno limpio en la región, pocos están en construcción o alineados con oportunidades de creación de mercado.
- **Adaptación tecnológica y desarrollo de talento:** La región sigue siendo muy dependiente de fabricantes internacionales para componentes clave, como los electrolizadores. Se necesita adaptar la tecnología a los requisitos locales, y es fundamental desarrollar talento altamente calificado para apoyar el crecimiento del sector.
- **Altos costos que limitan la competitividad:** A pesar de los precios competitivos de la energía renovable, persiste una gran diferencia de costos

entre el hidrógeno limpio y el hidrógeno convencional o gris⁵. Las industrias y los mercados aún no están dispuestos a asumir el costo adicional.

- **Falta de estándares y certificación:** Aunque los esquemas de certificación regional para atributos de carbono han avanzado rápidamente, la región necesita establecer una definición común de estándares y directrices para garantizar la producción, el almacenamiento y el transporte seguros y confiables del hidrógeno limpio y sus derivados. A medida que estos esquemas evolucionen, deberán integrarse con estándares y certificaciones globales.

Las emisiones de CO₂ varían significativamente según el método de producción del hidrógeno y de la metodología de cálculo de emisiones utilizada. El hidrógeno verde, producido mediante electrólisis utilizando energía proveniente de fuentes renovables, presenta emisiones nulas, es decir, 0 kg de CO₂ por kg de H₂ producido, si se consideran únicamente las emisiones relacionadas con la generación de energía renovable. En contraste, el hidrógeno azul, que utiliza gas natural como materia prima, incorpora tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCUS). Sin embargo, debido a la eficiencia limitada del proceso, que generalmente varía entre el 60% y el 65%, las emisiones resultantes aún son significativas, situándose entre 3,5 y 4 kg de CO₂/kg de H₂ producido. Finalmente, el hidrógeno gris, producido igualmente a partir de gas natural, pero sin ninguna mitigación de carbono, es el más contaminante, con emisiones de aproximadamente 10 kg de CO₂/kg de H₂ producido (Iberdrola, s.d.).

Los costos de CCUS varían según el tipo de instalación y la tecnología utilizada. En las plantas de energía eléctrica a gas natural, los costos de captura oscilan entre USD 15 y USD 75 por tonelada de CO₂ capturado. En la producción de hidrógeno a partir de gas natural, los costos fluctúan entre USD 5 y USD 55 por tonelada. Otras fuentes industriales presentan costos que van de USD 25 a USD 115 por tonelada (Ciclo del Carbono, s.d.).

⁵. Al hidrógeno que se produce a partir del reformado/gasificación de hidrocarburos, generalmente gas y carbón, se le denomina hidrógeno gris. Cuando a estos procesos se aplica captura junto con utilización o almacenamiento de CO₂, este hidrógeno pasa a denominarse hidrógeno azul.

COSTO NIVELADO DE PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO VERDE (LCOH)

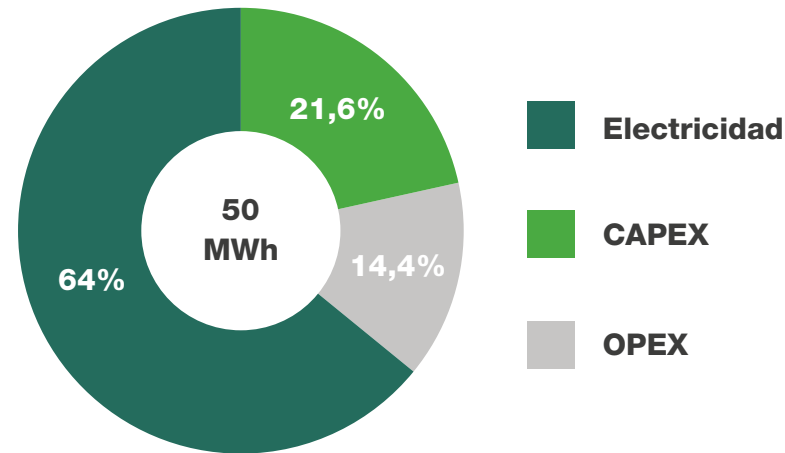
• Mercado global

El costo de producción de H₂V representa el principal obstáculo para su adopción masiva, ya que actualmente es dos a tres veces más caro que el hidrógeno gris en el mercado. En Colombia, los costos nivelados de hidrógeno (LCOH) en 2020 muestran que el hidrógeno verde osciló entre 2,8 USD/kg y 6,6 USD/kg, mientras que el hidrógeno gris presentó costos más competitivos, variando entre 1,9 USD/kg y 2,5 USD/kg (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2021). Por su parte, el hidrógeno azul se situó en 2,4 USD/kg, un costo intermedio gracias a la captura parcial de carbono. En Argentina, los valores actuales reflejan una situación similar. El LCOH del hidrógeno azul varía entre 1,1 USD/kg y 2,1 USD/kg, lo que revela una notable competitividad, mientras que el hidrógeno verde presenta una brecha significativa, con costos que oscilan entre 2,8 USD/kg y 6,4 USD/kg (WEF, 2024). En Brasil, el hidrógeno gris continúa siendo la opción más económica, con costos entre 1,0 USD/kg y 2,93 USD/kg, mientras el hidrógeno verde registra valores más elevados, situándose entre 2,83 USD/kg y 6,16 USD/kg (CELA, 2024).

La electricidad y los electrolizadores son los principales componentes del LCOH. De hecho, la electricidad por sí sola puede representar hasta el 75% del costo de producción del H₂V, mientras que el costo de inversión del electrolizador es el segundo componente más importante; las celdas de electrólisis (*stacks*) representan entre el 50% y 60% del CAPEX. Por lo tanto, reducir los costos tanto de la electricidad renovable como de la producción de electrolizadores será esencial para disminuir el LCOH.

FIGURA 16:

Composición del LCOH en 2030



Fuente: BID, 2023

El acceso a energía renovable abundante y de bajo costo es esencial para la producción a gran escala de hidrógeno renovable y sus derivados. Las regiones con alto potencial en energías renovables y bajos costos de desarrollo son las más idóneas para una producción rentable, lo que garantizaría un suministro estable y confiable. Además, otros factores clave que influyen en este desarrollo incluyen la disponibilidad de terrenos, el acceso a recursos hídricos y la infraestructura necesaria para transportar el producto final y, eventualmente, exportar energía a los principales centros de demanda, en caso de que el hidrógeno se utilice como medio de almacenamiento de electricidad a largo plazo.

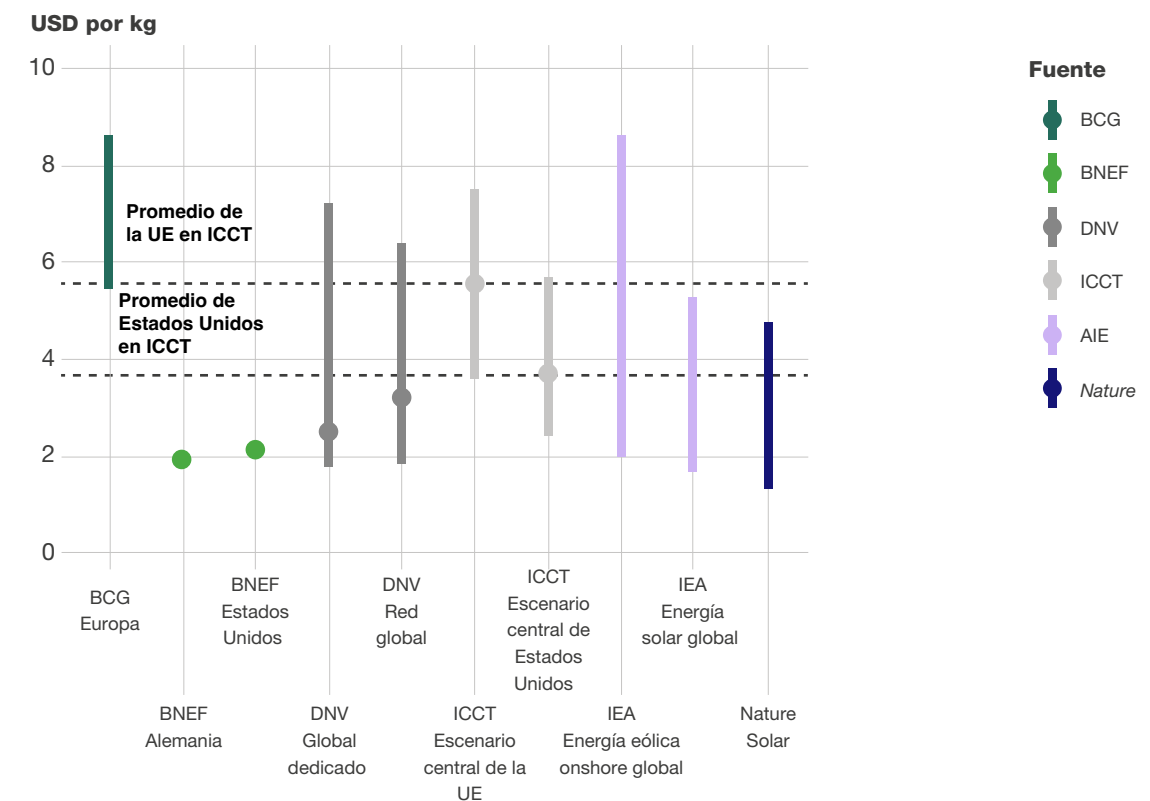
La evolución del LCOH dependerá también de los costos de inversión, especialmente los asociados a la adquisición de los electrolizadores. Esto, a su vez, estará influenciado por varios factores clave, como el avance en la tecnología de fabricación, la optimización de diseños para reducir el uso de materiales críticos, las economías de escala derivadas del aumento en la producción a gran escala, y la reducción de los costos de financiamiento mediante mejores condiciones de inversión y políticas de apoyo. Además, la innovación en la eficiencia energética de los electrolizadores será determinante para reducir aún más los costos.

Existen todavía grandes incertidumbres respecto a la evolución del costo del H₂V. Aunque se sabe que estará influenciado por los factores previamente

mencionados, no es posible predecir con exactitud dónde se situarán los precios. Las estimaciones actuales varían notablemente entre instituciones y regiones, como lo muestra un análisis reciente del Consejo Internacional de Transporte Limpio (ICCT) sobre el LCOH proyectado para 2030 (ICCT, 2024). Por ejemplo, los costos de producción en Estados Unidos son considerablemente más bajos que en Europa, como se observa en la Figura 17. Esta disparidad refleja las diferencias en acceso a recursos y tecnologías en cada región.

FIGURA 17:

LCOH en 2030 con base en diversas estimaciones

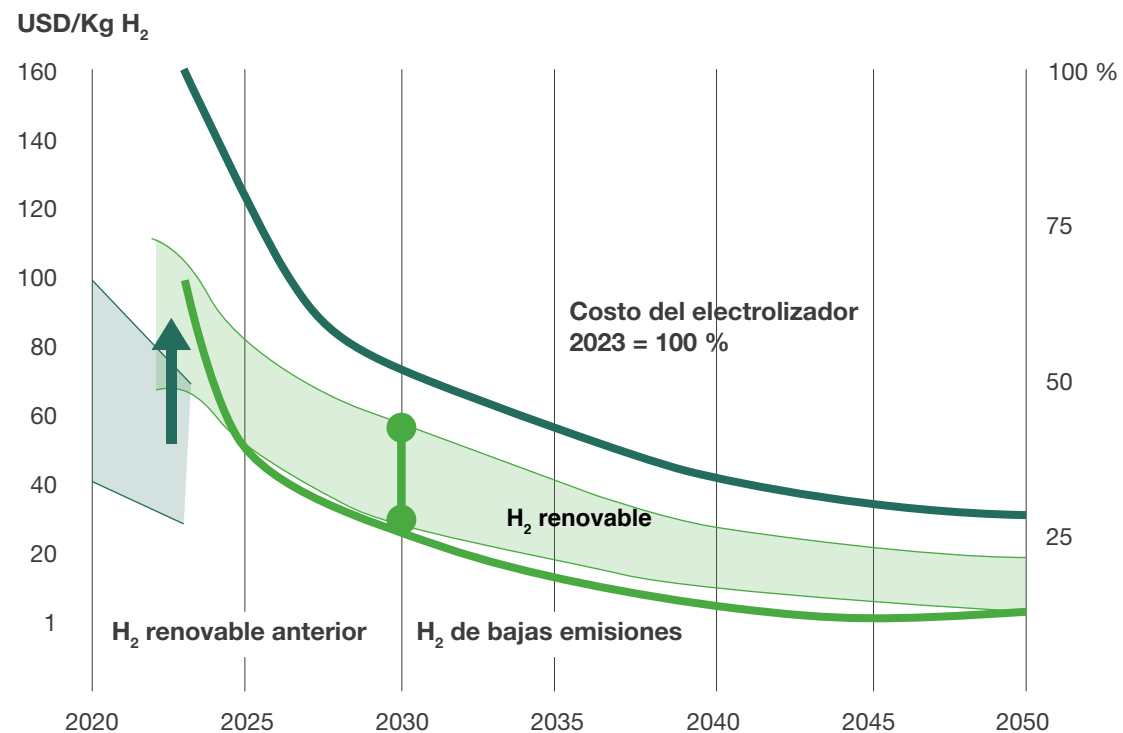


Fuente: ICCT, 2024

La percepción de los costos de producción a corto plazo del H₂V ha cambiado significativamente en los últimos años, según un informe reciente del Hydrogen Council (Hydrogen Council, 2023). A pesar de que las proyecciones anteriores anticipaban una reducción considerable del LCOH a partir de 2020, los costos nivelados para el hidrógeno renovable han aumentado entre un 30% y un

65%, situándose entre 4,5 USD/kg y 6,5 USD/kg. La Figura 18 muestra una comparación entre estas estimaciones más recientes y las previsiones anteriores, que hace evidente el ajuste al alza en los costos.

FIGURA 18:
Evolución del LCOH, 2020-2050



Fuente: Hydrogen Council, 2023

Las estimaciones actuales han aumentado debido al incremento global de las tasas de interés, que ha elevado significativamente el costo del capital, y a la oferta limitada de energía renovable. Además, factores como la escasez de metales de tierras raras, la falta de mano de obra calificada en algunas regiones y las interrupciones en las cadenas de suministro han contribuido al aumento de los costos. El sector del hidrógeno no es único en este sentido, ya que se han observado aumentos de costos en otros sectores. Una mejor comprensión del balance de planta y los gastos indirectos, como las tarifas de contratistas, también han contribuido a la elevación del CAPEX.

Los esfuerzos clave para reducir costos del electrolizador se centran en minimizar el uso de metales preciosos en los componentes, mejorar la eficiencia del sistema y aumentar la densidad de potencia, lo que reduce el tamaño de la planta y la capacidad necesaria.

A pesar de los desafíos a corto plazo, el informe indica que el LCOH podría disminuir a 2,5-4,0 USD/kg para 2030 y a 1-2 USD/kg para 2050, impulsado por la normalización del CAPEX, la reducción de los costos de financiamiento y el aumento en la fabricación de electrolizadores a gran escala. Los costos de las plantas de electrolizadores podrían disminuir entre un 35% y un 45% para 2030, y hasta un 70% para 2050, impulsados por el aumento en la producción a gran escala y la optimización de los diseños para reducir el uso de materiales y simplificar los componentes.

Los esfuerzos clave para reducir costos del electrolizador se centran en minimizar el uso de metales preciosos en los componentes, mejorar la eficiencia del sistema y aumentar la densidad de potencia, lo que reduce el tamaño de la planta y la capacidad necesaria. Los diseños mejorados resultan en menores necesidades de materiales y mano de obra, lo que reduce tanto los costos directos como los indirectos, y hace que el hidrógeno renovable sea más rentable.

Además, los riesgos financieros pueden influir notablemente en el LCOH del H₂V. Estos riesgos incluyen incertidumbre sobre las tasas de interés, la disponibilidad de capital y factores específicos del proyecto, como el tamaño y la ubicación de las plantas. Pueden surgir costos financieros más altos debido a la percepción de riesgos en tecnologías nuevas o condiciones de mercado inestables, lo que eleva los costos de producción. Estructuras de financiamiento, como inversiones públicas o privadas, también afectan el costo de capital, por lo que son clave las políticas que reduzcan estas incertidumbres para hacer el hidrógeno más competitivo.

Mercado en ALC

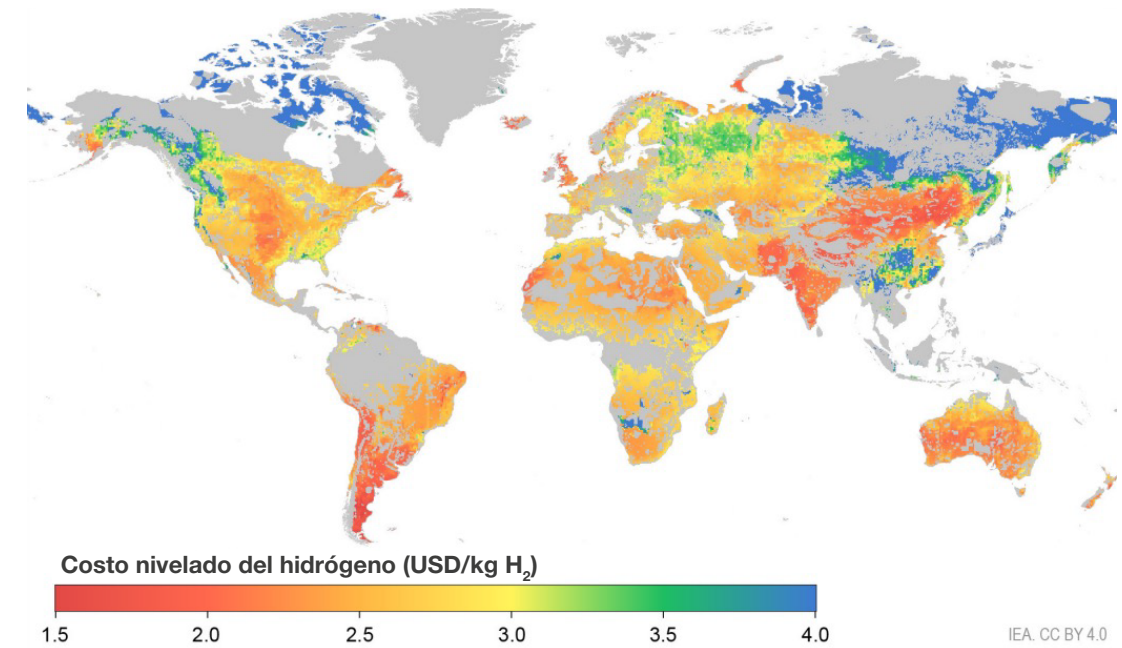
Diversas regiones en ALC presentan un gran potencial respecto a los costos de producción de H₂V, con valores competitivos a nivel mundial, lo que atrae el interés de países que desean suplir sus futuras demandas de hidrógeno con importaciones provenientes de la región.

Las áreas del continente que destacan en este ámbito ofrecen, principalmente, un gran potencial para generar electricidad renovable de bajo costo. Muchos países de la región ya cuentan con matrices eléctricas mayoritariamente renovables: Uruguay, Costa Rica y Paraguay, por ejemplo, tienen una generación casi 100% renovable. La Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) estima que, en el año 2021, el 59% de la generación de energía eléctrica en ALC provenía de fuentes renovables (OLADE, 2022).

La ventaja se hace evidente en las diferencias entre el LCOH regional y el global para el H₂V. En ALC, el LCOH actual es de 3,7–5,9 USD/kg (precios de 2020), lo cual es inferior al LCOH global actual de 3,8–8,5 USD/kg (precios de 2021), según el informe del Foro Económico Mundial (WEF, 2024).

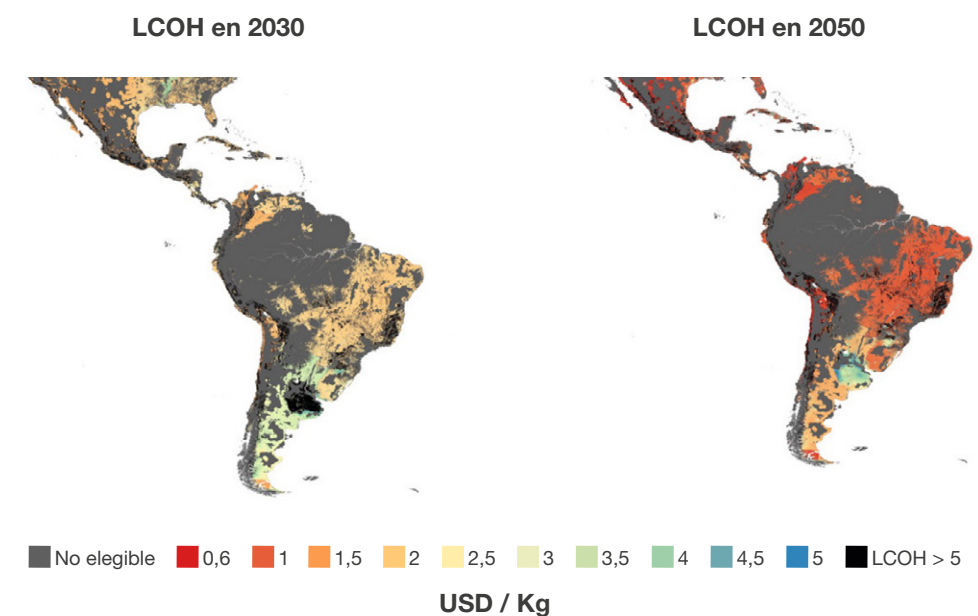
Como se muestra en la Figura 19 de la IEA, se pronostica que el costo nivelado de H₂V en la región para 2030 será particularmente bajo en áreas como el sur de Argentina y Chile, el noroeste de Brasil y el norte de Colombia y Venezuela (IEA, 2024a). Estas regiones cuentan con abundancia de recursos renovables, como energía solar y eólica, lo que permite costos de producción más bajos, en el rango de 1,5 USD/kg H₂ a 2,5 USD/kg H₂ según la figura de la IEA. Además, las proyecciones de IRENA para el LCOH en la región muestran que los costos disminuirán significativamente hasta 2050, para acercarse al del 1 USD/kg en diversas regiones, como se puede ver en la Figura 20 (IRENA, 2024b).

FIGURA 19:
LCOH para 2030



Fuente: IEA, 2024a

FIGURA 20:
Proyecciones del LCOH para 2030 y 2050 en ALC



Fuente: IRENA, 2024b

Las proyecciones del LCOH para 2030 muestran diferencias entre la IEA y la IRENA. La IEA proyecta costos más bajos, especialmente en regiones favorables como el sur de Argentina, Chile y el noroeste de Brasil, con valores que podrían acercarse a 1,5 USD/kg H₂ para 2030. En contraste, la IRENA presenta estimaciones más conservadoras, con valores entre 2 y 3 USD/kg H₂, reflejando posibles desafíos asociados con infraestructura y adopción tecnológica.

3

POTENCIALIDADES
DE PRODUCCIÓN
EN ALC

Como se mencionó en el capítulo anterior, algunos países de la región de América Latina y el Caribe están más avanzados en el mercado del hidrógeno; ya presentan un mayor número de proyectos anunciados y políticas públicas o estrategias nacionales para el desarrollo del hidrógeno de baja emisión de carbono.

En este capítulo, se analizará en mayor detalle el mercado de hidrógeno de Chile, Brasil, Uruguay, Colombia, Argentina, Trinidad y Tobago, y Costa Rica. Cada uno de estos países busca aprovechar sus ventajas competitivas en recursos renovables, la infraestructura o experiencia industrial, para posicionarse como líderes principalmente en la producción de hidrógeno verde y azul, tanto para el mercado interno como para la exportación.

Argentina tiene como meta aumentar su producción de hidrógeno de 0,4 millones de toneladas (Mton H_2 /año) que tiene en la actualidad a 5 Mton H_2 /año para 2050, apostando al H_2V (a partir de energía solar y eólica), el hidrógeno azul (gas natural con captura de carbono) y el rosa (a partir de energía nuclear). Con la Estrategia Nacional de Hidrógeno, ENH, lanzada en 2023, Argentina proyecta reducir los costos de producción del H_2V actuales de entre 2,8 y 6,4 USD/kg hasta 1,4 USD/kg en 2050, dependiendo de la ubicación y del tipo de hidrógeno (Secretaría de Asuntos Estratégicos de Argentina, 2023). Para el hidrógeno azul, producido a partir de gas natural con captura de carbono, los costos se estiman entre 1,1 y 2,1 USD/kg, directamente influenciados por el precio del gas natural. Las proyecciones para 2050 indican que el hidrógeno azul se mantendrá estable en torno a 1,1 USD/kg (WEF, 2024). En Argentina el hidrógeno se utiliza principalmente en la producción de fertilizantes, de metanol, en la industria siderúrgica y para el refinamiento de combustibles y se destinará principalmente para mercados como Europa, Japón y Corea del Sur. Sobre los proyectos de producción de H_2V , Argentina tiene dos proyectos en operación y 12 en desarrollo y anunciados.

Con una matriz eléctrica compuesta por más de 90% de energías renovables, Uruguay tiene un potencial significativo para la producción de H_2V . Ha establecido un cronograma ambicioso, en la Hoja de Ruta, para expandir su capacidad de electrólisis de 0,1 GW (14 kton H_2) en 2025 hasta 9 GW (1,3 Mton H_2) para 2040, enfocándose en la producción de H_2V a partir de energía eólica y solar (Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay, 2024a). El hidrógeno en el mercado interno se utilizará principalmente en el transporte pesado, en el transporte

En este capítulo, se analizará en mayor detalle el mercado de hidrógeno de Chile, Brasil, Uruguay, Colombia, Argentina, Trinidad y Tobago, y Costa Rica. Cada uno de estos países busca aprovechar sus ventajas competitivas en recursos renovables, la infraestructura o experiencia industrial, para posicionarse como líderes principalmente en la producción de hidrógeno verde y azul, tanto para el mercado interno como para la exportación.

marítimo y en la producción de fertilizantes, con planes de exportar hidrógeno y sus derivados, como metanol y amoníaco, a partir de 2030. Los vastos recursos naturales favorecen la producción de hidrógeno a costos competitivos, estimados en 1,8 USD/kg en 2025 hasta valores entre 1,0 y 1,4 USD/kg en 2050 (WEF, 2024). Uruguay aún no tiene proyectos de hidrógeno en operación.

Costa Rica espera que la demanda de H_2V llegue a 20 kton H_2 /año para 2030 hasta 420 kton H_2 /año para 2050, con 91% de ese total destinado al sector del transporte, que es el mayor emisor de contaminantes (Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica, 2023). El país planea aprovechar su matriz energética casi 100% renovable para producir H_2V , con un potencial de producción que podría alcanzar hasta 5,2 Mton H_2 /año. El costo planeado está entre 1,2 USD/kg y 1,9 USD/kg en 2050. El LCOH del hidrógeno gris en Costa Rica muestra una tendencia al alza a lo largo del tiempo, reflejando los posibles impactos de las regulaciones ambientales y las fluctuaciones en los precios del gas natural. El costo está proyectado en 1 USD/kg para 2030, 2,2 USD/kg en 2040 y 2,8 USD/kg en 2050 (LAC Clean Hydrogen Action, 2024). El objetivo es reducir las emisiones de GEI, con un enfoque en los sectores de transporte e industria.

Trinidad y Tobago tiene un plan para establecer un mercado de hidrógeno a lo largo de 35 años, explorando principalmente el potencial de la energía eólica *offshore*, con la meta de producir hasta 4 Mton H₂/año de H₂V para el período de 2045-2065. En ese país el potencial de aplicación de H₂V es esencial para la industria química y tiene un alto potencial para la producción de acero y cemento. Trinidad y Tobago tiene actualmente una capacidad de aproximadamente 1,7 Mton H₂/año de hidrógeno gris, con una demanda cautiva de 1,5 Mton H₂/año para amoníaco y metanol. Además, Trinidad y Tobago podría anticipar la sustitución del hidrógeno gris en la industria, utilizando hidrógeno azul. No hay datos disponibles de costos actuales, pero se prevé un costo entre 2,7 USD/kg y 4,5 USD/kg en 2050 (Ministerio de Energía e Industrias Energéticas de Trinidad y Tobago, 2021).

En Colombia actualmente se producen 155 kton H₂/año de hidrógeno gris, destinados principalmente a refinerías (84%) y a la producción de fertilizantes (12%). La Estrategia Nacional, presente en la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia, apunta a desarrollar entre 1 y 3 GW de capacidad de electrólisis hasta 2030, con una producción de 50 kton H₂/año de hidrógeno azul, utilizando captura de carbono a un costo competitivo de 1,7-1,8 USD/kg (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2021). En octubre de 2024, Petrobras, en asociación con Ecopetrol, anunció el descubrimiento de un importante yacimiento *offshore* de gas natural en la Cuenca de la Guajira, en el Caribe colombiano. Este hallazgo tiene el potencial de duplicar las reservas de gas del país. Sin embargo, aunque Colombia cuenta con un potencial significativo en energías renovables, las reservas actuales de gas natural son limitadas, y el desarrollo de nuevos campos aún tomará tiempo para impactar el suministro (Petrobras, 2024). De hecho, entre 2030 y 2040 se espera que coexistan el hidrógeno azul y el verde, y a partir de 2040 se espera que el H₂V sea la alternativa más competitiva en toda Colombia. Hasta 2050, el objetivo es explorar y aumentar la aplicación de hidrógeno en sectores del transporte, como la aviación y el transporte marítimo.

Chile posee una de las estrategias más avanzadas de la región, con metas claras para convertirse en un líder global en la producción de H₂V, respaldado por su gran potencial de generación de energía renovable, estimada en más de 1.800 GW, principalmente de energía solar. El país tiene como objetivo instalar 5 GW de capacidad de electrólisis para 2025 y hasta 25 GW para 2030, con foco en la exportación de amoníaco, metanol y combustibles limpios. Chile pretende ser

el exportador de hidrógeno verde con los costos de producción más bajos para 2050, alcanzando apenas 0,8 USD/kg en la región sur del país. Cabe destacar que el país ya ha anunciado más de 70 proyectos de hidrógeno (Ministerio de Energía de Chile, 2020).

En Brasil, el estudio del instituto CEBRI y de la Empresa de Investigación Energética (EPE) de 2023 estima que hay un potencial de producción de hidrógeno de hasta 32 Mton H₂/año en 2050, considerando la demanda doméstica e internacional (Cebri y EPE, 2023). El país cuenta con una matriz energética mayoritariamente renovable, pero en la actualidad el hidrógeno gris presenta un costo actual inferior al H₂V. El LCOH máximo para hidrógeno gris es de 2,93 USD/kg, mientras que para H₂V varía entre 2,83 USD/kg y 6,16 USD/kg, aunque se prevé que el costo de H₂V descienda a 1,2 USD/kg en 2050 (CELA, 2024).

Las metas de producción y los proyectos estratégicos para 2030, 2040 y 2050 varían entre los países, pero todos comparten el objetivo de integrar el hidrógeno en sus matrices energéticas como una alternativa limpia y sostenible. La Figura 21 proporciona un panorama inicial sobre el análisis de los siete países que se realizará a continuación, mostrando una visión general de los proyectos de producción totales de hidrógeno, en operación y en desarrollo, y la capacidad proyectada en GW de dichos proyectos.

La lista de proyectos se realizó con base en datos de la Plataforma para el Desarrollo del Hidrógeno Verde en Latinoamérica y el Caribe, Atlas H₂LAC, que monitorea, organiza los datos y proporciona mapas e información detallada sobre la situación de los proyectos de H₂V en ALC.

FIGURA 21:

Visión general de la cantidad y la capacidad instalada de proyectos de hidrógeno en operación, en desarrollo y anunciados



Fuente: elaboración propia, con base en datos de diferentes fuentes: Plataforma H2LAC, 2024, Hinicio y New Energy, 2024, IEA, 2024b

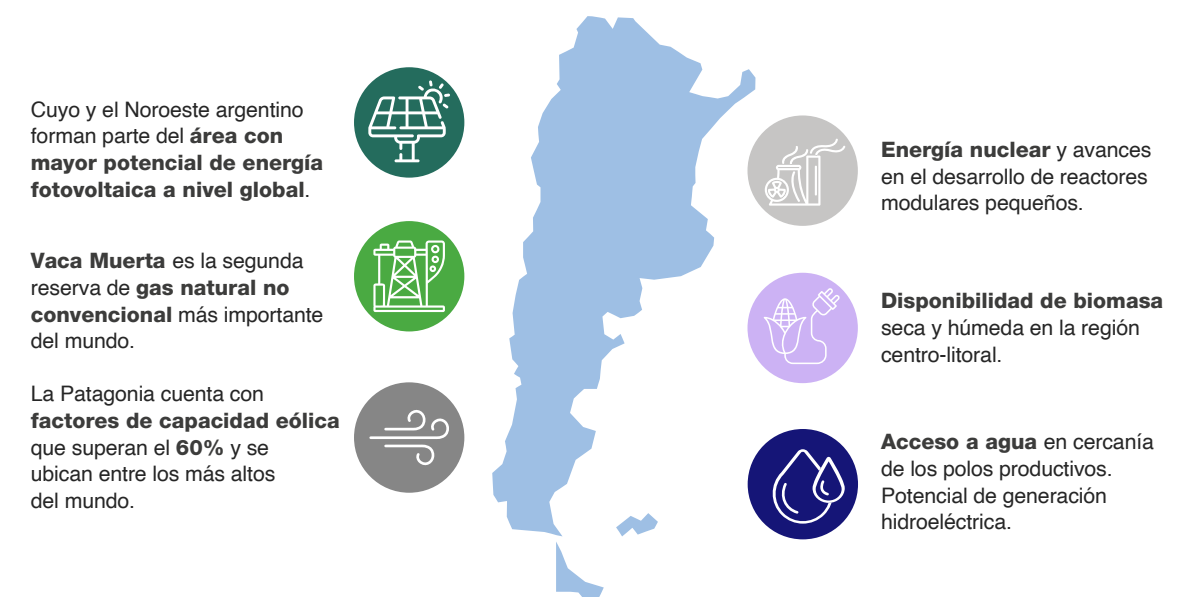
ARGENTINA

Argentina cuenta con algunas ventajas que la pueden posicionar como una posible productora competitiva de hidrógeno con bajas emisiones tanto para el mercado internacional como para el nacional. En 2023, según los datos de generación eléctrica de Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico (CAMMESA), en Argentina la generación renovable representó

aproximadamente el 42% de la generación total, compuesta principalmente por energía hidroeléctrica (66%) y eólica (24%) (CAMMESA, 2024). Estas fuentes de energía renovable, especialmente concentradas en las regiones de la Patagonia y el norte del país, proveen condiciones ideales para avanzar en la producción de H₂V, aprovechando la abundancia de energía solar y eólica, de acuerdo con la Figura 22.

FIGURA 22:

Competitividad y potencial de producción de hidrógeno



Fuente: Secretaría de Asuntos Estratégicos de Argentina, 2023

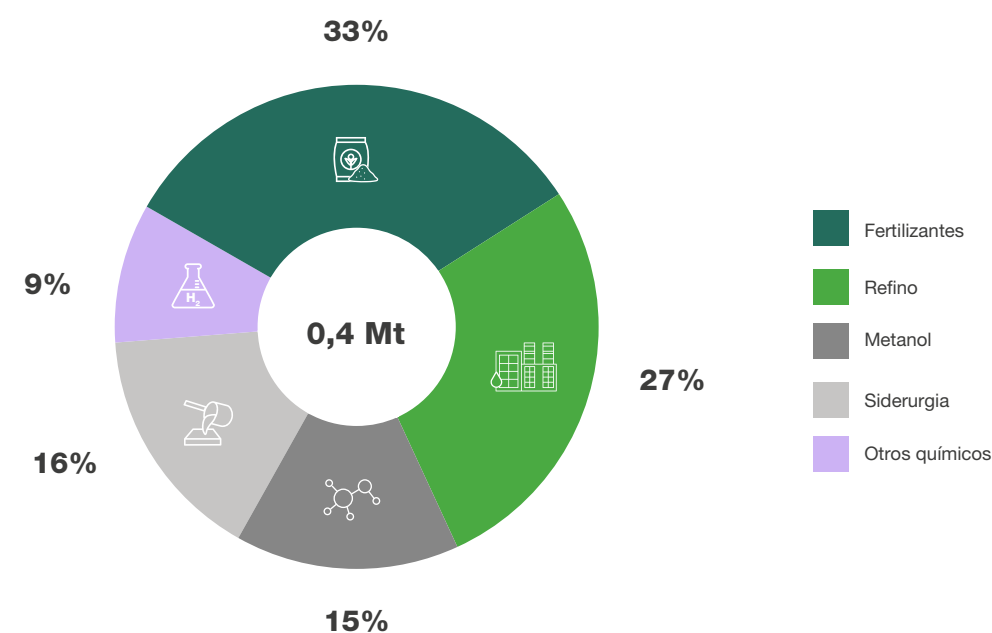
En su Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Economía del Hidrógeno (ENH), lanzada en 2023, Argentina busca promover diferentes tipos de hidrógenos de bajas emisiones: el verde, el azul y el rosa, que podría producir en el reactor modular CAREM.

Actualmente, Argentina produce 0,4 Mt de hidrógeno gris anualmente para el consumo interno (Figura 23), lo que representa el 9% del mercado latinoamericano (de 4,4 Mt) y aproximadamente el 0,4% de la demanda global (de 97 Mt). Debido a los costos de transporte y almacenamiento, la producción de hidrógeno gris se concentra cerca de los principales centros de consumo y

se utiliza principalmente en la producción de fertilizantes, metanol, en la industria siderúrgica y para el refinamiento de combustibles, así como en otros procesos químicos (Secretaría de Asuntos Estratégicos de Argentina, 2023).

FIGURA 23:

Destinos locales del hidrógeno argentino producido

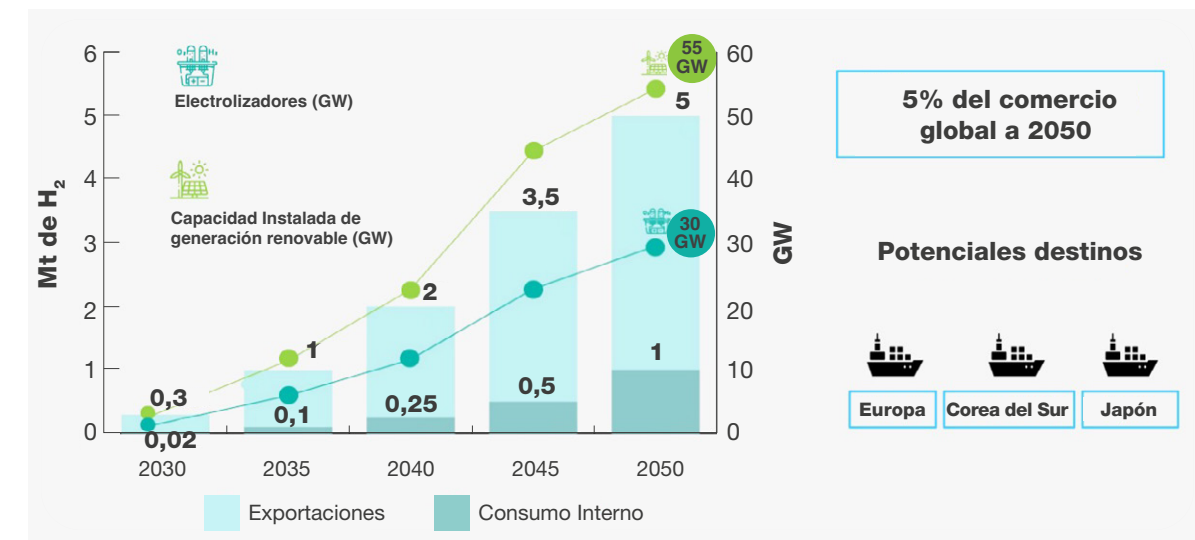


Fuente: Secretaría de Asuntos Estratégicos de Argentina, 2023

De acuerdo con la Figura 24, se proyecta que la producción de hidrógeno en Argentina aumentará de las actuales 0,4 Mt anuales a 5 Mt en 2050, lo que representa un crecimiento de aproximadamente 12 veces en el tamaño del sector. La creciente demanda internacional, en mercados como Europa, Corea del Sur y Japón, impulsará esta expansión y permitirá una mejora continua en eficiencia y productividad (Secretaría de Asuntos Estratégicos de Argentina, 2023).

FIGURA 24:

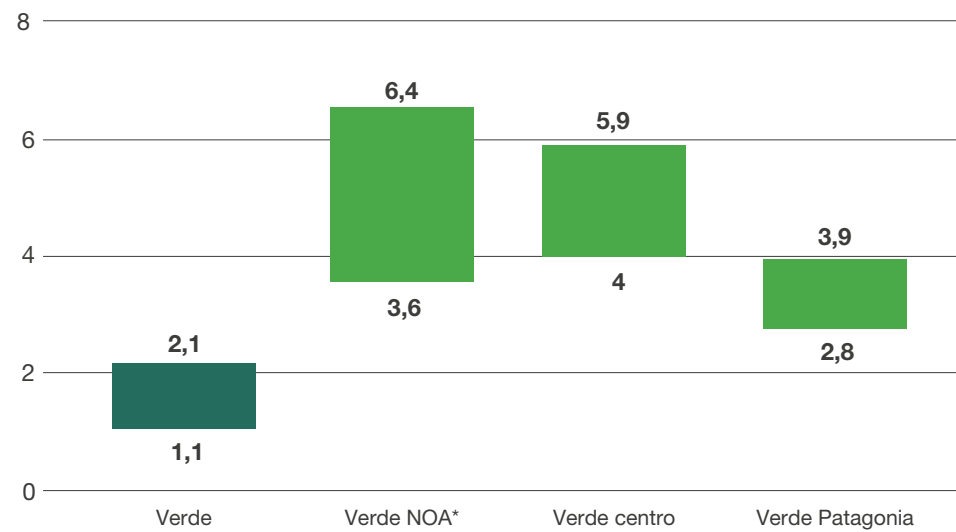
Producción y comercialización de hidrógeno en Argentina



Fuente: Secretaría de Asuntos Estratégicos de Argentina, 2023

Argentina tiene el potencial de ofrecer costos competitivos en la producción de hidrógeno. Según estimaciones recientes, el costo del hidrógeno azul variaría entre 1,1 y 2,1 USD/kg, dependiendo del precio del gas natural. Por otro lado, el costo del H₂V estaría en un rango de 2,8 a 6,4 USD/kg, considerando la disponibilidad de recursos renovables en distintas ubicaciones, con la región patagónica como la más competitiva en las condiciones actuales, según se muestra en la Figura 25.

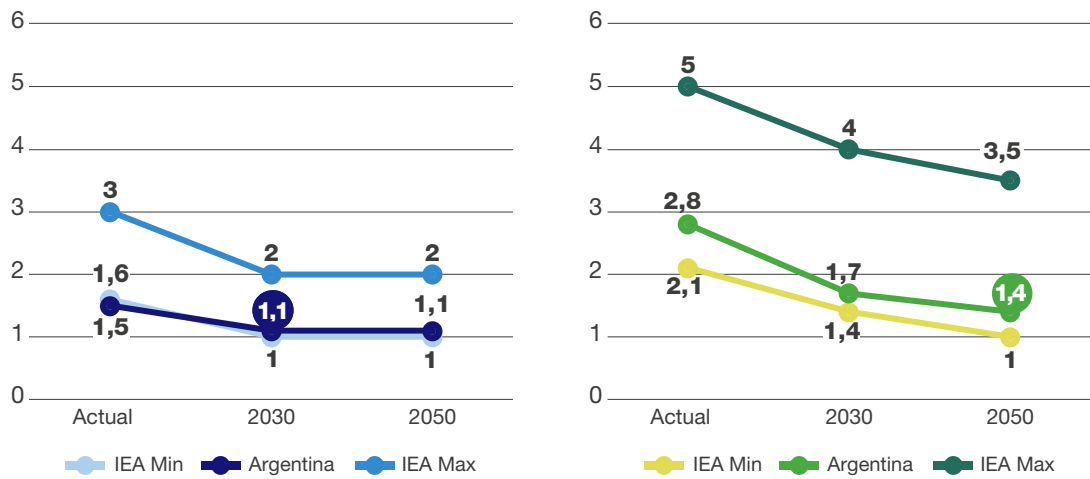
FIGURA 25:
Costos actuales (USD/kg) del hidrógeno en diferentes regiones de Argentina



Fuente: Secretaría de Asuntos Estratégicos de Argentina, 2023
*NOA – Noroeste Argentino

Para 2050, se prevé que el costo de producción de H₂V en la Patagonia se reduzca a 1,4 USD/kg, mientras que para 2030 se espera que alcance los 1,7 USD/kg. En el caso del hidrógeno azul, se estima que el costo será de 1,1 USD/kg a partir de 2030. Estas proyecciones posicionan a Argentina entre los países con los costos de producción más competitivos, según la IEA, como se muestra en la Figura 26.

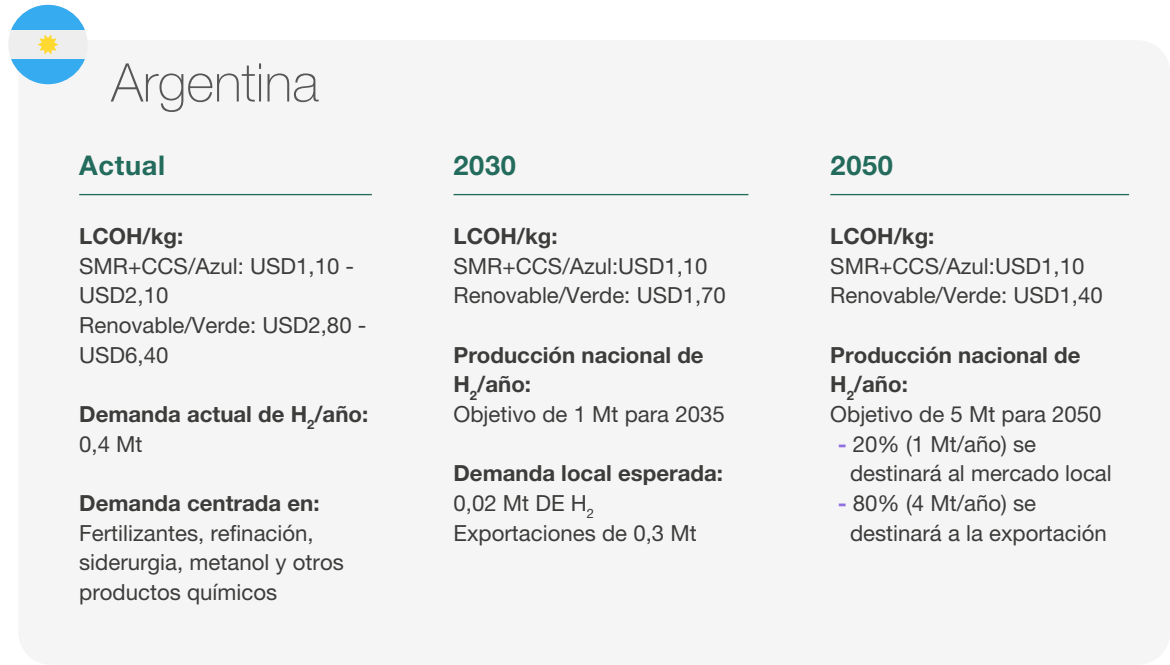
FIGURA 26:
Proyección de costos de H₂ azul y H₂ verde



Fuente: Secretaría de Asuntos Estratégicos de Argentina, 2023

En la Figura 27 se presenta un resumen de los datos principales.

FIGURA 27:
Datos principales en Argentina



Fuente: WEF, 2024

• Principales proyectos de producción de hidrógeno

Los proyectos de hidrógeno en Argentina, tanto en operación como en desarrollo, se muestran en la Figura 28.

FIGURA 28:
Proyectos de hidrógeno en Argentina



Fuente: elaboración propia, con base en Atlas H2LAC, 2024

Argentina tiene 15 proyectos de producción de hidrógeno, de los que dos están en operación. Los proyectos de producción están avanzando, con un enfoque en el H₂V y el hidrógeno azul, con el objetivo de abastecer tanto el mercado interno como la exportación a regiones como Europa y Asia.

Argentina tiene 15 proyectos de producción de hidrógeno, de los que dos están en operación. Los proyectos de producción están avanzando, con un enfoque en el H₂V y el hidrógeno azul, con el objetivo de abastecer tanto el mercado interno como la exportación a regiones como Europa y Asia. La información sobre los proyectos de hidrógeno en operación es proporcionada por Atlas H₂LAC y el informe LAC Clean Hydrogen Action (LAC Clean Hydrogen Action, 2024).

- **Hychico:** Proyecto piloto en funcionamiento desde 2008, con una capacidad de producción de hidrógeno de 120 Nm³/hora, que hace uso de electrolizadores y una planta equipada con un moto-generator de 1,4 MW que opera con una mezcla de hidrógeno y gas natural. Se utiliza para la inyección en redes de gas natural y la generación de energía eléctrica (Hychico S.A., s.d.).
- **Pico Truncado:** Proyecto de escala experimental en funcionamiento desde 2005. Utiliza energía eólica para producir hidrógeno mediante electrólisis, con una capacidad de producción de aproximadamente 100 m³ H₂/hora. El hidrógeno generado se destina a la mezcla con gas natural comprimido (GNC) para aplicaciones de transporte.
- **Consorcio H2ar:** Liderado por Y-TEC, el brazo de innovación de YPF, el consorcio H2ar agrupa a cerca de 50 empresas de la cadena de valor del hidrógeno en Argentina. Este consorcio busca explorar el potencial de producción de hidrógeno verde y azul, mediante investigaciones sobre la viabilidad y capacidad de producción en varias regiones del país. Y-TEC está colaborando con otras empresas y entidades para avanzar en la

producción de hidrógeno con bajas emisiones de carbono y posicionar a Argentina como un actor relevante en el mercado global de este recurso (Consorcio H2ar, s.d.).

- **Proyecto Pampas, liderado por Fortescue Future Industries (FFI):**

Este es uno de los mayores proyectos planificados para la producción de H₂V en la región de la Patagonia. El proyecto, liderado por la empresa australiana FFI, tiene como objetivo una producción significativa de H₂V para satisfacer tanto la demanda local como la exportación. Con una inversión de 8,4 mil millones de dólares, el proyecto tiene como objetivo producir 2,2 millones de toneladas de H₂V al año para 2030. También se consideró una etapa piloto del proyecto con una capacidad de producción de 35 kton al año, que debería haberse inaugurado para 2024 (Presidencia de la Nación, 2021).

A pesar del gran potencial, la principal iniciativa del país, el Proyecto Pampas, está enfrentando serias dificultades. En una entrevista con el portal de noticias EIDiarioAR, el entonces presidente argentino Alberto Fernández afirmó en mayo de 2023 que había un problema con el esquema debido a las exigencias de FFI, lo que representaba un desafío para el gobierno. Según se reporta, el desarrollador estaría solicitando la creación de un “dólar especial” que permitiría a los desarrolladores de H₂V acceder a tasas de cambio favorables entre el dólar estadounidense y el peso argentino. Fernández afirmó que el gobierno estaba trabajando para encontrar una solución a este problema (World Hydrogen Latin America, 2023).

Actualmente, no hay información pública específica sobre las acciones del actual presidente Javier Milei en relación con el proyecto Pampas de FFI. Sin embargo, considerando las políticas económicas de su gobierno, que incluyen la reducción de impuestos a la exportación y la eliminación de controles cambiarios, es posible que tales medidas impacten positivamente proyectos de inversión extranjera, como el de FFI.

Recientemente, la Unión Europea y el gobierno argentino firmaron un acuerdo para cooperar en proyectos de inversión y asistencia técnica en hidrógeno renovable, valorados en 4 millones de euros. Esta colaboración, que forma parte del programa Global Gateway de la UE y de EUROCLIMA, tiene como objetivo promover el comercio y la inversión en hidrógeno renovable. Las iniciativas

incluyen la modernización de la red de transporte eléctrico y talleres sobre la certificación de hidrógeno renovable, con el propósito de descarbonizar la economía y fomentar el desarrollo económico en Argentina (Henríquez, 2024).

- **Proyectos de infraestructura y consumo de hidrógeno**

El área de infraestructura en la ENH –Planes de acción (Secretaría de Asuntos Estratégicos de Argentina, 2023)– de Argentina establece objetivos claros para desarrollar una infraestructura robusta que apoye la producción, consumo y exportación de hidrógeno en el país. Entre las principales metas se encuentran la creación de *hubs* de producción de hidrógeno en áreas con potencial renovable, la implementación de corredores estratégicos de transporte y la adecuación de la infraestructura portuaria para facilitar las exportaciones de hidrógeno y sus derivados.

La ENH prioriza el desarrollo de cinco *hubs* de producción, principalmente en la región sudeste, que incluye la provincia de Buenos Aires y se extiende hasta Tierra del Fuego. Además, la estrategia abarca la creación de tres corredores logísticos estratégicos:

- **Corredor Sur:** Conectando Buenos Aires con Tierra del Fuego, con un enfoque en la exportación.
- **Corredor Oeste:** Uniendo Bahía Blanca, Río Negro y Neuquén, regiones con infraestructura de energía renovable.
- **Corredor Centro:** Conectando Buenos Aires, Rosario y Córdoba, optimizando el transporte interno de hidrógeno.

El sudeste de Argentina destaca como la principal área para proyectos de exportación, debido al excelente potencial de energía eólica y al acceso al Océano Atlántico. Sin embargo, un análisis realizado por el Ministerio del Interior evidencia necesidades estratégicas en esa región, incluyendo la renovación y mejora de al menos nueve puertos en cinco provincias, así como la implementación de más de 30 obras de infraestructura eléctrica en la Patagonia para apoyar el transporte de energía y la interconexión (Secretaría de Asuntos Estratégicos de Argentina, 2023). Un ejemplo de estas iniciativas es el Puerto de Bahía Blanca, uno de

los principales polos petroquímicos del sur de Argentina, que ha lanzado una licitación pública para la renovación de la Posta de Inflamables N°1, la cual incluye la restauración completa del muelle de atraque y de los viaductos de acceso (Consortio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca, 2022).

BRASIL

La generación de energía renovable en Brasil, según los datos del Operador Nacional del Sistema Eléctrico (ONS), en 2023, fue significativa y representó aproximadamente el 89% de la generación de energía eléctrica del país (ONS, 2023). La principal fuente fue la hidroeléctrica, con más de 67% de la generación, consolidándose como el pilar de la matriz energética renovable brasileña. Otras contribuciones notables vienen de la energía eólica (15%) y la solar (7%), lo que refleja el aprovechamiento creciente de estas fuentes. Brasil mantiene así una de las matrices energéticas más renovables y diversificadas del mundo, destacándose por su liderazgo en el uso de energías limpias en ALC.

Brasil resalta también por su potencial de producción de hidrógeno de bajo carbono, especialmente hidrógeno renovable, dado el alto nivel de energías renovables en la matriz eléctrica, el robusto sistema de transmisión y el gran potencial de producción de biocombustibles. Según el Programa Nacional de Hidrógeno (PNH₂), Brasil tendría un potencial teórico de producción de unos 1.800 millones de toneladas de hidrógeno por año, a partir de diversas rutas de producción (Ministerio de Minas y Energía, s.d.).

El estudio de CEBRI y EPE de 2023 comparó el potencial de producción de hidrógeno en Brasil en tres escenarios (Cebri y EPE, 2023):

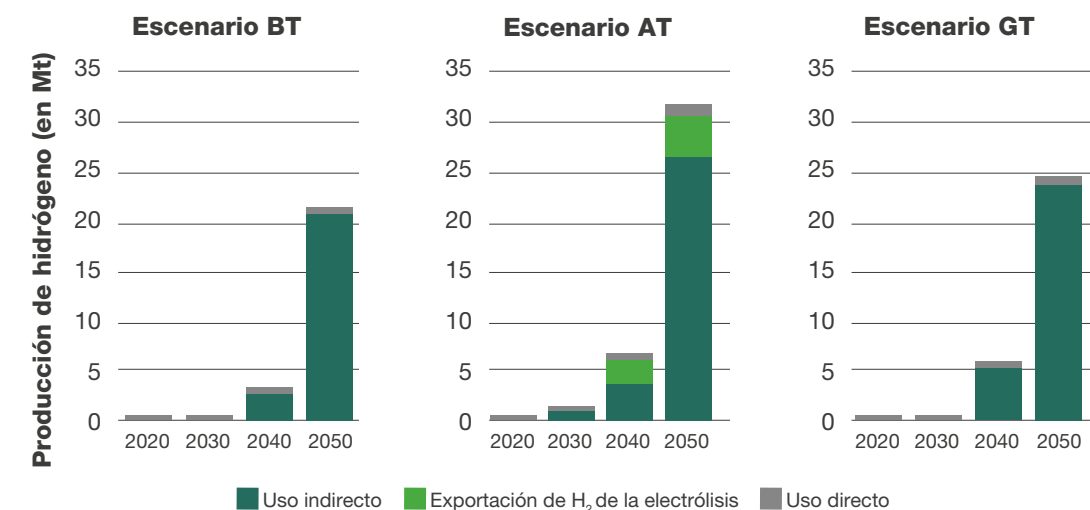
- **Escenario de Transición de Brasil (BT):** Busca la neutralidad de carbono para 2050 de manera eficiente e independiente de otros países, creando oportunidades de inversión
- **Escenario de Transición Alternativa (AT):** Explora una ruta tecnológica diferente, considerando los impactos climáticos y las incertidumbres tecnológicas

- **Escenario de Transición Global (GT):** Se enfoca en la contribución de Brasil para limitar el aumento de la temperatura global a 1,5°C, con un presupuesto de carbono de 13,2 GtCO₂ hasta 2050.

Se estima que para 2050, Brasil podría producir entre 21 y 32 millones de toneladas de hidrógeno, como se muestra en la Figura 29. La mayor parte de este volumen se obtendrá de forma indirecta, es decir, cuando el H₂ se utilice como vector intermedio para otras aplicaciones, como la producción de gas de síntesis y en pilas de combustible alimentadas con etanol.

FIGURA 29:

Proyecciones de producción de H₂ en Brasil

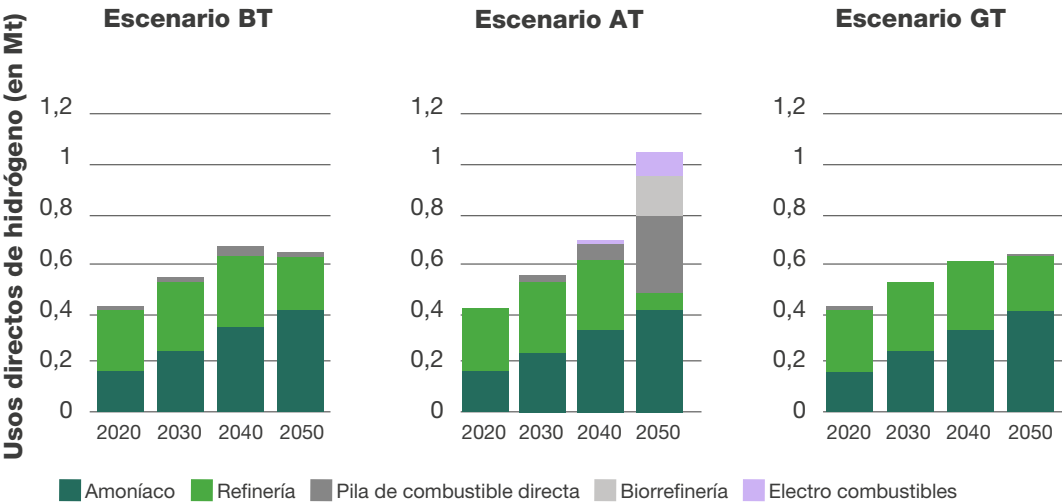


Fuente: Cebri y EPE, 2023

Las aplicaciones más importantes son las refinerías y la industria química (producción de amoníaco). En el escenario AT, el H₂ también se utiliza para producir combustibles avanzados y electrocombustibles y directamente en pilas de combustible para la industria del transporte. La Figura 30 muestra las aplicaciones directas del hidrógeno en cada escenario.

FIGURA 30:

Usos directos del hidrógeno en Brasil, en Mt, en los escenarios de neutralidad de carbono hasta 2050 proyectados para el país

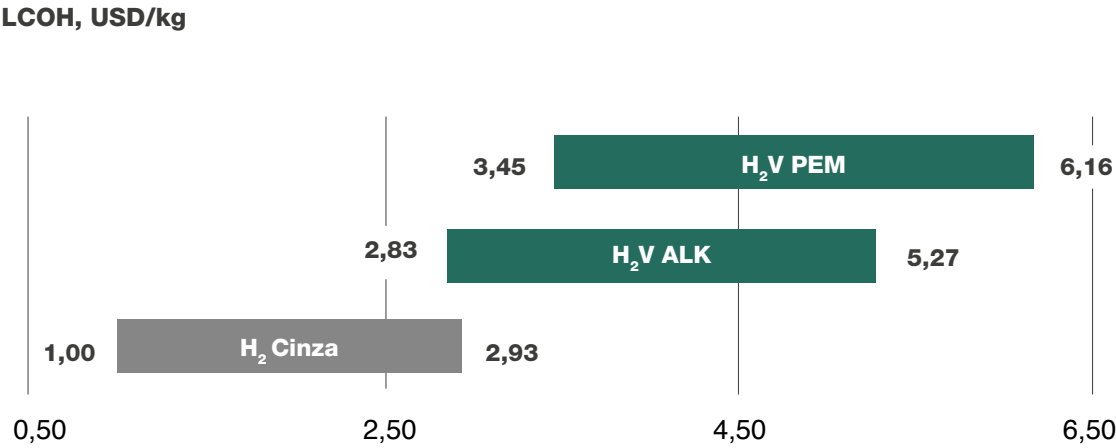


Fuente: Cebri y EPE, 2023

La Figura 31 presenta el Índice LCOH del H₂V en Brasil, según el análisis de Clean Energy Latin America (CELA). El LCOH del H₂V actual varía entre 2,83 USD/kg y 6,16 USD/kg, dependiendo del tipo de tecnología utilizada en la producción de hidrógeno. Los proyectos que utilizan electrolizadores del tipo electrolizador alcalino (ALK) tienen un LCOH aproximadamente 0,6 USD/kg menor en comparación con los electrolizadores con membrana de intercambio de protones (PEM), debido al menor valor de CAPEX. El LCOH máximo para hidrógeno gris es de 2,93 USD/kg, mientras que para H₂V con tecnología ALK varía de 2,83 a 5,27 USD/kg, y para PEM varía de 3,45 a 6,16 USD/kg.

FIGURA 31:

Índice actual de LCOH de H₂V de Brasil



Fuente: CELA, 2024

En la Figura 32 se presenta un resumen de los datos principales en Brasil.

FIGURA 32:

Datos principales en Brasil



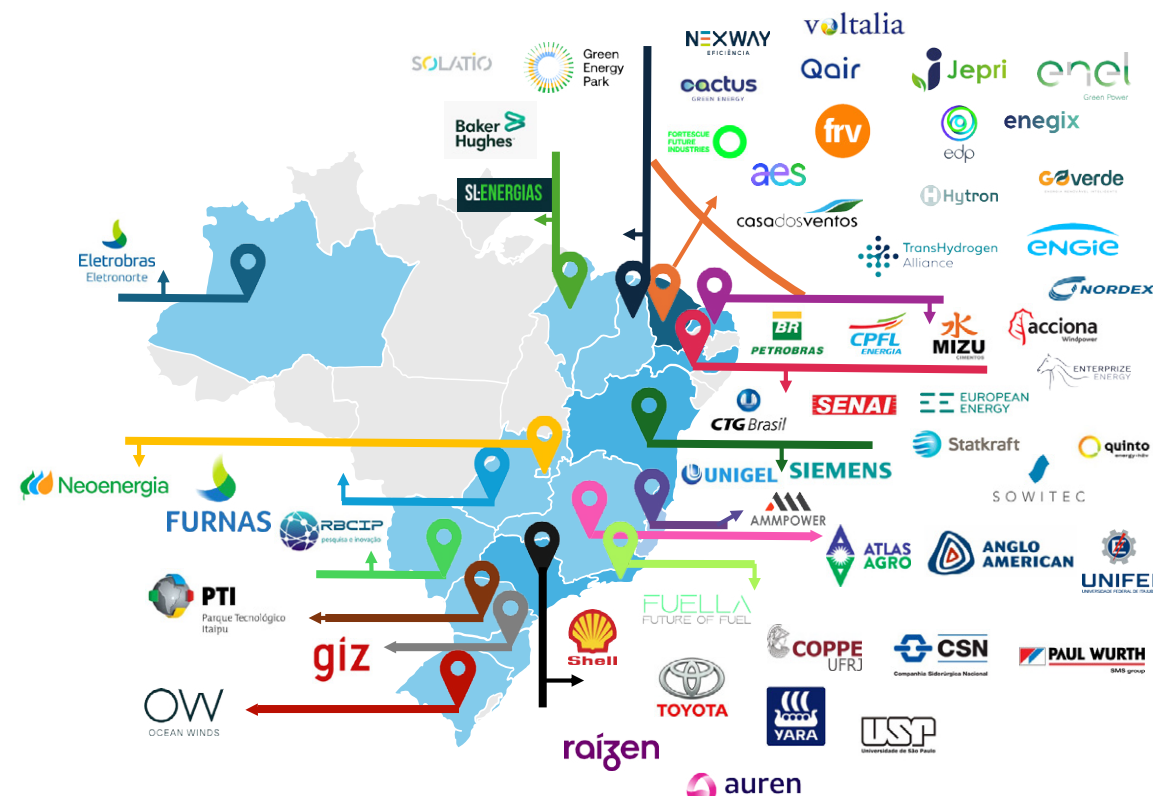
Fuentes: WEF, 2024; CELA, 2024; Cebri y EPE, 2023

Principales proyectos de producción de hidrógeno

Brasil está avanzando significativamente en el área de hidrógeno, con proyectos ambiciosos enfocados en la producción de H₂V. Estos proyectos se centran en iniciativas de gran escala en diversas regiones del país, buscando aprovechar recursos renovables, como la energía eólica y solar, para la producción sostenible de hidrógeno.

Hay más de 40 proyectos de hidrógeno identificados en Brasil, como muestra la Figura 33.

FIGURA 33:
Panorama de los proyectos de hidrógeno en Brasil



Fuente: elaboración propia, con base en datos de Plataforma H2LAC, 2024; Saraiva, 2024; Oliveira, 2022

Estos proyectos varían entre grandes plantas comerciales e iniciativas piloto orientadas al desarrollo tecnológico y la investigación. Debido al gran número de proyectos, la Figura 34 muestra sólo los proyectos en operación.

FIGURA 34:
Proyectos de hidrógeno en operación en Brasil



Fuente: elaboración propia, con base en datos de Plataforma H2LAC, 2024; Saraiva, 2024; Oliveira, 2022

Los proyectos en operación en Brasil incluyen:

- **EDP Pecem pilot:** Proyecto piloto en operación desde 2022. Cuenta con una planta solar de 3 MW y un electrolizador con capacidad para producir 250 Nm³/h de hidrógeno verde. El hidrógeno producido se destina a aplicaciones industriales y energéticas (EDP Brasil, 2023).
- **White Martins Pernambuco:** Proyecto a escala comercial en operación desde 2022, alimentado por energía solar fotovoltaica con una capacidad de producción de 156 ton H₂/año y una potencia instalada de 1,6 MW (Canal Energia, 2022).
- **FURNAS/Base Energia Sustentável:** Proyecto piloto en operación desde 2021 que busca explorar el papel del hidrógeno como solución para la gestión energética y el almacenamiento de energía en hidrógeno y baterías de litio. En 2023, alcanzó un récord de producción de 1,5 toneladas

de hidrógeno verde en la planta ubicada en la Usina Hidroeléctrica de Itumbiara, en Goiás (FURNAS, 2023) (Exame, 2023).

Además, las siguientes empresas ya han firmado un precontrato que garantiza la reserva de área en Porto de Pecém, Ceará, con un enfoque en la exportación: Fortescue Future Industries, Cactus Energia, Fotowatio Renewable Ventures, Casa dos Ventos/Comerc, AES Brasil, Voltalia y Fuella (Movimento Econômico, 2024).

También se destacan otros proyectos. CPFL Energia, en asociación con Mizu Cimentos, ya firmó un contrato en el que el hidrógeno producido se utilizará en la fabricación de cemento. Qair y Nordex están en proceso de solicitar una licencia ambiental. Green Energy Park and Baker Hughes, Solatio y Atlas Agro han iniciado proyectos de preingeniería. Yara y Raízen tienen una operación prevista para 2024 de sustitución del gas natural por biometano en la producción de urea.

Los proyectos de H₂V en Brasil cuentan con diversas fuentes de financiamiento. El Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social (BNDES) ha lanzado programas específicos para apoyar inversiones en energías renovables, incluyendo el hidrógeno verde (BNDES, 2022). Además, el gobierno brasileño ha firmado acuerdos con fondos internacionales, como el Climate Investment Funds (CIF), que prevé la liberación de 6.000 millones de reales para financiar proyectos de H₂V en el mundo (MME, 2024). Las empresas privadas también están invirtiendo significativamente. Por ejemplo, Brasil Fortescue Sustainable Industries Ltda anunció un proyecto en Ceará con una inversión de 17.500 millones de reales, enfocado en la producción a gran escala de H₂V (MDIC, 2024).

• Proyectos de infraestructura y consumo de hidrógeno

Según PNH₂, Brasil pretende difundir plantas piloto de hidrógeno bajo en carbono en todas las regiones del país hasta 2025; para 2030 consolidarse como el productor de hidrógeno bajo en carbono más competitivo del mundo; y para 2035 establecer *hubs* de hidrógeno bajo en carbono. Dos grandes *hubs* ya destacan en el país:

- **Complejo Pecém (CE):** Uno de los principales polos de producción de hidrógeno en Brasil, Pecém combina una excelente infraestructura

portuaria con incentivos fiscales para atraer inversiones. Este *hub* ya cuenta con seis precontratos firmados y se beneficia de una ubicación estratégica para exportaciones a Europa, Estados Unidos y Asia.

- **Puerto de Açu (RJ):** Otro *hub* emergente para la producción de H₂V, el Puerto de Açu se destaca por su proximidad al mercado consumidor y por su capacidad de exportación, con proyectos planeados para producir hasta 4 GW de hidrógeno.

Pecém se destaca como pionero en la producción de H₂V en Brasil. En enero de 2023, EDP Brasil produjo la primera molécula de hidrógeno verde del país en su unidad en ese complejo de más de 19.000 hectáreas, una infraestructura robusta en una ubicación geográfica privilegiada (Gobierno del Estado de Ceará, 2023).

Desde febrero de 2021, el gobierno de Ceará ha firmado más de 30 memorandos de entendimiento con empresas nacionales e internacionales interesadas en invertir en el Hub de Hidrógeno Verde del estado. Esta iniciativa, en colaboración con la Universidad Federal de Ceará y la Federación de Industrias de Ceará, busca aprovechar el potencial de energías renovables de la región para producir H₂V a gran escala.

De estos acuerdos, siete han evolucionado a precontratos. Fortescue, una minera australiana, planea instalar una planta de H₂V en Pecém y ha iniciado el proceso de licencia ambiental para un proyecto de hidrógeno verde a gran escala en Brasil. AES Brasil tiene como objetivo producir hidrógeno verde en el complejo. Casa dos Ventos, en asociación con Comerc Eficiência, planea una unidad de producción de H₂V y amoníaco verde con capacidad de hasta 2,4 GW de electrólisis, que produciría más de mil toneladas de hidrógeno por día. Cactus Energia Verde firmó un precontrato para instalar una planta con capacidad para producir 190 kilotoneladas de hidrógeno renovable y más de un millón de toneladas de amoníaco verde por año. Voltalia suscribió un precontrato para instalar una planta de producción de hidrógeno y amoníaco verdes con una inversión estimada de USD 3.000 millones. Fotowatio Renewable Ventures anunció planes para invertir en el desarrollo de un proyecto de hidrógeno verde de 2 GW. Finalmente, Fuella AS planea construir una planta industrial de H₂V en la Zona de Procesamiento de Exportación (ZPE) del Puerto de Pecém, con una capacidad de producción de 400 mil toneladas anuales de amoníaco verde (Gobierno del Estado de Ceará, 2024), (Movimento Econômico, 2024).

En el sureste, el Puerto de Açu se consolida como otro *hub* estratégico para la producción y exportación de hidrógeno verde. En mayo de 2022, Shell Brasil y el Puerto de Açu firmaron un memorando de entendimiento para desarrollar una planta piloto de generación de H₂V en las instalaciones del puerto, la primera de este tipo en entrar en operación en Brasil (Porto do Açu, 2022). En agosto de 2024, la empresa noruega Fuella AS y Prumo Logística reservaron un área en el *hub* de hidrógeno del Puerto de Açu, con el objetivo de construir una planta de amoníaco verde con una capacidad de producción anual de 400.000 toneladas, con la decisión final de inversión prevista para los próximos cuatro años (Porto do Açu, 2024).

Brasil aún enfrenta desafíos en la implementación de infraestructuras adecuadas para la producción, transporte y almacenamiento de hidrógeno. Sin embargo, la abundancia de recursos naturales y el apoyo gubernamental convierten al país en una de las promesas globales en la producción de H₂V, con oportunidades de liderazgo en el mercado internacional y una reducción significativa de las emisiones de carbono.

CHILE

La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde-Chile, lanzada en 2020, presenta un ambicioso plan para desarrollar una industria de H₂V, aprovechando el potencial de energía renovable del país (Ministerio de Energía de Chile, 2020). Según datos del Coordinador Eléctrico Nacional (CEN) de 2023, la generación de energía renovable en Chile representó el 61% de la generación total (CEN, 2024). La energía hidroeléctrica contribuyó con 29%, seguida de la energía solar con 20% y la eólica con 12%.

La Figura 35 presenta la generación real de energía en Chile, segmentada por región y tipo de tecnología. Se observa que las tecnologías predominantes varían según la ubicación geográfica:

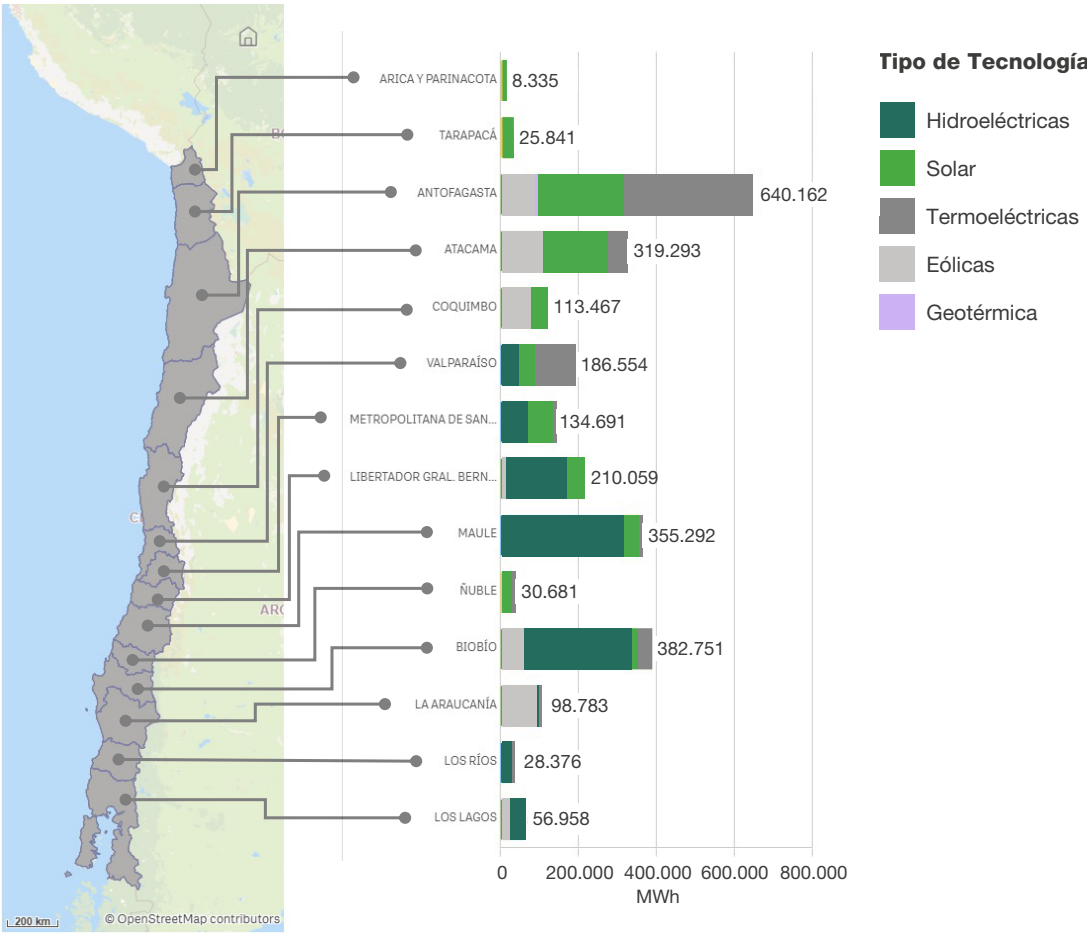
1. **Energía solar:** Tiene una fuerte presencia en el norte del país, especialmente en las regiones de Antofagasta y Atacama, debido a la alta

radiación solar en esta zona.

2. **Hidroeléctrica:** Predomina en las regiones del sur, como Biobío, Maule y Los Lagos, aprovechando la abundancia de recursos hídricos.
3. **Energía eólica:** Aparece de forma complementaria en varias regiones, destacándose en Libertador General Bernardo O'Higgins y Biobío.
4. **Geotérmica:** Aunque presente, su contribución es menor en comparación con las otras tecnologías.

La energía termoeléctrica aún tiene una presencia significativa, especialmente en Antofagasta, pero se espera que sea reemplazada progresivamente por fuentes más limpias.

FIGURA 35:
Generación renovable de Chile

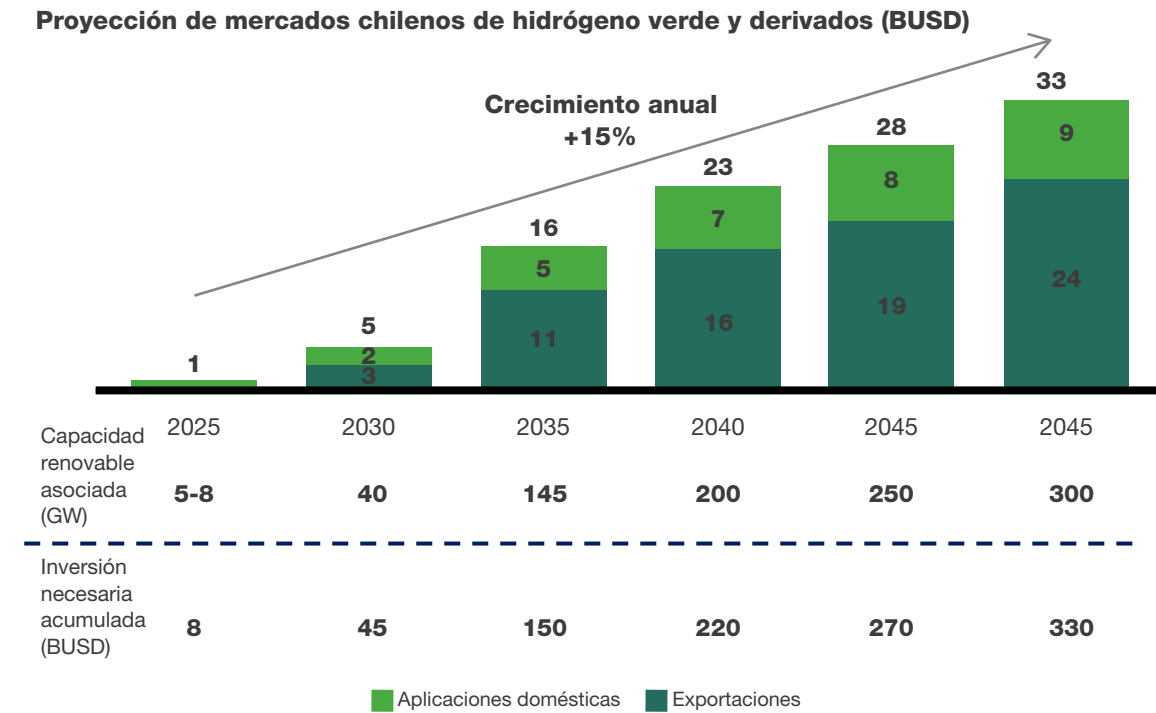


Fuente: CEN, 2024

Chile tiene el objetivo de alcanzar 5 GW de capacidad instalada de electrolizadores para el año 2025 y 25 GW para 2030, inicialmente para descarbonizar el uso doméstico de hidrógeno antes de comenzar con las exportaciones de H₂V después de 2030. Las autoridades chilenas han estimado un valor de mercado de USD 23 mil millones para el H₂V, de acuerdo con los usos y exportaciones del mercado local.

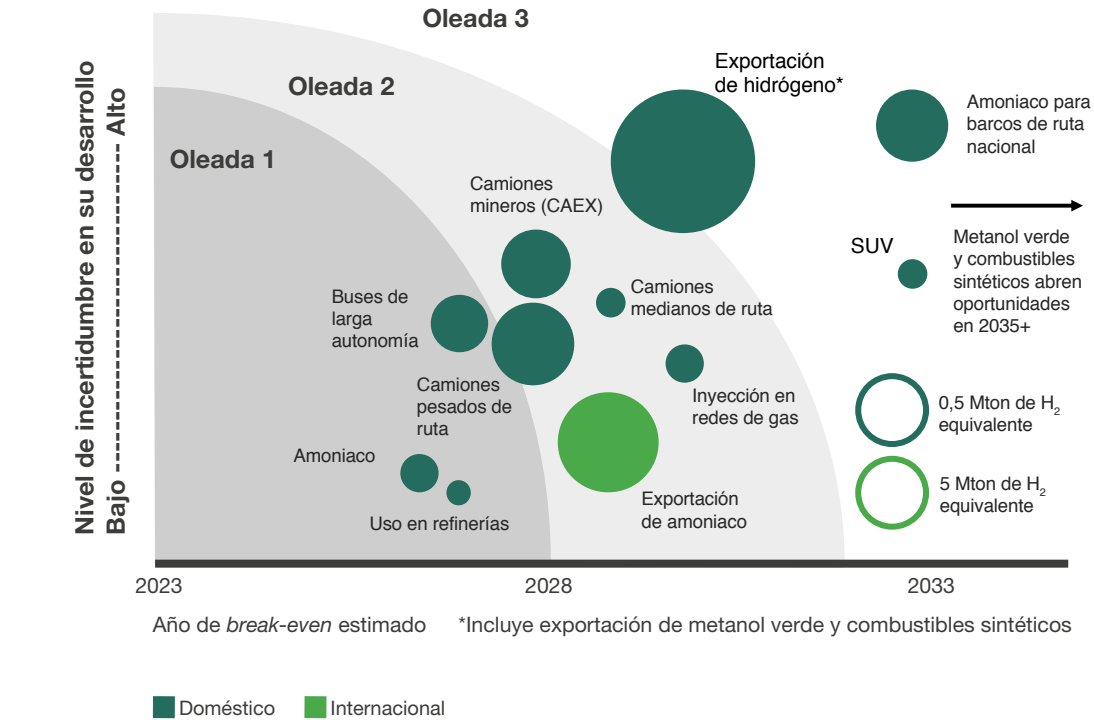
La exportación posee un rol relevante dentro de las aspiraciones y objetivos nacionales, tal como se desprende de la Figura 36 y de la Figura 37. El Ministerio estima que Chile tiene el potencial de producir hasta 160 Mton H₂/año de H₂V y estima que el país podría posicionarse como el principal exportador a bajo costo para 2040.

FIGURA 36:
Proyecciones de mercados chilenos de H₂V y derivados



Fuente: Ministerio de Energía de Chile, 2020

FIGURA 37:
Desarrollo proyectado de aplicaciones del H₂V

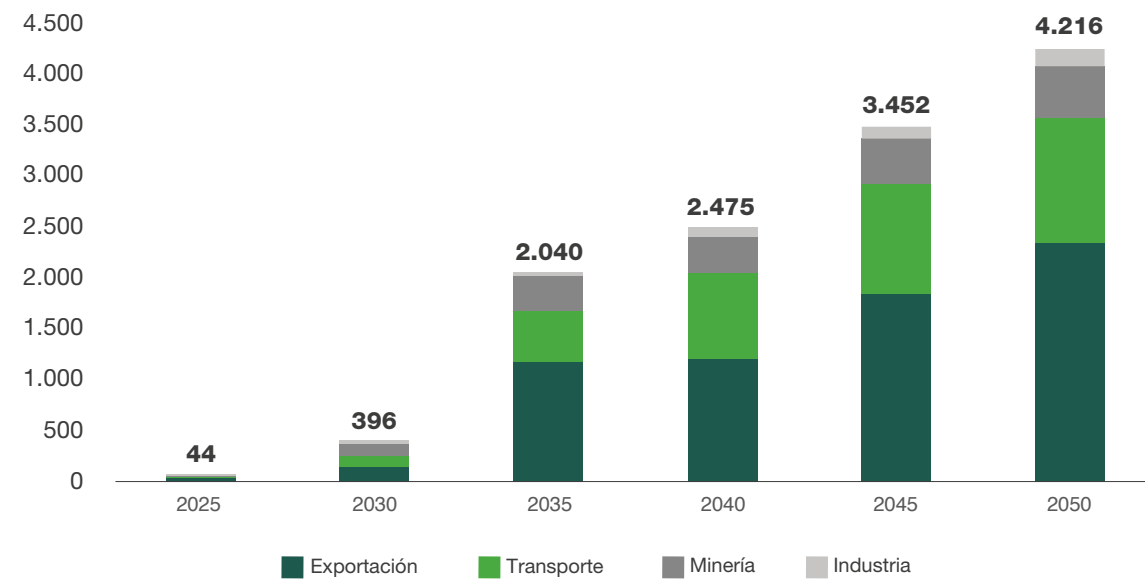


Fuente: Ministerio de Energía de Chile, 2020

Se proyecta que la demanda de H₂, tanto interna como externa, crecerá hasta 2050, con el sector externo como el principal impulsor, especialmente para la exportación de amoníaco, metanol y e-combustibles. En el mercado interno, el sector del transporte será el mayor consumidor, seguido por la minería y la industria a partir de 2030, como muestra la Figura 38.

FIGURA 38:

Proyección de demanda por H₂V (kton H₂), según destino, en escenario consistente con carbono neutralidad al 2050

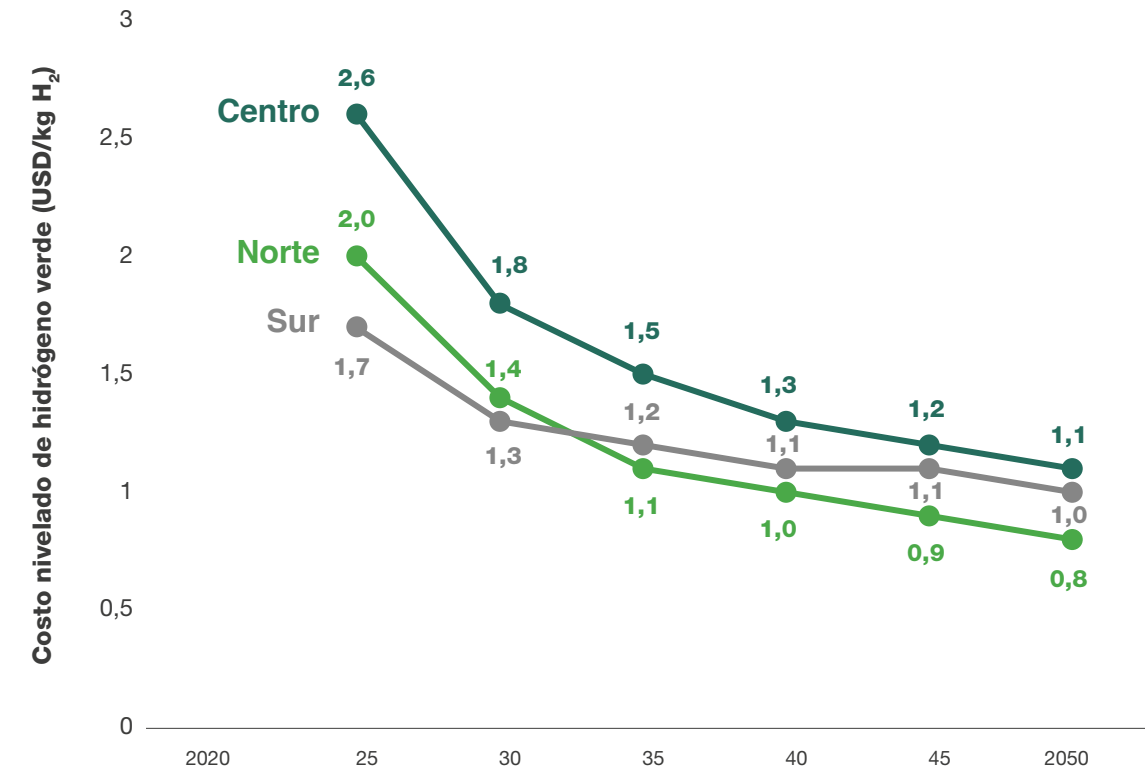


Fuente: Banco Central de Chile, 2024

Según la Estrategia Nacional, la reducción de costos en electrolizadores y generación renovable permitirá que el H₂V sea competitivo tanto a nivel nacional como internacional. La disponibilidad creciente de financiamiento verde y los beneficios fiscales en zonas extremas también favorecerán los modelos de negocio relacionados con este combustible limpio en Chile. Se estima que el H₂V producido en el Desierto de Atacama y la Región de Magallanes tendrá el costo de producción más bajo del mundo para 2030, gracias a la alta calidad de los recursos renovables en estas áreas, lo que facilitará una producción competitiva a gran escala. Las proyecciones de costo nivelado de H₂V se muestran en la Figura 39.

FIGURA 39:

Proyecciones de costo nivelado de H₂V (USD/kg H₂)



Fuente: Ministerio de Energía de Chile, 2020

En la Figura 40 se presenta un resumen de los datos principales en Chile.

FIGURA 40:

Datos principales en Chile



Fuente: WEF, 2024
*Valores de LCOH/kg y de capacidad renovable de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde en Chile.

● Principales proyectos de producción de hidrógeno

El país posee más de 60 proyectos de H₂V en operación, en desarrollo y anunciados, como muestra la Figura 41. El más grande planea producir a escala de MW para 2024, antes de expandirse a escala de GW a partir de entonces. Para lograr este objetivo, Chile necesitaría atraer inversiones necesarias acumuladas por un valor total de alrededor de USD 300 mil millones hasta 2050, según su Estrategia Nacional. Sin embargo, también enfrenta barreras para el desarrollo de H₂V, como la disponibilidad de agua en algunas áreas, la necesidad de construir una nueva infraestructura de transporte de hidrógeno y la distancia de los mercados clave, particularmente Europa.

FIGURA 41:

Panorama de los proyectos de hidrógeno en Chile



Fuente: Asociación Chilena del Hidrógeno, s.d.

En 2017, Chile inauguró su primera planta de H₂V, un sistema híbrido de energía solar, baterías e hidrógeno en Antofagasta para abastecer el campamento Cerro Pabellón. Otros proyectos clave incluyen la planta de Anglo American, que utiliza H₂V para montacargas en una mina, y Haru Oni, pionero en combustibles electrónicos a base de hidrógeno en Magallanes. Además, el proyecto H2GN busca inyectar H₂V en las redes de gas natural de Coquimbo, beneficiando a más de 1.800 hogares (Energía Estratégica, 2021).

Debido al gran número de proyectos, la Figura 42 muestra sólo los proyectos en operación.

FIGURA 42:

Proyectos de hidrógeno en operación en Chile



Fuente: elaboración propia, con base en datos de Plataforma H2LAC, 2024

La siguiente síntesis de los proyectos principales de hidrógeno en operación se basa en información del Atlas H₂LAC, del informe LAC Clean Hydrogen Action y de la Asociación Chilena de Hidrógeno.

- 1. Cerro Pabellón Microgrid:** Proyecto piloto en operación desde 2017 que combina energía solar fotovoltaica con almacenamiento de hidrógeno. Este sistema incluye un almacenamiento de hidrógeno de 450 kWh y una batería de litio de 132 kWh, y su producción se destina tanto a la demanda interna como a la exportación (Enel Chile, 2017).
- 2. H2GN Power-to-Gas Coquimbo:** Proyecto piloto en operación desde 2022 que emplea energía solar fotovoltaica y una potencia de electrólisis de 150 kW. El hidrógeno producido se utiliza en mezcla con gas natural, promoviendo la integración de hidrógeno en el sistema de gas existente (Ministerio de Energía de Chile, 2022).

- 3. Wally - Walmart Quilicura forklifts:** ENGIE y Walmart inauguraron en 2023 la primera planta industrial de hidrógeno verde de ALC, ubicada en el Centro de Distribución de Quilicura, Chile. Con una inversión de aproximadamente 15 millones de dólares, el proyecto reemplaza las baterías de plomo-ácido de 200 grúas horquillas por celdas de energía de hidrógeno verde, mejorando la productividad y evitando la generación de 250 toneladas de desechos tóxicos al año (ENGIE Chile, 2023).
- 4. Proyecto H₂V Toyota Chile:** Proyecto piloto con inauguración programada en 2024. Su principal objetivo es suministrar una carga completa de hidrógeno a un vehículo Toyota Mirai en sólo cinco minutos, a fin de fomentar la construcción de la infraestructura de carga para vehículos de hidrógeno (Toyota Chile, s.d.).
- 5. Hydrogen Generation Unit - H₂V LasTortolas:** Proyecto piloto en operación desde 2021, que se destaca como el primer generador de hidrógeno para vehículos de cero emisiones de carbono en Chile, ubicado en la Planta Las Tórtolas. La electricidad proviene de dos plantas solares de 86 kW y 100 kW, y el agua utilizada en el proceso de minería se reutiliza en un electrolizador con capacidad de producción de 2 kg H₂/día (Anglo American, 2021).
- 6. Haru Oni, phase 1 (HIF Global, s.d.):** Proyecto piloto en operación desde 2022 que utiliza una turbina eólica de 3,4 MW para generar electricidad renovable y producir 130.000 litros de e-gasolina al año a partir de metanol, con un electrolizador de 1,2 MW. Este proyecto está destinado a la producción de H₂V y la creación de e-combustibles.

En el norte de Chile, AES Andes está desarrollando un proyecto de amoníaco que requerirá 850 MW de nueva capacidad renovable, mientras que Airliquide está implementando un piloto con autobuses impulsados por H₂V para transportar trabajadores a las minas. Copec también planea crear una estación de abastecimiento de hidrógeno para autobuses. TCI GCOMP, con el proyecto HOASIS, busca instalar una planta de electrólisis con capacidad de 3 GW para generar H₂V y promover la economía circular (Energía Estratégica, 2021).

En el centro-sur, la alianza entre Enagas, Acciona y GNL Quinteros está desarrollando el proyecto Bahía Quintero Green Hydrogen, que tiene como objetivo descarbonizar la matriz energética del país y restaurar el medio

ambiente de Puchuncaví y Quintero. Engie y Walmart están generando H₂V para montacargas, y TCI Gecomp planea utilizar H₂V en camiones forestales. CAP, en colaboración con Paul Wurth, desea incorporar H₂V en su producción de acero. Finalmente, AustriaEnergy y Ökowind están desarrollando el proyecto HNH Energy, que producirá 850 mil toneladas de amoníaco verde para la exportación (Energía Estratégica, 2021).

• Proyectos de infraestructura y consumo de hidrógeno

La Empresa Nacional de Petróleo (ENAP) está desarrollando infraestructura estratégica para impulsar la industria de H₂V en la región de Magallanes, en el sur de Chile. Entre los proyectos más destacados está la reconfiguración del terminal marítimo de Laredo, que tiene como objetivo transformar en un centro industrial de H₂V. En Gregorio, la ENAP está trabajando en asociación con seis empresas para desarrollar el mayor complejo industrial de H₂V de la región. Además, está construyendo su primera planta de H₂V en Cabo Negro, con la expectativa de producir las primeras moléculas hasta finales de 2025, utilizando energía renovable del parque eólico Vientos Patagónicos, del cual la ENAP es socia mayoritaria. Estos proyectos buscan posicionar a Magallanes como un polo global en la producción y exportación de H₂V (ENAP, 2024).

Además, Punta Arenas, situada en el sur de Chile, ha emergido como un punto estratégico en el transporte marítimo global, atrayendo la atención de Estados Unidos y China (Garip, 2024). Esto se intensifica debido a factores como el cambio en las rutas marítimas causadas por conflictos en el Medio Oriente, las alteraciones climáticas que afectan al Canal de Panamá y el creciente interés en industrias sostenibles, como el H₂V. Sin embargo, la infraestructura portuaria de Punta Arenas es limitada y necesita mejoras significativas para atender el aumento del tráfico y el potencial desarrollo de proyectos de H₂V.

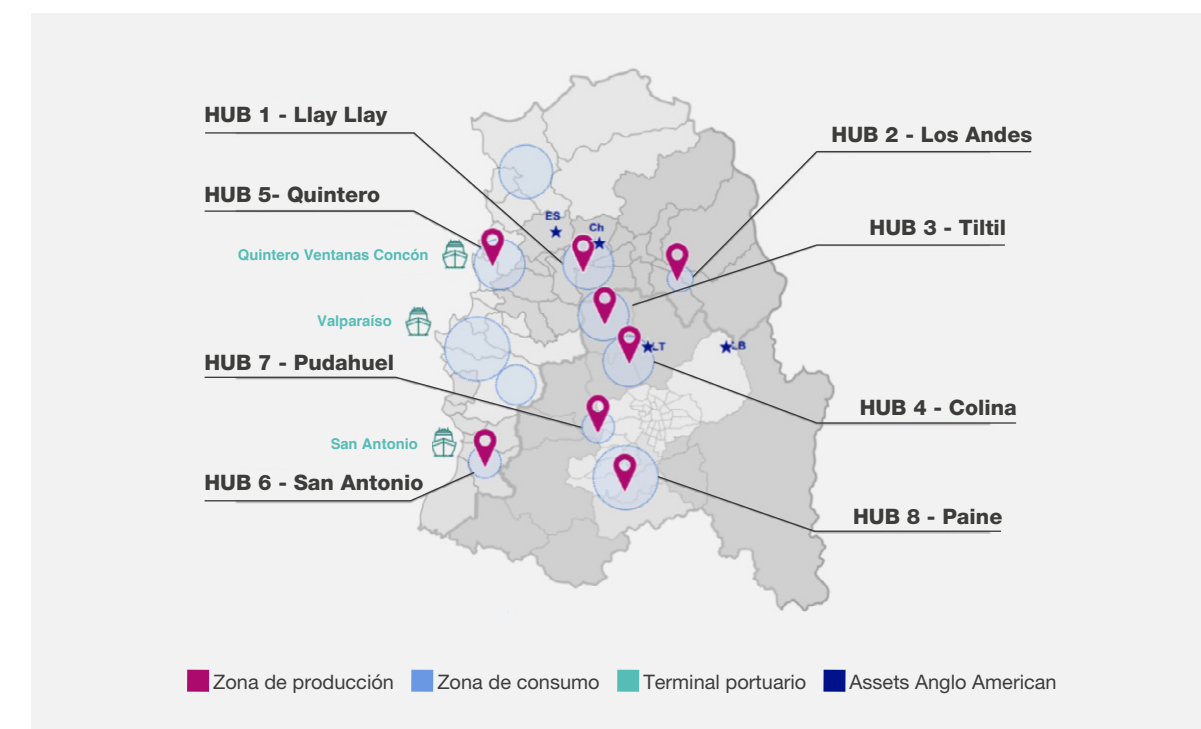
En el norte de Chile, Paracelsus Atacama Hidrógeno Hub es un proyecto de electrólisis a gran escala ubicado en el desierto de Atacama, cuyo propósito es exportar H₂V a nivel mundial (Paracelsius, s.d.). El plan incluye la construcción de una planta fotovoltaica aislada para proporcionar energía a una instalación de electrólisis de 2 GW, una planta desalinizadora para asegurar el suministro

de agua y un gasoducto que vinculará la instalación de H₂V con la planta de transformación y almacenamiento en la bahía de Mejillones, así como la conexión final al puerto de carga.

Un estudio realizado por Anglo American analizó la viabilidad de crear un valle de H₂V en la región central de Chile, identificando ocho áreas con potencial para convertirse en centros de desarrollo de este combustible: Llay Llay, Quintero, Pudahuel, San Antonio, Los Andes, Tiltit, Colina y Paine, como muestra la Figura 43. La investigación estimó que la demanda de H₂V en Chile puede llegar a 800.000 toneladas anuales hasta 2040, especialmente proveniente de camiones de carga y autobuses intermunicipales.

FIGURA 43:

Ocho potenciales *hubs* de producción y demanda de hidrógeno en la zona central de Chile



Fuente: Review Energy, 2023

La Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) ha implementado medidas para estimular la inversión privada en la industria del H₂V. En junio de

2023, el gobierno chileno presentó un Fondo para el Desarrollo del Hidrógeno Verde, que comenzará a operar en el segundo semestre de 2024, con un capital inicial de USD 1.000 millones. Este fondo, financiado por préstamos y aportes de organismos internacionales como CAF–el banco de desarrollo de América latina y El Caribe, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Banco Mundial y el Banco de Desarrollo de Alemania (KfW), busca catalizar la inversión privada en proyectos de producción y demanda de H₂V, mitigando riesgos y reduciendo costos para acelerar la materialización de inversiones en el país (CORFO, 2023).

En diciembre de 2024, una colaboración público-privada entre Anglo American, Colbún y Reborn Electric Motors, con el respaldo de la CORFO, presentó el primer autobús a hidrógeno fabricado íntegramente en Chile. Este vehículo, diseñado para operar en entornos industriales, urbanos y rurales, tiene capacidad para 24 pasajeros y una autonomía de hasta 600 kilómetros, combinando carga de hidrógeno y batería. La iniciativa, que requirió una inversión de aproximadamente USD 820.000, se enmarca en la estrategia nacional de transformación energética y descarbonización del sector transporte. Se espera que las pruebas operativas comiencen en 2025, incluyendo demostraciones en comunidades e instituciones educativas, con miras a fomentar la movilidad sostenible (CORFO, 2024).

COLOMBIA

Según datos de Compañía Expertos en Mercados (XM), la capacidad renovable del SIN en Colombia es de aproximadamente 70% (XM, 2024). En términos de generación, según datos de IEA, la generación renovable alcanzó, en 2023, 66% de la generación total, con la energía hidroeléctrica como principal fuente, con 63% de la generación (IEA, 2024c). Otras contribuciones menores incluyen la biomasa, la energía solar y la eólica. La Hoja de Ruta también resalta el potencial de las energías renovables en Colombia, particularmente el uso de energía eólica y solar. En la región de La Guajira se identifica un gran potencial para la producción de H₂V, con una capacidad de 25 GW en eólica *onshore* y 45 GW en solar.

A corto plazo, el hidrógeno azul se presenta como la opción de bajas emisiones más viable en Colombia, especialmente si se utilizan las infraestructuras industriales existentes. Sin embargo, la reducción en las reservas de gas plantea desafíos para la producción de hidrógeno azul, ya que esta depende de combustibles fósiles.

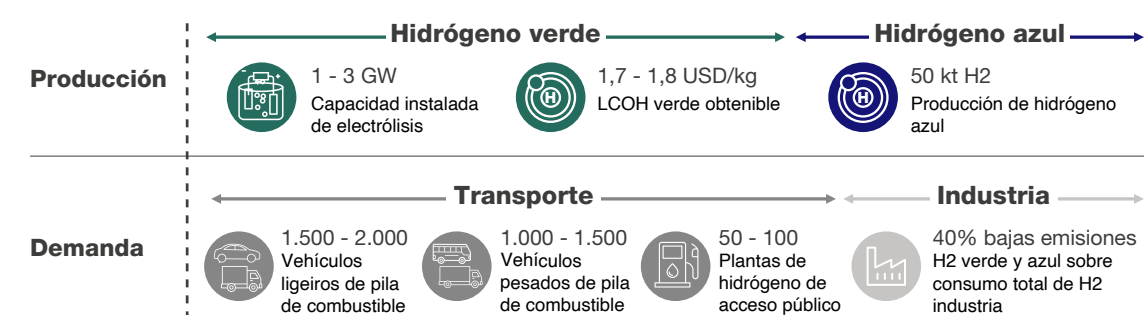
La estrategia de la Hoja de Ruta del Hidrógeno aborda los tipos de hidrógeno que Colombia planea producir, destacando el hidrógeno azul y el verde (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2021). Aunque Colombia posee reservas de gas natural y carbón, informes recientes indican que las reservas probadas de gas natural han disminuido, situándose en 2,37 terapiés cúbicos al cierre de 2023, lo que equivale a 6,1 años de consumo (La República, 2023).

A corto plazo, el hidrógeno azul se presenta como la opción de bajas emisiones más viable en Colombia, especialmente si se utilizan las infraestructuras industriales existentes. Sin embargo, la reducción en las reservas de gas plantea desafíos para la producción de hidrógeno azul, ya que esta depende de combustibles fósiles. Actualmente, se producen 155 kton H₂/año de hidrógeno gris, consumido principalmente en refinerías (84%), producción de fertilizantes (12%) y otros usos (4%) (Asociación Hidrógeno Colombia, 2023).

Colombia ha establecido una estrategia nacional de hidrógeno de bajas emisiones hasta 2050, con metas específicas para 2030. Entre 2020 y 2030, como se muestra en la Figura 47, el enfoque se centrará en desarrollar entre 1 y 3 GW de capacidad de electrólisis y en producir H₂V a un costo competitivo de 1,7 a 1,8 USD/kg en zonas con alto recurso renovable, como La Guajira. Además, se proyecta la producción de 50 kton H₂ de hidrógeno azul.

En términos de demanda, se prevé la introducción de hasta 2.000 vehículos ligeros y 1.500 vehículos pesados con pila de combustible. También se buscará crear red de 50 a 100 plantas de hidrógeno públicas, con el objetivo de que el 40% del hidrógeno consumido en el sector industrial provenga de fuentes de bajas emisiones.

FIGURA 44:
Metas de Colombia en materia de hidrógeno de bajas emisiones a 2030



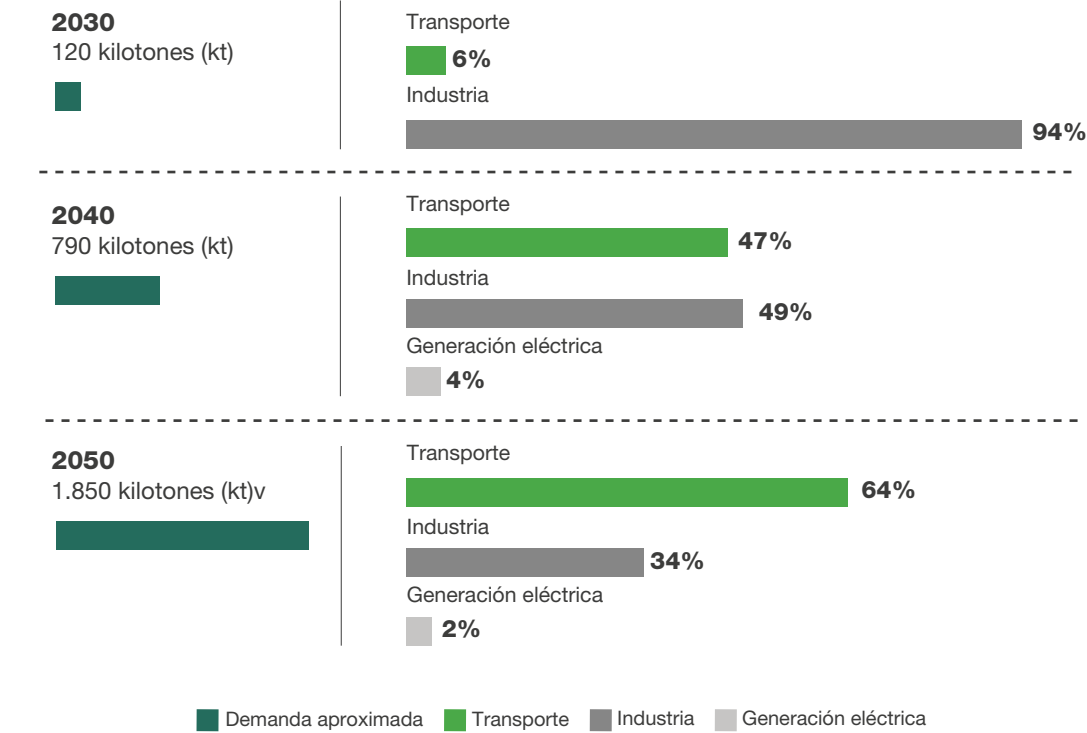
Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2021

Sin embargo, para 2030, la producción de H₂V en las regiones con los mejores recursos eólicos del país, especialmente en la zona Caribe Norte (que incluye La Guajira, Magdalena, Atlántico, Sucre, Norte de Cesar y Norte de Bolívar), comenzará a ser la alternativa más competitiva. De hecho, entre 2030 y 2040 se espera que coexistan el hidrógeno azul y el verde, dependiendo de los recursos naturales disponibles para la producción en cada región de Colombia. A partir de 2040, se anticipa que el H₂V se convierta en la opción más competitiva en todo el país.

A corto plazo, en términos de demanda interna, se proyecta un crecimiento moderado de la nueva demanda de hidrógeno de bajas emisiones, alcanzando las 120 kton H₂/año en 2030. Esto incluye una sustitución parcial de las 155 kton de hidrógeno gris que se consumen actualmente, así como algunos nuevos usos. A largo plazo, específicamente entre 2040 y 2050, se espera la consolidación de nuevos usos de hidrógeno de bajas emisiones en Colombia, con una demanda interna estimada de aproximadamente 1.850 kton H₂ hacia finales de este

período. La evolución prevista de la nueva demanda de hidrógeno se muestra en la Figura 45.

FIGURA 45:
Estimaciones de la demanda interna del hidrógeno en Colombia entre 2030 y 2050



Fuente: La República, 2023

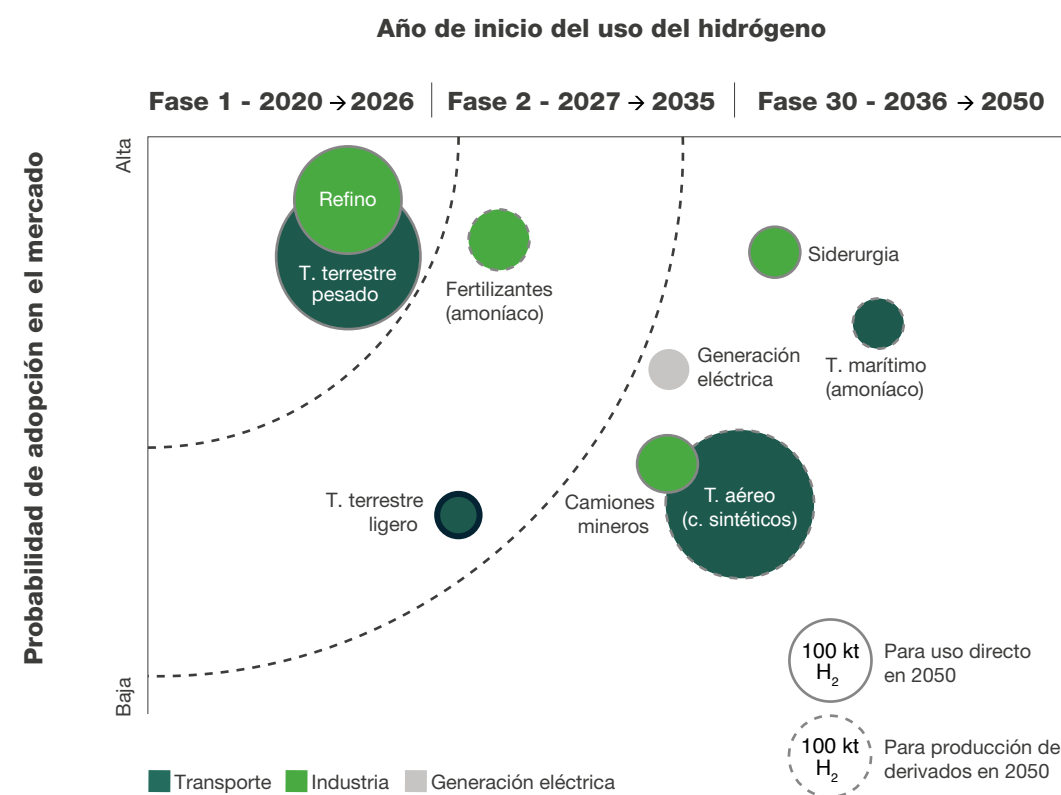
Hasta 2050, el objetivo es explorar el potencial del H₂V y su aplicación en sectores como la aviación, la siderurgia y el transporte marítimo, además de promover la descarbonización de sectores difíciles de descarbonizar, desarrollar la industria local y aumentar la resiliencia energética del país. Los mercados potenciales para Colombia, una vez que se fortalezca la generación de hidrógeno, incluyen Japón, China, Estados Unidos, India y parte de Europa.

La expectativa de penetración del hidrógeno en cada subsector se resume en la Figura 46. La adopción del hidrógeno ocurrirá en tres fases.

- **Primera fase (2020-2026):** se utilizará principalmente en refinerías y en el transporte pesado.
- **Segunda fase (2027-2035):** el hidrógeno se volverá competitivo en nuevos sectores, como la producción de fertilizantes y vehículos ligeros.
- **Tercera fase (2036-2050):** se prevé una adopción masiva, especialmente en el transporte marítimo, aéreo y en la producción de acero. El refino (refinación) y el transporte pesado serán los primeros en alcanzar la paridad de costos con los combustibles fósiles.

FIGURA 46:

Desarrollo de las aplicaciones de hidrógeno de bajas emisiones en Colombia

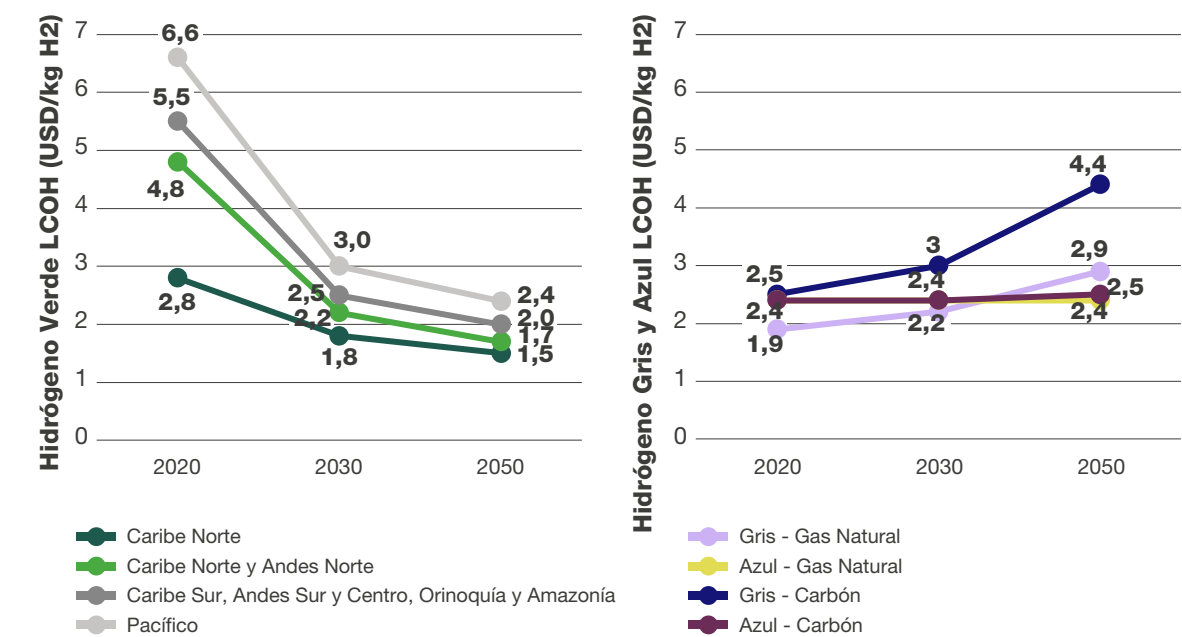


Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2021

La Figura 47 muestra que el hidrógeno azul mantiene un LCOH relativamente estable. Esto se debe a la compensación entre la disminución de los costos de las tecnologías de captura de CO₂ y el aumento de los precios del gas y del carbón. En contraste, el hidrógeno gris, que no incluye captura de CO₂, experimentará un aumento en su LCOH debido al incremento de los costos asociados a las emisiones de CO₂. Por otro lado, el H₂V, generado a partir de fuentes de energía renovable, podría alcanzar un costo competitivo de aproximadamente 1,8 USD/kg para 2030, especialmente en regiones con alto potencial eólico, como el Caribe Norte.

FIGURA 47:

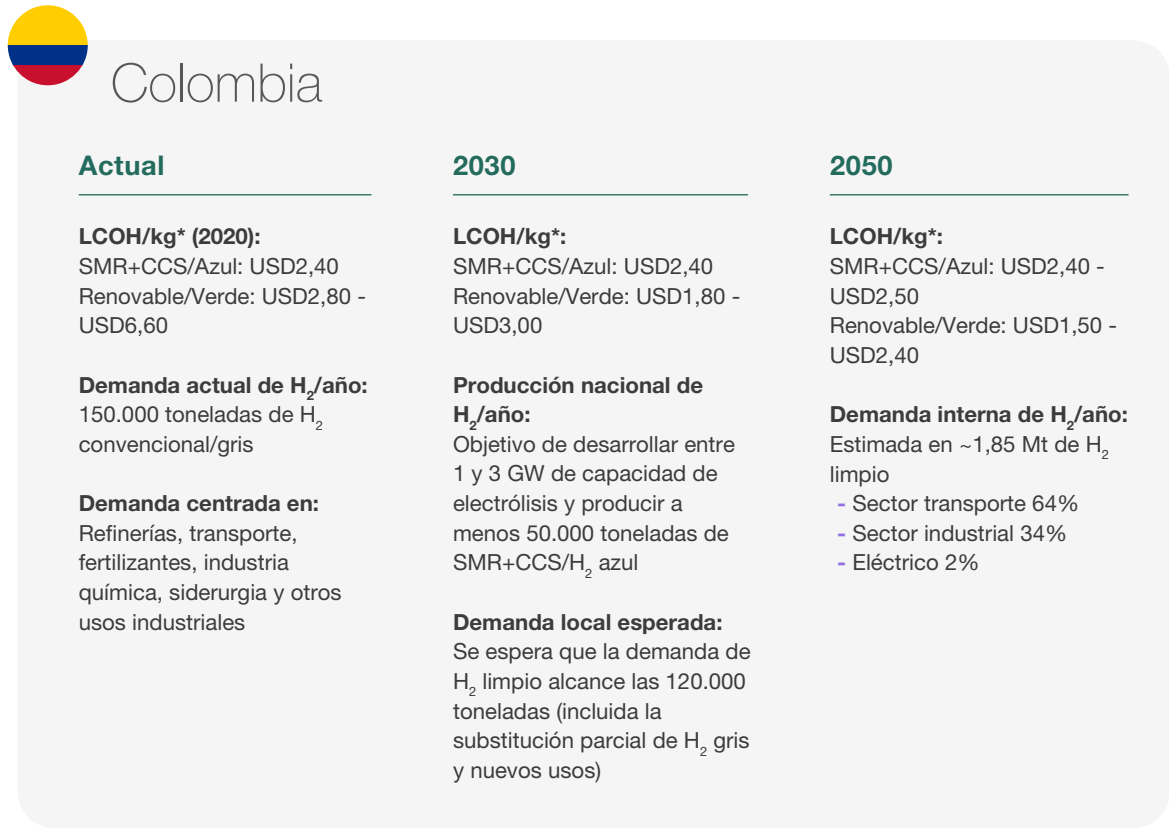
Proyección de costos de H₂ verde por regiones, y del H₂ azul y H₂ gris en Colombia



Fuente: elaboración propia, con base en datos del Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2021

En la Figura 48 se presenta un resumen de los datos principales en Colombia.

FIGURA 48:
Datos principales en Colombia



Fuente: WEF, 2024
* Datos de precio LCOH presentes en el informe La Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia

• Principales proyectos de producción de hidrógeno

Colombia tiene 5 proyectos en operación y más de 20 proyectos de hidrógeno en desarrollo o anunciados, como se muestra en la Figura 49.

FIGURA 49:
Proyectos de hidrógeno en Colombia



Fuente: elaboración propia, con base en datos de IEA, 2024b y LAC Clean Hydrogen Action, 2024

La información sobre los proyectos principales de hidrógeno en operación es de Atlas H₂LAC y del informe LAC Clean Hydrogen Action:

- **Ecopetrol:** Proyecto piloto en operación desde la primera mitad de 2022, que utiliza un electrolizador PEM de 50 kW en la refinería de Cartagena, con una capacidad de producción de 20 kg de hidrógeno por día. El proyecto emplea agua industrial de la refinería para la producción de hidrógeno renovable y tiene como objetivo recopilar información sobre la operación, mantenimiento, confiabilidad y escalabilidad de las tecnologías utilizadas, con el fin de reemplazar en el futuro el uso actual de hidrógeno gris en el proceso de refinación (Ecopetrol, 2021).
- **Promigas:** Proyecto piloto en operación desde 2022, que emplea energía solar para producir 1,57 ton H₂/año. El hidrógeno producido se inyecta en la red de gas natural, contribuyendo a la integración de fuentes de energía renovable en el suministro de gas (Promigas, 2022).
- **Estación Andes:** Proyecto piloto en operación desde julio de 2022, con una capacidad de producción de 1 ton H₂/día. Este proyecto tiene como objetivo probar la tecnología y promover el conocimiento en la producción y gestión de hidrógeno. Se utiliza Hyundai Nexa como el vehículo ligero con celdas de combustible. La empresa proyecta una expansión significativa de capacidad, planeando aumentar esta producción a 10 ton H₂/día para 2025, con una inversión adicional de USD 25 millones (La República, 2022).
- **Proyecto SENECA:** Proyecto piloto en operación desde 2023. Es una iniciativa conjunta de la Universidad de La Guajira y la Universidad de Antioquia. Esta planta produce H₂V con energía eólica y solar. El sistema cuenta con un aerogenerador y paneles solares con una potencia nominal de 5 kW y 10 kW, respectivamente, lo que permite producir 1 Nm³ de hidrógeno por hora. El hidrógeno producido se inyecta en la red de gas, apoyando la diversificación de las fuentes energéticas y la sostenibilidad del suministro de gas (Estás Sucediendo, 2023).

• Proyectos de infraestructura y consumo de hidrógeno

Colombia está buscando la implementación de *hubs* de H₂V. Uno de ellos es el Hidrógeno Atlántico II, que TW Solar está desarrollando con un electrolizador PEM de 100 MW, destinado a la producción de hidrógeno renovable para amoníaco, refinerías y otros usos industriales. Otro proyecto importante es el *Hub* de Hidrógeno Verde en Cartagena, también a cargo de TW Solar, que cuenta con un electrolizador PEM de 40 MW y está orientado a la producción de amoníaco y su uso en refinerías. Además, el *hub* en Barranquilla está siendo desarrollado por TW Solar en colaboración con Atlantic Energy Group, Royal Port, Aqua Mar, Wattner, Arquitectura Eco y la Universidad del Norte. Este *hub* también contará con un electrolizador PEM de 100 MW para la producción de hidrógeno renovable y amoníaco (LAC Clean Hydrogen Action, 2024).

La Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia destaca la posición estratégica del país entre dos océanos, lo que lo convierte en un nodo de comercio marítimo y exportación. Con diez zonas portuarias y dos puertos clave como Cartagena en el Caribe y Buenaventura en el Pacífico, este país tiene una infraestructura existente que se puede reacondicionar para facilitar el transporte y almacenamiento de hidrógeno y sus derivados. Por todo ello, Colombia también analiza la posibilidad de convertirse en un *hub* logístico de hidrógeno, que abastezca a los países cercanos tanto por mar como por tierra.

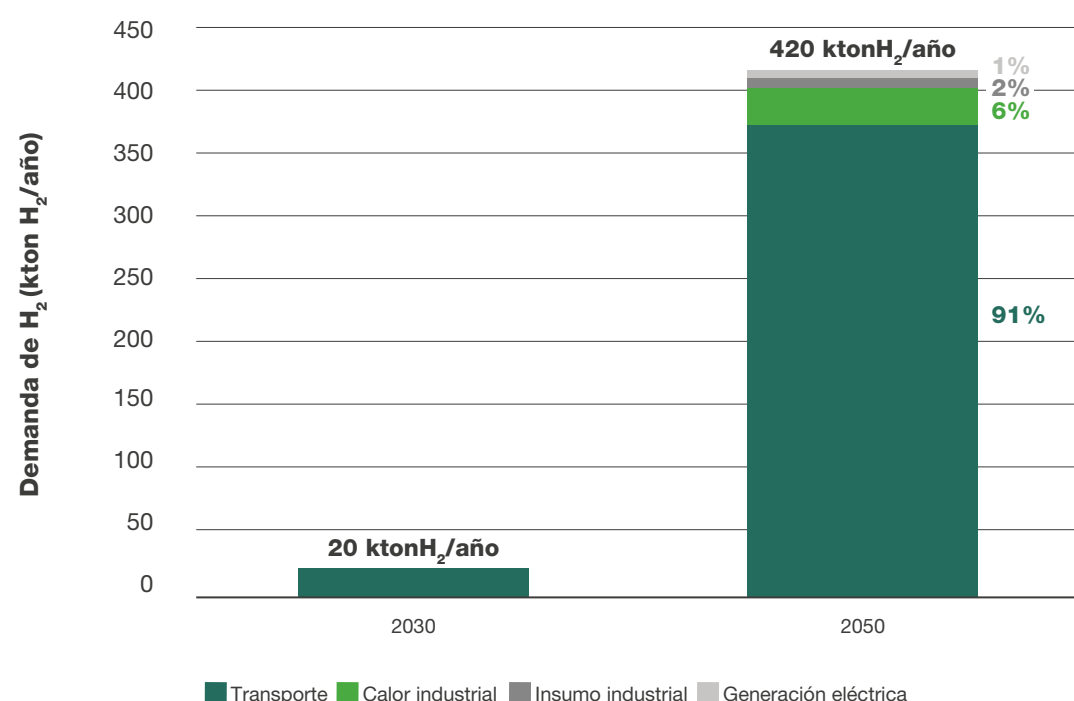
La ubicación estratégica, cercana a América del Norte, permite un fácil acceso a los mercados europeos a través del Caribe y a los asiáticos mediante el canal de Panamá o los puertos del Pacífico colombiano. De esta manera, Colombia podría también atender la demanda de hidrógeno en América Central. Además, Colombia ha firmado un memorando de entendimiento con el puerto de Rotterdam, lo que abre la puerta a la comercialización de H₂V, fortaleciendo así su posición en el mercado internacional (Plataforma H2LAC, s.d.).

COSTA RICA

En 2022 se publicó la primera versión de la Estrategia Nacional del Hidrógeno Verde de Costa Rica (Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica, 2023). Un aspecto clave para la implementación del hidrógeno en este país es fomentar la demanda, especialmente en el sector del transporte, que es el mayor emisor interno de contaminantes, en particular, de camiones de carga y autobuses de larga distancia. Actualmente, la demanda de H₂V en Costa Rica es limitada y está concentrada en tres sectores empresariales: el alimentario (grasas hidrogenadas), los dispositivos médicos y la siderurgia (galvanización).

También se prevé el desarrollo de industrias como la de fertilizantes nitrogenados y los procesos siderúrgicos y de vidrio. La demanda total prevista para 2030 es de entre 18 y 20 kton H₂/año, con el sector del transporte el principal demandante (89% de la demanda total en 2030 y 91% en 2050). Para 2050, esta demanda podría alcanzar las 420 kton H₂/año, como se muestra en la Figura 50.

FIGURA 50:
Demanda (2030 y 2050) del H₂V en Costa Rica



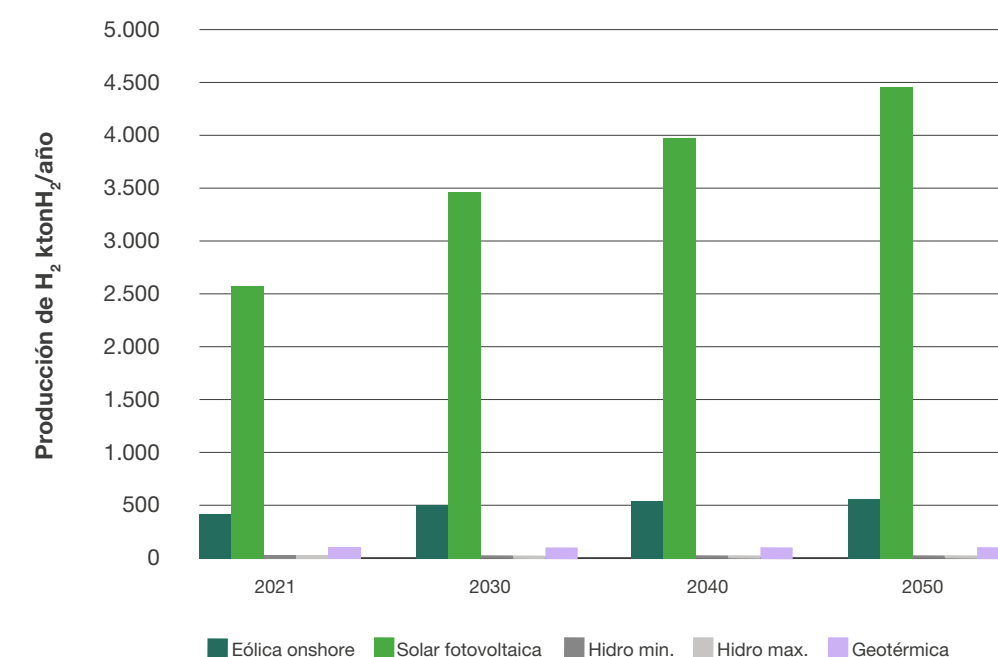
Fuente: Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica, 2023

Costa Rica adopta un enfoque equilibrado que combina tanto el mercado interno como el internacional, destacándose por su enfoque mediante la creación de un *hub* tecnológico para el H₂V. En términos de exportación, Costa Rica se plantea la necesidad de identificar y caracterizar la infraestructura portuaria necesaria para la exportación de hidrógeno.

Según datos del Centro Nacional de Control de Energía (CNCE), la producción de electricidad durante el año 2023 fue 95% renovable, con 70% hidroeléctrica, 12% geotermia y 12% eólica (CNCE, 2024). La producción de H₂V en el país se basará principalmente en energía solar fotovoltaica, eólica y excedentes de la red eléctrica del Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Para 2050, el potencial de producción de hidrógeno renovable en Costa Rica podría alcanzar 5,2 Mton H₂/año, como se muestra en la Figura 51.

Los mayores volúmenes de H₂V provienen de la energía solar fotovoltaica; sin embargo, la energía eólica también se presenta como una opción atractiva debido a sus superiores factores de capacidad, lo que se traduce en menores costos de producción.

FIGURA 51:
Potencial de producción de H₂V en Costa Rica

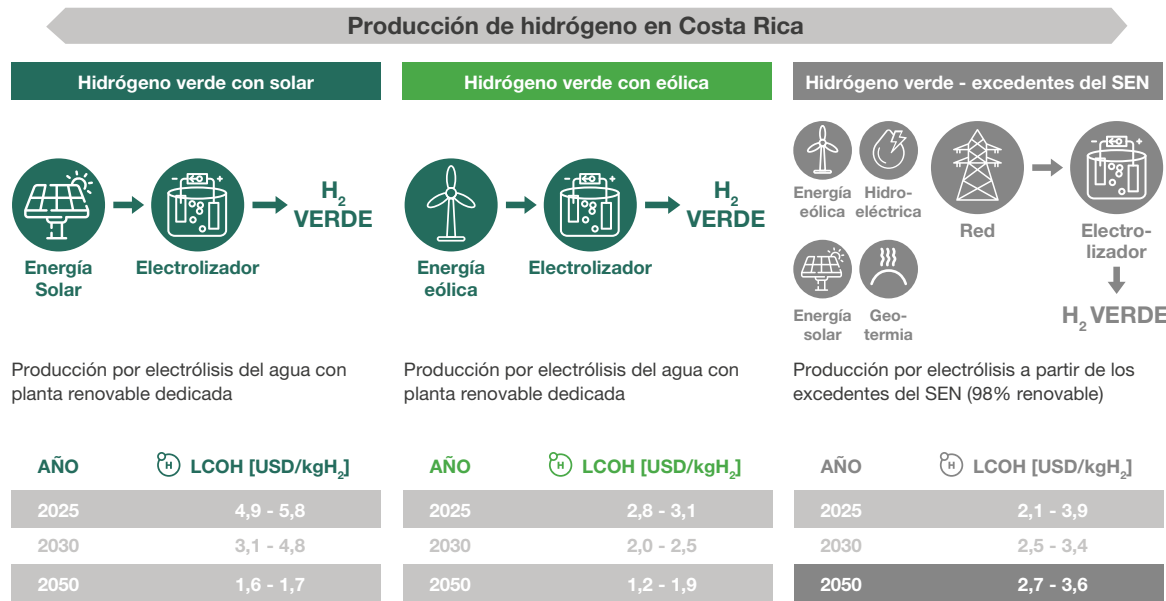


Fuente: Inicio, 2021

En la Figura 52 se presenta un resumen de los resultados del LCOH de H₂V en Costa Rica, según las tres fuentes analizadas para los dos escenarios seleccionados. Las trayectorias del costo nivelado de producción de hidrógeno se dividen en tres períodos:

- **Corto plazo (2025-2030):** El costo del hidrógeno producido con energía eólica será de 2,8 a 3,1 USD/kg H₂, mientras que, utilizando excedentes de la red eléctrica, el costo podría ser de 2,1 a 3,9 USD/kg H₂
- **Mediano plazo (década de 2030):** La energía eólica se volverá más barata que la energía de la red eléctrica
- **Largo plazo (mediados de la década de 2040 en adelante):** La energía solar fotovoltaica se destacará como la fuente más rentable para la producción de hidrógeno, siendo competitiva en costos frente a la eólica y ofreciendo un mayor potencial de generación en Costa Rica.

FIGURA 52:
Formas de producción y costos de hidrógeno en Costa Rica



*El valor inferior y superior de LCOH está determinado por los escenarios considerados

Fuente: Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica, 2023

En la Figura 53 se presenta un resumen de los datos principales relevantes para Costa Rica.

FIGURA 53:
Datos principales en Costa Rica



Fuente: elaboración propia, con base en datos del Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica, 2023

• Principales proyectos de producción de hidrógeno

La Figura 54 muestra los principales proyectos de producción de hidrógeno en operación, en desarrollo y anunciados.

FIGURA 54:
Proyectos de hidrógeno en Costa Rica



Fuente: elaboración propia, con base en datos de Plataforma H2LAC, 2024, y LAC Clean Hydrogen Action, 2024

- **Ecosistema de Transporte Sostenible de Costa Rica:** Proyecto piloto en operación desde 2013, con una capacidad de producción de 0,8 ton H₂/año, desarrollado por Ad Astra y Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE). Alimentado por energía eólica y solar, este proyecto produce hidrógeno destinado a su uso como combustible en vehículos de celda de combustible, promoviendo la integración del hidrógeno en el transporte público masivo y contribuyendo a la descarbonización del sector. El proyecto está en la provincia de Guanacaste (LAC Clean Hydrogen Action, 2024).
- **Ammonia-Green Fertilizers:** Proyecto de hidrógeno renovable a escala industrial que planea la producción de 400.000 toneladas de fertilizante al año a base de H₂V. Este proyecto busca fortalecer la industria agrícola de Costa Rica mediante la producción local de fertilizantes sostenibles, reduciendo la dependencia de importaciones y apoyando la autosuficiencia del país (BNAmericas, 2024).

- **Proyecto JASEC:** Proyecto piloto con una capacidad de producción de 500 kWh de hidrógeno por día (15 kg/día), utilizando 2 MW de energía renovable. Está enfocado en aplicaciones industriales y en el sector del transporte, contribuyendo a la descarbonización de estos sectores mediante el uso de hidrógeno como fuente de energía limpia (Energía Estratégica, 2024).

• Proyectos de infraestructura y consumo de hidrógeno

Costa Rica tiene una ubicación geográfica estratégica, con acceso a rutas marítimas y cercanía a mercados importantes, gracias a su proximidad al Canal de Panamá. En términos marítimos, Costa Rica tiene acceso tanto al océano Atlántico como al Pacífico, con ocho puertos principales (Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica, 2023), entre los cuales destacan :

- **Terminal de Contenedores de Moín (Atlántico):** Maneja casi el 80% del comercio marítimo internacional del país y está conectado con la capital, San José, por ferrocarril y carretera.
- **Puerto Limón (Atlántico):** Dispone de un muelle de cruceros y una terminal de contenedores.
- **Terminal Moín (Atlántico):** Reconocido como uno de los puertos más eficientes de América Latina en manejo de contenedores.
- **Muelle Petrolero, RECOPE en Limón (Atlántico):** Especializado en la importación de combustibles durante más de 50 años.
- **Puerto Caldera (Pacífico):** Es el segundo puerto marítimo internacional más grande de Costa Rica y la principal entrada de mercancías importadas del Pacífico, conectado por ferrocarril y carretera.

Además, se implementará un proyecto en Costa Rica para la adopción de hidrógeno en el transporte de carga, utilizando vehículos de celda de combustible. Este proyecto, denominado NAMA, incluirá un ecosistema tecnológico completo para la producción, acondicionamiento, almacenamiento y uso del hidrógeno en camiones de carga, estableciendo así las bases y experiencias necesarias para integrar el hidrógeno como una fuente energética clave en el sector del transporte de carga.

Costa Rica fija metas para 2030 en la demanda de H₂V, que incluyen el desarrollo de entre 100 y 250 vehículos ligeros de celda de combustible y de entre 200 y 600 vehículos pesados, como buses y camiones, con el objetivo de reducir emisiones (Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica, 2023). Se establecerán de 15 a 20 estaciones de recarga de hidrógeno. Además, se prevé una inversión de entre USD 830 millones y USD 1.100 millones para proyectos relacionados con la producción, consumo y logística del hidrógeno, financiados por el sector privado, el sector público y asociaciones público-privadas.

TRINIDAD Y TOBAGO

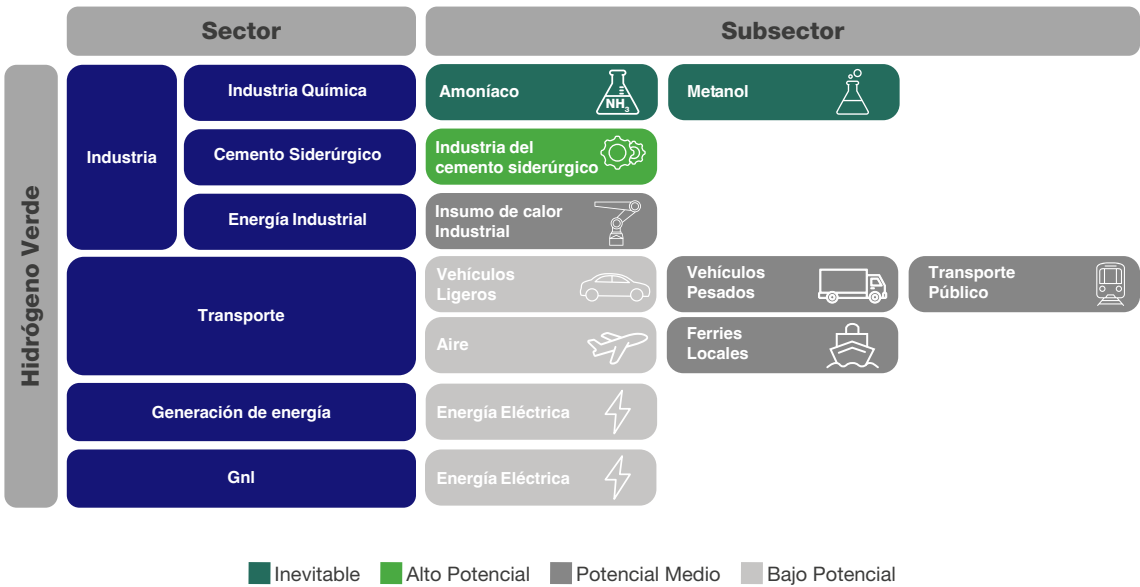
Trinidad y Tobago publicó su Hoja de Ruta (Ministerio de Energía e Industrias Energéticas de Trinidad y Tobago, 2021). Entre las diversas fuentes de energía renovable que tiene a su disposición, la energía eólica *offshore* es considerada como la de mayor potencial para la generación de H₂V en las islas. Las proyecciones iniciales sugieren que, aprovechando las áreas disponibles para el desarrollo marino, se podrían alcanzar hasta 57 GW de energía eólica *offshore*, lo que se traduce en una producción promedio de 25 GW, considerando el factor de capacidad específico de esta tecnología. Si se destinan esos 25 GW de energía eólica marina a los electrolizadores, podrían producirse hasta 4 Mton H₂/año de H₂V.

Sin embargo, actualmente no existe una infraestructura renovable desarrollada para soportar estas proyecciones. Según datos de 2023 de la U.S. Energy Information Administration (EIA), la matriz eléctrica de Trinidad y Tobago es puramente térmica, basada en combustibles fósiles, con una generación eléctrica anual 100% dependiente del gas natural, aproximadamente 9,4 TWh (EIA, 2023). Este contexto resalta el desafío inicial de desarrollar una oferta significativa de energía renovable que pueda atender tanto la demanda energética interna como los futuros proyectos de producción de hidrógeno verde.

En Trinidad y Tobago el potencial de aplicación del H₂V, según la Figura 55, se clasifica de la siguiente manera:

- Indispensable en industrias cautivas, como la química.
- Alto potencial para la producción de acero y cemento.
- Potencial medio como fuente de calor industrial y en el sector del transporte, especialmente para vehículos pesados, transporte público y ferris locales.
- Bajo potencial para la generación de energía, la electrificación de industrias y el uso en vehículos ligeros.

FIGURA 55:
Aplicación potencial del H₂V en T&T



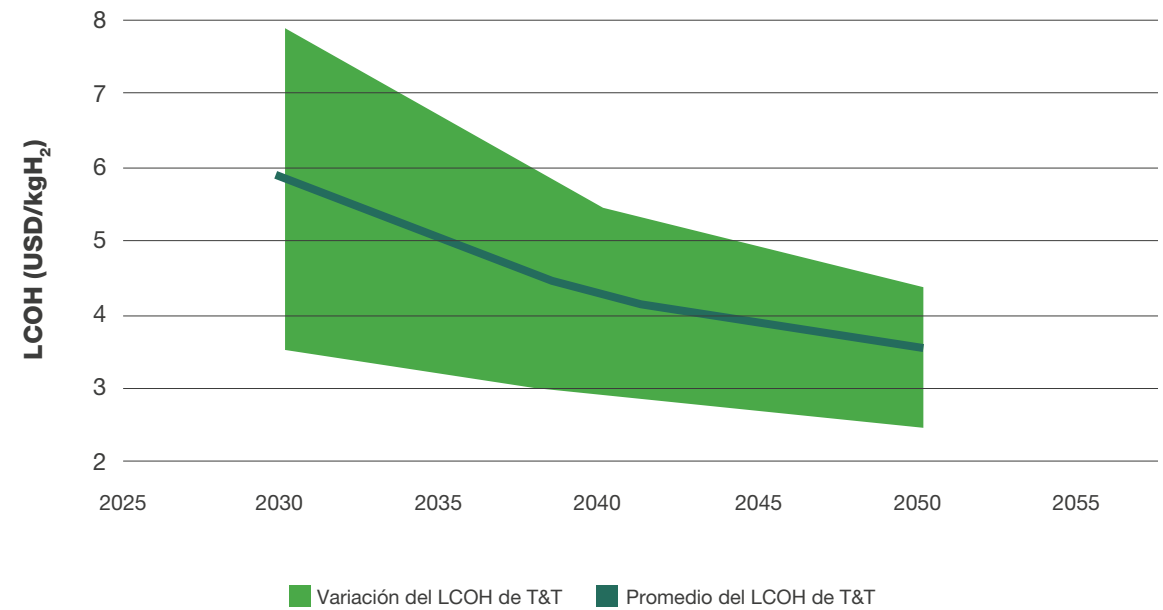
Fuente: Hoja de Ruta del Hidrógeno de Trinidad y Tobago

El país cuenta con una capacidad instalada para producir aproximadamente 1,7 Mton H₂/año de hidrógeno gris. Como principal exportador de amoníaco y metanol, Trinidad y Tobago tiene una demanda cautiva de 1,5 Mton H₂/año de hidrógeno, que es utilizado como materia prima en estas aplicaciones. Para ambos productos, el uso de H₂V será indispensable a futuro. El restante, 0,2 Mton H₂/año, se destina a la producción de acero y cemento.

Para determinar la competitividad de Trinidad y Tobago se evaluaron los costos de producción de hidrógeno y su conversión en amoníaco. El análisis generó un

LCOH promedio para el país, como se muestra en la Figura 56, de USD 5,8/kg H₂ en 2030, con una expectativa de reducción a USD 3,6/kg H₂ para 2050. Existe el potencial de alcanzar valores aún más bajos, de USD 3,6/kg H₂ hasta 2030 y USD 2,7/kg H₂ hasta 2050, mediante la disminución de costos tecnológicos, la optimización de los gastos en energía renovable, la selección de proveedores alternativos y el desarrollo de cadenas de suministro locales que respalden la industria de H₂V.

FIGURA 56:
Variación y promedio del LCOH para T&T



Fuente: Ministerio de Energía e Industrias Energéticas de Trinidad y Tobago, 2021

En la Figura 57 se presenta un resumen de los datos principales en Trinidad y Tobago.

FIGURA 57:
Datos principales en Trinidad y Tobago



Fuente: elaboración propia, con base en datos del Ministerio de Energía e Industrias Energéticas de Trinidad y Tobago, 2021

Principales proyectos de producción de hidrógeno

Trinidad y Tobago cuenta con un único proyecto de hidrógeno limpio, presentado en la Figura 58.

FIGURA 58:
Proyecto de hidrógeno en Trinidad y Tobago



Fuente: New Gen Energy, LTD

Proyecto NewGen: Proyecto a escala comercial que producirá H₂V utilizando fuentes de energía de bajo carbono como una planta solar local y energía generada a partir del calor residual. La Comisión de Electricidad de Trinidad y Tobago suministrará 130 MW de electricidad, de los cuales 30 MW provendrán de energía solar fotovoltaica y 100 MW de mejoras en turbinas de gas. Este proyecto permitirá la producción de 2,2 toneladas de hidrógeno por hora, que se utilizará como materia prima en una planta industrial existente, sustituyendo parcialmente el hidrógeno producido a partir del gas natural. Esto permitirá la producción de amoníaco con una huella de carbono significativamente reducida (NewGen Energy Ltd., s.d.).

• Proyectos de infraestructura y consumo de hidrógeno

Según la Hoja de Ruta del Hidrógeno de Trinidad y Tobago, la necesidad de nueva infraestructura y la oportunidad que tiene el país para aprovechar su infraestructura existente en la producción y comercio de H₂V se divide en tres componentes principales (Ministerio de Energía e Industrias Energéticas de Trinidad y Tobago, 2021):

- **Nueva infraestructura necesaria:** señala la necesidad de desarrollar la producción de H₂V mediante energía renovable, como la eólica, para lograr una producción más sostenible.
- **Industria existente:** destaca las instalaciones petroquímicas ya operativas que producen amoníaco y metanol, sugiriendo que estas pueden ser adaptadas y aprovechadas para la producción de H₂V.
- **Red de envío y relaciones comerciales existentes:** hace referencia a las instalaciones de almacenamiento y exportación ya establecidas para amoníaco y metanol, así como a las operaciones de transporte marítimo, que pueden facilitar la distribución del H₂V producido.

Trinidad y Tobago puede capitalizar su infraestructura existente y experiencia en la industria petroquímica y logística para integrar la producción de H₂V. A corto y mediano plazo, el hidrógeno se comercializará en forma de amoníaco o metanol, lo que permitirá al país, líder mundial en la producción de estos productos,

Trinidad y Tobago puede capitalizar su infraestructura existente y experiencia en la industria petroquímica y logística para integrar la producción de H₂V. A corto y mediano plazo, el hidrógeno se comercializará en forma de amoníaco o metanol, lo que permitirá al país, líder mundial en la producción de estos productos, aprovechar su infraestructura y conocimientos para ingresar en este nuevo mercado.

aprovechar su infraestructura y conocimientos para ingresar en este nuevo mercado. A largo plazo, a medida que avancen las tecnologías de licuefacción y transporte de hidrógeno, se espera que el hidrógeno líquido se comercialice globalmente como una mercancía.

URUGUAY

La Hoja de Ruta del hidrógeno verde y derivados en Uruguay, publicada en 2023, destaca los principales aspectos y datos relacionados con el desarrollo de proyectos de H₂V en este país (Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay, 2024a). Según datos de la Compañía Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE), en 2023 Uruguay generó más de 90% de su electricidad a partir de fuentes renovables, con una destacada participación de energía eólica y de bioenergía (UTE, 2024). Aunque la composición de la matriz eléctrica es ideal para la producción de hidrógeno verde, Uruguay enfrenta desafíos relacionados con la disponibilidad de agua. De 2022 a 2023 pasó por una de las peores crisis hídricas

de su historia, que afectó especialmente a Montevideo y las áreas metropolitanas, donde los niveles de los embalses alcanzaron mínimos históricos (Presidencia de la República Oriental del Uruguay, 2023).

En la Figura 59 se presenta un cronograma detallado para el desarrollo del sector del hidrógeno en Uruguay, de acuerdo con la estrategia definida, que abarca tanto la producción como el crecimiento de la demanda doméstica y las exportaciones hasta 2040. El cronograma comienza en 2025, con una capacidad modesta de 0,1 GW, que, a lo largo de los años, hasta 2040, evoluciona hasta 9 GW.

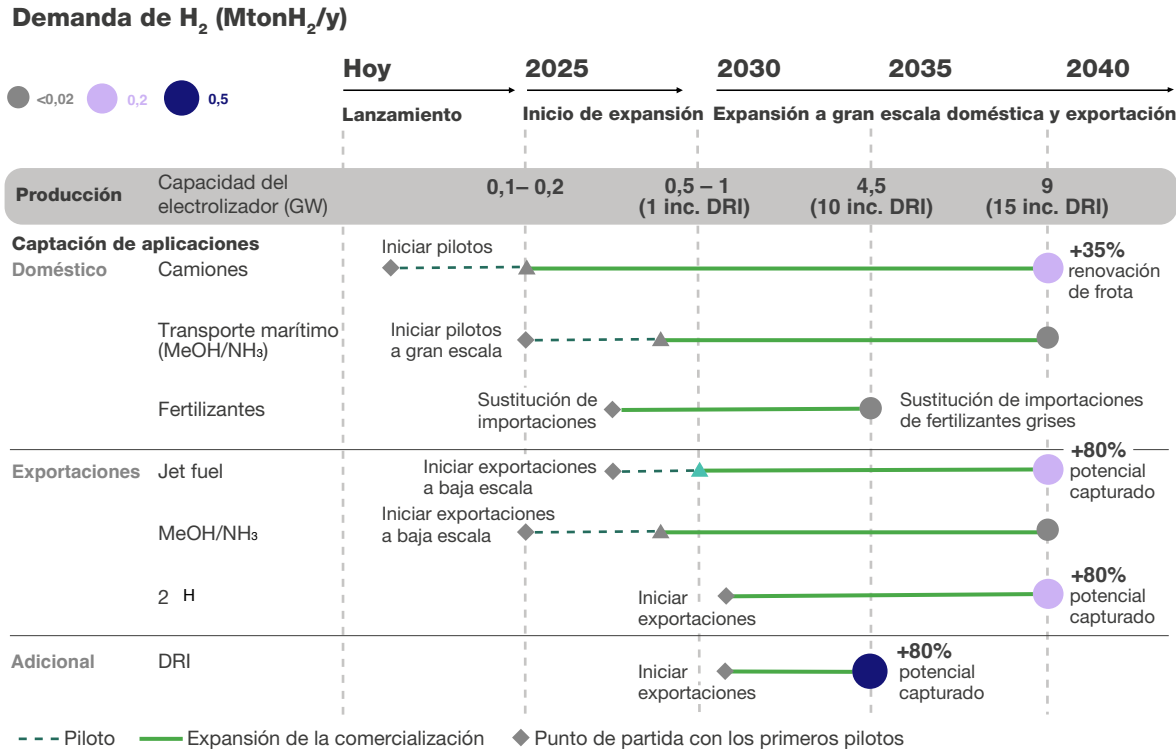
En el mercado interno, la demanda de hidrógeno se concentrará en tres áreas principales:

- **Transporte pesado:** Implementación de proyectos piloto para camiones y autobuses de larga distancia, con una visión a largo plazo de sostenibilidad en el transporte por carretera.
- **Transporte marítimo:** Utilización de combustibles limpios (MeOH y NH₃) en el transporte marítimo para reducir la dependencia de combustibles fósiles.
- **Fertilizantes:** Sustitución de fertilizantes importados por versiones locales producidas con H₂V, aumentando la autosuficiencia nacional.

En términos de exportaciones, Uruguay aspira a posicionarse como un futuro exportador de hidrógeno y sus derivados. La estrategia es comenzar a pequeña escala con combustibles de aviación (*jet fuel*), metanol y amoníaco (MeOH y NH₃) y H₂, y ampliar sustancialmente hasta 2040. Esto permitirá al país captar mercados de combustibles para la aviación y otros sectores industriales que necesitan combustibles más limpios, estableciendo a Uruguay como un actor clave en el comercio internacional de hidrógeno.

Un aspecto destacado en la hoja de ruta es la incorporación del hidrógeno en el proceso de reducción directa del hierro (DRI), con el objetivo de descarbonizar la producción de acero. Según la estrategia, Uruguay cuenta con una ventaja competitiva gracias a la alta calidad de su hierro, lo que posiciona al país como un potencial exportador de DRI. La meta es capturar el 80% del potencial de este mercado para 2040.

FIGURA 59:
Producción y comercialización de hidrógeno en Uruguay



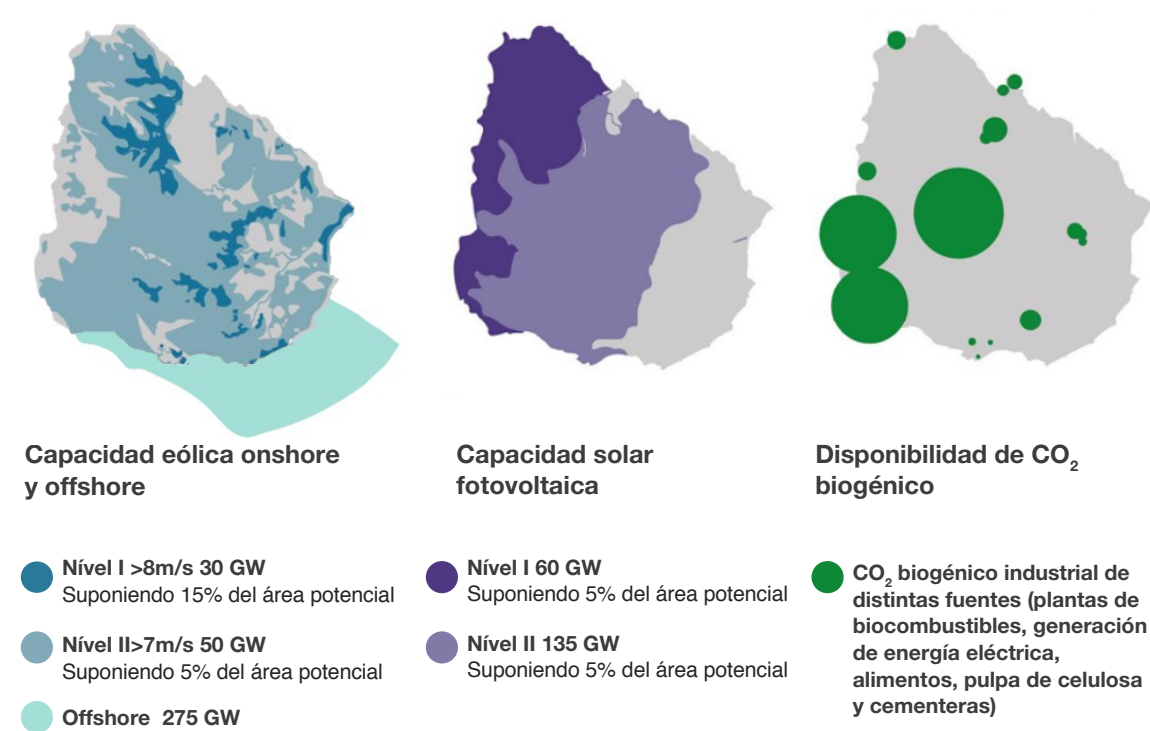
Fuente: Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay, 2024a

Uruguay posee un potencial significativo para la producción de H₂V, con una gran capacidad de generación de energía renovable, según se observa en la Figura 60. El país podría instalar hasta 60 GW de capacidad solar en áreas de alta calidad y 135 GW en áreas de calidad media, además de 30 GW de capacidad eólica *onshore* en áreas de alta calidad y 50 GW adicionales en áreas de calidad media. El potencial para energía eólica *offshore* es de 275 GW. La Hoja de Ruta proyecta un uso de aproximadamente 18 GW de energía solar y energía eólica, representando una ocupación del 0,7% del territorio nacional, de los cuales sólo el 0,16% corresponde a la energía solar (Ministerio de Ambiente de Uruguay, 2023).

Uruguay también cuenta con CO₂ biogénico disponible para producir derivados del hidrógeno, obtenido de biomasa y procesos de fermentación. Se proyecta que para 2024 se disponga de aproximadamente 11 millones de toneladas de CO₂ biogénico, proveniente de plantas industriales cercanas a recursos

renovables. La biomasa forestal nacional es sostenible y está certificada, integrándose de manera eficaz con la economía del hidrógeno.

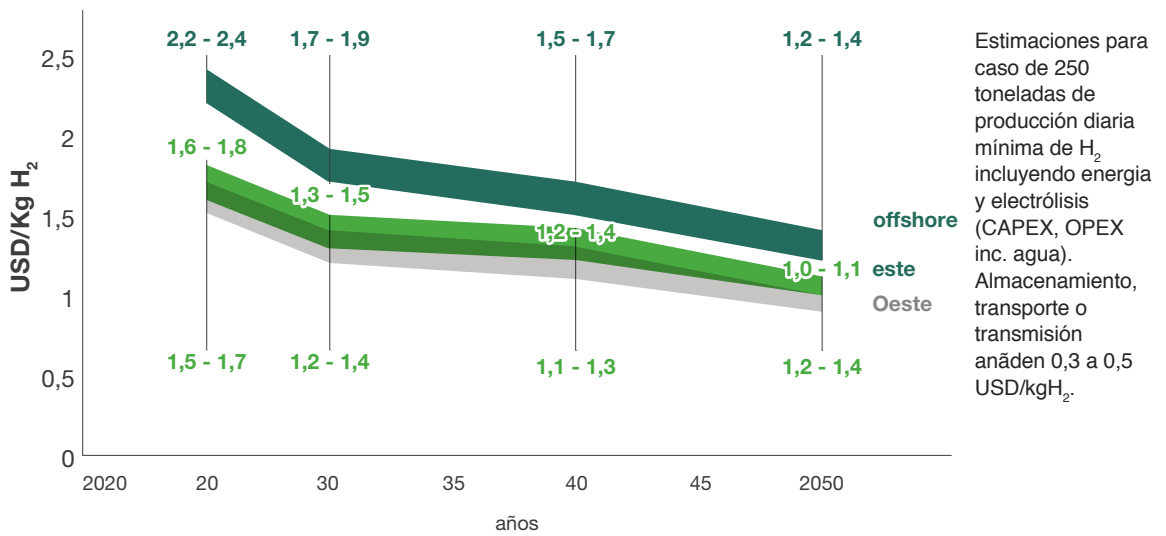
FIGURA 60:
Potencial de generación de renovables



Fuente: Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay, 2024b

Los vastos recursos naturales de Uruguay favorecen la producción de H₂V a costos competitivos. Se estima que los costos de energía renovable para 2030, según la Figura 61, permitirán al país lograr valores de producción de H₂V (LCOH) entre 1,2 y 1,4 USD/kg H₂ en la región oeste y entre 1,3 y 1,5 USD/kg H₂ en la región este del país.

FIGURA 61:
Curva de costo de producción para hidrógeno (USD/kg H₂) por región en Uruguay



Fuente: Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay, 2024a

En la Figura 62 se presenta un resumen de los datos principales en Uruguay.

FIGURA 62:
Datos principales en Uruguay



Fuente: elaboración propia, con base en datos de WEF, 2024; Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay, 2024a
*Datos de precio y capacidad (hasta 2040) presentes en el informe Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde y Derivados en Uruguay.

• Principales proyectos de producción de hidrógeno

Actualmente, no existe ningún proyecto de hidrógeno verde en operación en Uruguay, y los proyectos en desarrollo y anunciados se muestran en la Figura 63, con datos proporcionados por Atlas H₂LAC y el Ministerio de Industria, Energía y Minería.

FIGURA 63:
Proyectos de hidrógeno en Uruguay



Fuente: elaboración propia, con base en datos de Atlas H2LAC, 2024, y Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay, 2024c

Los principales proyectos se describen a continuación con mayor detalle con datos del Ministerio de Industria, Energía y Minería.

- HIF Paysandú:** Proyecto a escala comercial con una capacidad de producción proyectada de 100 kton H₂/año, alimentado por energía eólica y solar. La empresa chilena HIF Global tiene un plan de inversión de 4.000 millones de dólares para construir esta planta. Actualmente se encuentra en la fase de estudios de prefactibilidad y está orientado a la producción de e-combustibles para exportación, que posicionen a Uruguay como un proveedor potencial en el mercado internacional.
- Tambor Green Hydrogen Hub:** Proyecto comercial con una capacidad de producción de 13 kton H₂/año, enfocado en la producción de metanol para exportación. Está en la etapa de estudios de factibilidad, con viabilidad ambiental presentada en diciembre de 2021, y representa una de las iniciativas clave para diversificar la oferta de derivados de hidrógeno en el país.

- **Proyecto H24U:** Proyecto piloto en la fase de estudios de factibilidad, con una capacidad de producción de 263 ton H_2 /año, destinado al abastecimiento de camiones de carga. Este proyecto es producto de una alianza entre las empresas nacionales Saceem y CIR. El gobierno aportará 10 millones de dólares en subsidios para la construcción de esta planta valorada en 43,5 millones de dólares. Inicialmente, el hidrógeno será utilizado por camiones convertidos, y posteriormente el proyecto introducirá hidrógeno en la red de gas natural de la ciudad de Paysandú, en el oeste del país. Este piloto servirá de base para la elaboración de regulaciones y estímulos para el H_2V .
- **Proyecto Kahirós:** Proyecto piloto con una capacidad de producción de 76,7 ton H_2 /año, orientado al abastecimiento de camiones de carga. Actualmente está en la fase de estudios de factibilidad, con la autorización ambiental previa presentada al Ministerio de Ambiente, y es parte de las iniciativas de transición hacia un transporte más sostenible en Uruguay.

• Proyectos de infraestructura y consumo de hidrógeno

El proyecto H2U Offshore Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland (ANCAP) y el Tambor Green Hydrogen Hub demuestran el compromiso de Uruguay con la integración del H_2V y el desarrollo de infraestructura (WEF, 2024). Uruguay ya cuenta con la infraestructura necesaria para iniciar proyectos relacionados con el H_2V y sus derivados, incluyendo el puerto de Montevideo, con acceso al Atlántico y potencial para exportar combustibles sintéticos, así como la vía del Ferrocarril Central, actualmente en construcción.

Además, dispone de vías fluviales y carreteras que conectan las zonas con mayor capacidad de energías renovables al puerto de Montevideo (Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay, s.d.). Sin embargo, será necesario desarrollar infraestructuras adicionales, como redes de transmisión eléctrica y gasoductos, junto con posibles mejoras portuarias. Estos proyectos serán evaluados y coordinados con los actores relevantes del sector para planificar los próximos pasos. La capacidad de exportar hidrógeno y sus derivados a mercados clave como Europa y Asia consolidará la posición del país como un exportador de combustibles limpios y contribuirá a la diversificación de su economía.



PLANIFICACIÓN
PARA EL CORTO,
MEDIANO Y
LARGO PLAZO

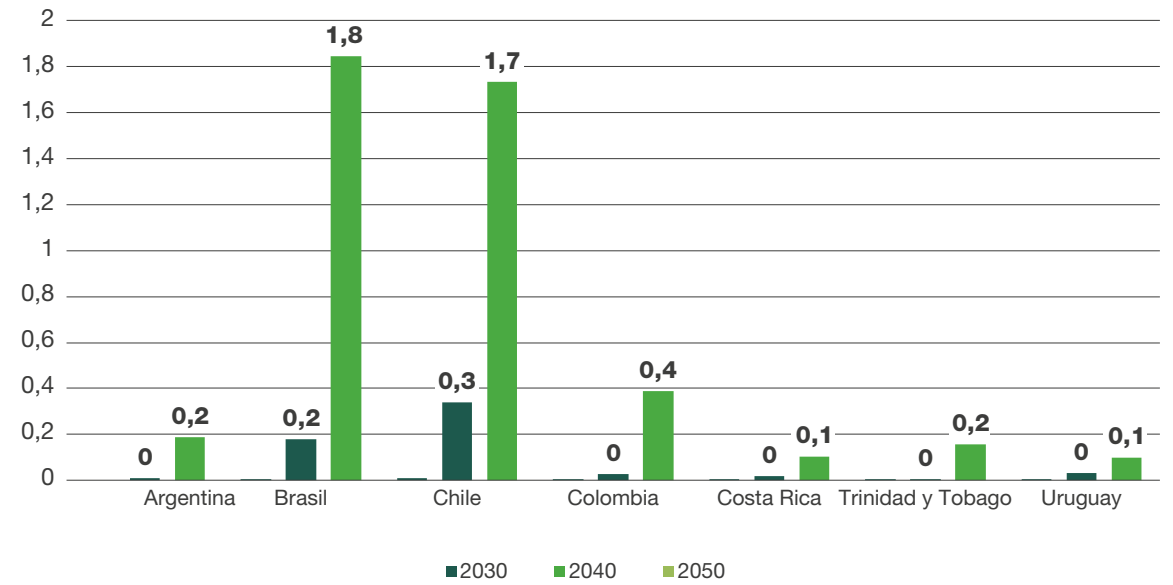
Como se vio en los capítulos anteriores, la región de América Latina y el Caribe presenta un gran potencial de producción de hidrógeno de bajo carbono. La gran disponibilidad de recursos podría permitir que esta región tenga un LCOH menor que el promedio global. Reconociendo este potencial, muchos países han establecido metas bastante ambiciosas para la producción de hidrógeno. Sin embargo, estas metas podrían ser demasiado optimistas, especialmente al notar que, según datos de la IEA, sólo el 0,2% de la capacidad anunciada de proyectos de hidrógeno de bajo carbono en la región realmente está en construcción.

En este sentido, esta sección presenta proyecciones de producción de H₂V más realistas para los años 2030, 2040 y 2050. Para el desarrollo de estas proyecciones, se adoptó una curva de inserción gradual a lo largo del tiempo, considerando la demanda actual de hidrógeno, las metas establecidas en las estrategias de cada país y la capacidad de generación renovable actual y potencial.

Se crearon dos escenarios para las proyecciones de consumo de hidrógeno por país: el de Business-as-Usual (BaU) y el de Transición Energética (TE). El BaU considera el mantenimiento de políticas y tendencias energéticas actuales, mientras que el escenario de TE contempla una evolución más rápida de la adopción de fuentes de bajas emisiones. Este escenario define la velocidad para alcanzar las metas establecidas en las estrategias nacionales o la producción estimada en informes de referencia, en el caso de países que no tienen metas nacionales. En el caso BaU, las metas se alcanzan con un retraso mayor que en el caso TE, que ya presenta demoras frente a las metas definidas.

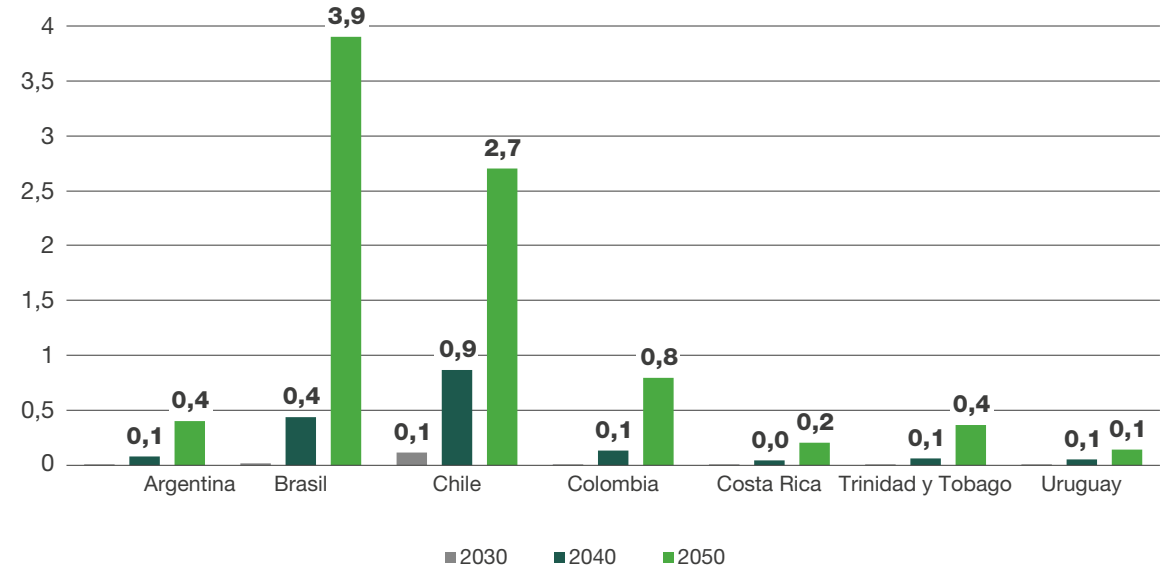
Las figuras a continuación muestran las proyecciones de H₂V para cada escenario y país en 2030, 2040 y 2050, expresadas en millones de toneladas anuales. En muchos países, la producción estimada de hidrógeno en 2030 es inferior a 100 mil toneladas, por lo que no aparecen en el gráfico.

FIGURA 64:
Proyección de producción de H₂V (en millones de toneladas) por país en 2030, 2040 y 2050, en el escenario Business as Usual



Fuente: elaboración propia

FIGURA 65:
Proyección de producción de H₂V (en millones de toneladas) por país en 2030, 2040 y 2050, en el escenario de Transición Energética



Fuente: elaboración propia

El aumento en la producción de hidrógeno está directamente relacionado con la demanda, tanto interna como externa, de cada país analizado. Mientras algunos priorizan la exportación en sus estrategias, otros concentran sus esfuerzos en fomentar la demanda interna. Los sectores hacia los cuales se orienta el desarrollo de la demanda son sobre todo el transporte pesado y la industria, con algunas excepciones que se centran en el almacenamiento de energía a largo plazo. Estos sectores clave varían según el contexto de cada país, aunque suelen estar vinculados a los usos actuales del hidrógeno o a sectores con alta intensidad de energía y emisiones.

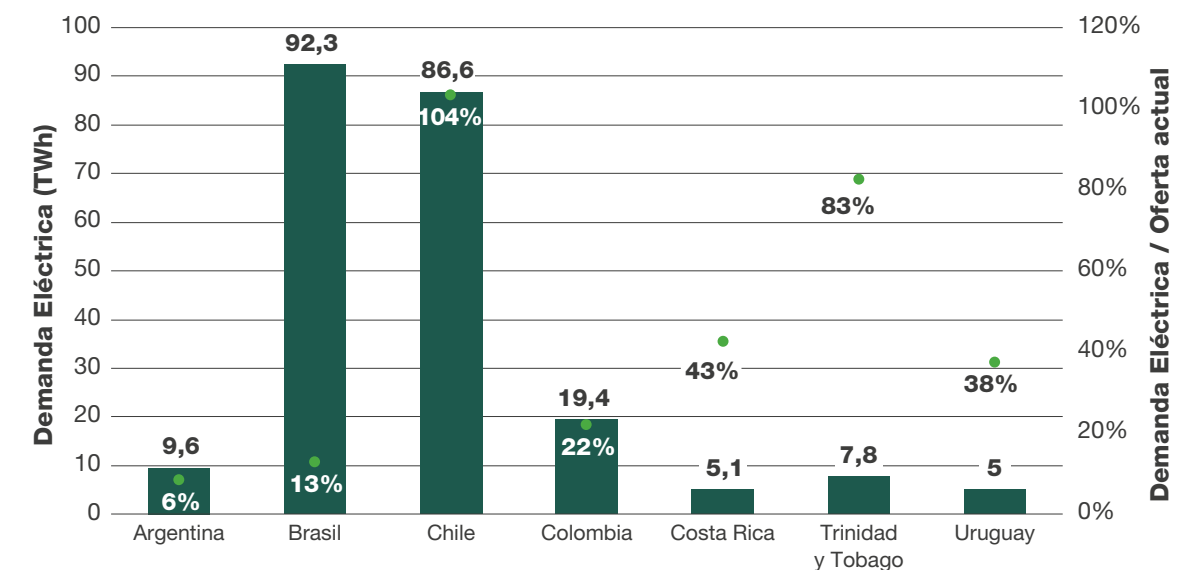
La mayoría de los países analizados destinan el hidrógeno sobre todo a la industria química, especialmente para la producción de amoníaco y metanol. Algunos identifican también como áreas prioritarias el transporte pesado por carretera, como es el caso de Uruguay, Costa Rica, Colombia y Chile. Todos ellos, excepto Colombia, también consideran estratégico el transporte marítimo. Además, varios países destacan el uso de hidrógeno de bajo carbono en refinerías, con un énfasis particular en Brasil, Chile, Colombia y Argentina. Sólo unos pocos países reportan el uso del hidrógeno en la siderurgia, en vehículos ligeros y en la producción de cemento.

Atender la potencial demanda de H₂V requerirá una expansión significativa de la generación de energía renovable en cada país. Para algunos países, como Brasil, satisfacer esta demanda adicional supondrá un desafío menor, ya que representaría sólo una fracción de la demanda total y de la capacidad renovable ya instalada. No obstante, en otros países, como Chile o Uruguay, la alta demanda proyectada del mercado de H₂V podría ejercer un impacto considerable en el sector eléctrico nacional.

Para verificar el impacto en el sector eléctrico de cada país, se calculó cuánto representaría la demanda de hidrógeno en términos de demanda de energía eléctrica renovable. Para cada país, se comparó la demanda eléctrica para la producción de H₂V en 2050 con la oferta actual de energía. Los resultados se muestran en las figuras a continuación para los escenarios BaU y TE.

FIGURA 66:

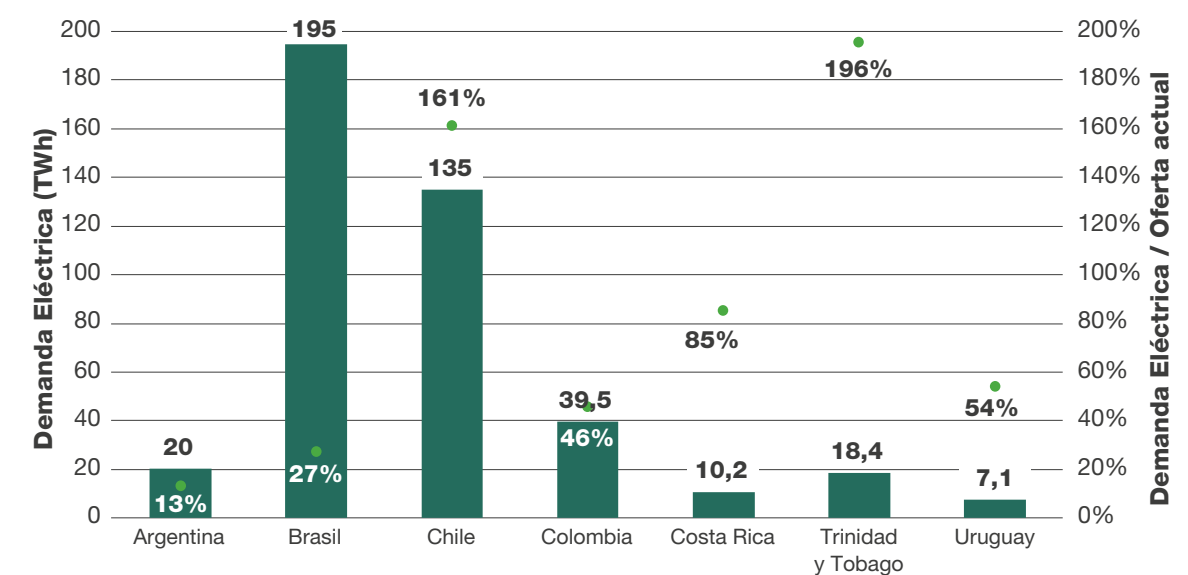
Proyección de demanda eléctrica para la producción de H₂V en 2050 (en TWh) y representación de esa demanda en relación con la oferta actual de energía eléctrica de cada país en el escenario BaU



Fuente: elaboración propia

FIGURA 67:

Proyección de producción de H₂V (en millones de toneladas) por país en 2030, 2040 y 2050, en el escenario de Transición Energética



Fuente: elaboración propia

Como se puede observar, la demanda de hidrógeno, incluso con proyecciones más conservadoras que las estrategias nacionales publicadas, sigue teniendo un impacto significativo en el sector eléctrico de cada país. Para satisfacer esta demanda, los países deberán expandir considerablemente su capacidad instalada de generación renovable, aprovechando los recursos naturales disponibles. Las principales fuentes identificadas como estratégicas por los países incluyen la energía hidroeléctrica, solar y eólica *onshore*. Solo unos pocos países mencionaron fuentes alternativas, como la eólica *offshore*, la geotérmica y la biomasa.

El impacto en cada sistema eléctrico dependerá también del modelo que se adopte para la producción de hidrógeno. En algunos casos, la producción estará completamente conectada a la red eléctrica del país, lo que requerirá inversiones no sólo en infraestructura de generación, sino también en transmisión. En otros casos, el proyecto podrá llevarse a cabo de forma *off grid*, con la generación ubicada cerca de la producción de H_2V . Este modelo podría ser adoptado principalmente en países con un menor porcentaje de renovables en su matriz energética, donde la conexión de la planta de hidrógeno a la red podría generar obstáculos para la certificación y el reconocimiento del hidrógeno en grandes mercados consumidores, como el europeo. En este caso, la demanda de infraestructura estará principalmente orientada al transporte del hidrógeno hasta los consumidores, tales como puertos, plantas industriales o estaciones de abastecimiento.

De esta forma, se observa que el desarrollo del mercado de H_2V en estos países también impacta las inversiones dentro del sector eléctrico. En el caso de Chile, Trinidad y Tobago y Costa Rica, el impacto será aún más significativo, con necesidades de expansión que podrían llegar a triplicar la oferta de energía del país. En cambio, en otros países el impacto será menos significativo. Este es el caso de Brasil, que a pesar de tener la mayor demanda estimada de H_2V , esta representa una proporción pequeña en relación con el tamaño actual de su sistema energético. En cualquier caso, serán necesarios grandes inversiones en infraestructura de generación y transmisión eléctrica para satisfacer esta nueva demanda que se está creando.

De esta manera, se observa que el desarrollo del mercado de H_2V en estos países también tendrá un impacto significativo en las inversiones del sector eléctrico.

La demanda de hidrógeno, incluso con proyecciones más conservadoras que las estrategias nacionales publicadas, sigue teniendo un impacto significativo en el sector eléctrico de cada país. Para satisfacer esta demanda, los países deberán expandir considerablemente su capacidad instalada de generación renovable, aprovechando los recursos naturales disponibles.

En algunos casos, como en Chile, Trinidad y Tobago y Costa Rica, el impacto será especialmente notable, con necesidades de expansión que podrían llegar a triplicar la oferta energética del país. En otros países, como Brasil, el impacto será menos pronunciado; aunque Brasil tiene la mayor demanda estimada de H_2V , esta representa una proporción relativamente pequeña en comparación con el tamaño actual de su sistema energético. En cualquier caso, se requerirán grandes inversiones en infraestructura de generación y transmisión eléctrica para satisfacer esta nueva demanda emergente.

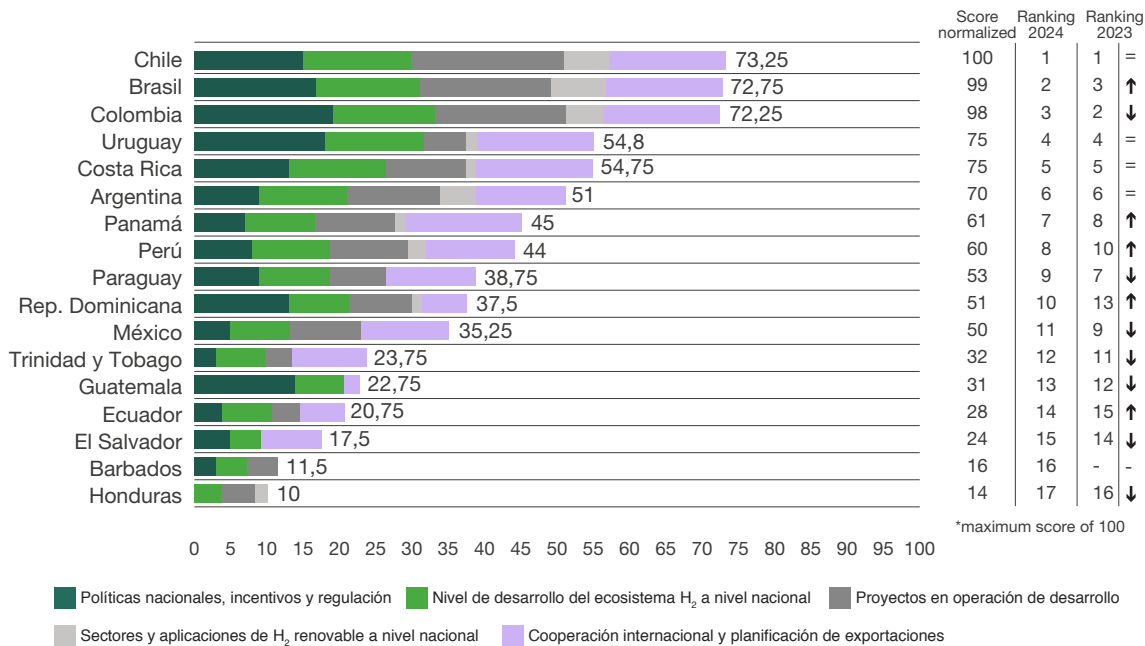
América Latina y el Caribe es percibida como una región con un gran potencial para la producción de hidrógeno verde y sus derivados gracias a la diversidad y abundancia de sus recursos naturales renovables que le permitirían alcanzar costos competitivos. Sin embargo, el desarrollo normativo de los países de la región difiere ampliamente. Mientras algunos países como Colombia, Chile, Argentina, Costa Rica y Uruguay ya cuentan con hojas de ruta o estrategias nacionales, planes de acción a mediano y largo plazo y unos marcos regulatorios aplicables al hidrógeno y sus derivados, otros apenas han avanzado en la formulación de políticas y regulación. Esta diferencia en el grado de desarrollo normativo implica que cada país se enfrenta a sus propios desafíos para identificar y superar las brechas en políticas públicas y regulación, como condición para alcanzar el pleno desarrollo de un mercado del hidrógeno a nivel nacional.

El Índice 2024 H2LAC (Hinicio y Newenergy, 2024) proporciona una visión objetiva de la evolución de la economía del hidrógeno renovable y de bajas emisiones en ALC durante los últimos cuatro años (2021-2024). Examina cinco categorías clave que impactan el desarrollo del sector: políticas y regulaciones públicas, proyectos en operación o en proceso de desarrollo, la economía local del hidrógeno, las aplicaciones del hidrógeno y la planificación, y los acuerdos internacionales.

El Índice es elaborado a partir de información recopilada en encuestas a más de 60 representantes de los distintos países, incluyendo funcionarios gubernamentales, expertos senior en el mercado del hidrógeno tanto del sector público como privado, y representantes de organizaciones internacionales. Esa información es validada contrastándola con datos adicionales de cada país.

La dimensión de políticas públicas, incentivos y regulaciones a nivel nacional cubre el desarrollo del marco regulatorio, beneficios fiscales e integración del hidrógeno dentro de los planes nacionales de desarrollo. También abarca la presencia de hojas de ruta del hidrógeno, así como el establecimiento de esquemas de certificación y/o directrices en torno a la certificación en el país.

FIGURA 68:
H2LAC Index 2024



Fuente: Hinicio y Newenergy

DESCARBONIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN ACTUAL Y TRANSICIÓN HACIA EL H₂V EN EL LARGO PLAZO

A continuación, se realiza un análisis de los instrumentos de política pública para el desarrollo del hidrógeno renovable existentes en ALC, partiendo de una identificación de los países que ya han adoptado estrategias y hojas de ruta nacionales y aquellos que todavía no cuentan con ellas.

Con respecto a los primeros, se analizan sus metas a corto, mediano y largo plazo y el grado de implementación regulatoria para el logro de esos objetivos,

examinando las herramientas adoptadas o en proceso de adopción para descarbonizar la actual demanda interna, expandir la base de demanda a otros usos y eventualmente impulsar un mercado de exportación. Cabe destacar que todas las estrategias se dirigen al desarrollo del hidrógeno renovable, excepto Argentina, Colombia y Brasil, que incluyen también otras vías de producción, sean fósiles con captura, uso y almacenamiento de CO₂ (CCUS), nuclear o, incluso el hidrógeno de origen geológico, llamado blanco, como es el caso de Colombia.

En el caso de países que aún no cuentan con una estrategia nacional, se refleja esa situación, indicando si existen iniciativas regulatorias públicas o sectoriales, las acciones realizadas y el grado de avance en el proceso hacia su adopción.

La siguiente tabla sintetiza el estado actual de los desarrollos normativos en cada país, en los tres ejes principales de estrategias u hojas de ruta, planes de acción para implementarlas y sistemas de incentivos y apoyo financiero. Cabe aclarar que la diversidad de elementos existentes exige extender el análisis en este punto, incorporando otros países CAF, de manera tal de obtener un panorama regional general que permita ubicar a cada uno respecto de sus pares en ALC.

TABLA 1:
Estado de situación de cada país

	Estrategia / Hoja de Ruta	Plan de acción	Sistemas de incentivos y apoyo financiero
Argentina	Publicada por el Gobierno en septiembre de 2023	Publicado por el Gobierno en noviembre de 2023	RIGI para grandes inversiones Proyectos en trámite legislativo
Barbados	No	No	No
Bolivia	En elaboración por el Gobierno	No	Proyecto en trámite legislativo
Brasil	Ley 14.948/2024 Política Nacional de Hidrógeno Bajo en Carbono	Publicado por el Gobierno en agosto de 2024	REHIDRO PHBC Proyectos en trámite legislativo
Colombia	Publicada por el Gobierno en septiembre de 2021	No	Ley 2099 de 2021 y decreto reglamentario 1476 de 2022

	Estrategia / Hoja de Ruta	Plan de acción	Sistemas de incentivos y apoyo financiero
Costa Rica	Publicada por el Gobierno en julio de 2023	No	Proyecto en trámite legislativo
Chile	Publicada por el Gobierno en noviembre de 2020	Publicado por el Gobierno en mayo de 2024	Líneas de acción I+D del Plan de Acción
Ecuador	Publicada por el Gobierno en julio de 2023	No	No
El Salvador	No	No	No
Jamaica	No	No	No
México	En preparación por el Gobierno	No	No
Panamá	Publicada por el Gobierno en julio de 2023	No	No
Paraguay	Propuesta del estudio publicado por el Gobierno en junio de 2021	No	No
Perú	Propuesta de la Asociación Peruana del Hidrógeno 2022	No	Ley 31.992 de 2024 de Fomento del Hidrógeno Verde
República Dominicana	Propuesta del estudio publicado por GIZ y el Gobierno en 2024	No	No
Trinidad y Tobago	Publicada por el Gobierno en noviembre de 2022	No	No
Uruguay	Publicada por el Gobierno en agosto de 2024 (final)	Programa H2U 2022	Fondo Sectorial del Hidrógeno Verde Ley 16906 de Inversiones y Promoción Industrial
Venezuela	No	No	No

Fuente: elaboración propia

A continuación, se detalla la situación de cada país.

● Argentina

Argentina es un país pionero en el desarrollo del hidrógeno renovable en América Latina. En 2006 se promulgó la Ley 26.123 de Promoción del Hidrógeno (Honorable Congreso de la Nación Argentina, 2006), en la cual se declara de interés nacional el desarrollo de la tecnología, la producción, el uso y las

aplicaciones del hidrógeno como combustible y vector de energía. En su texto no existe una definición del hidrógeno, aunque en sus objetivos se incluye la obtención del hidrógeno a partir del uso de energías tanto renovables como no renovables (Art. 3 g). En el Capítulo VI se crea el Fondo Nacional de Fomento del Hidrógeno (FONHIDRO) y en el Capítulo VII se establece un Régimen Fiscal Promocional por el término de 15 años a contar desde el ejercicio siguiente al de su promulgación. Sin embargo, dado que la ley no fue reglamentada, nunca entró en vigor.

El impulso normativo fue retomado a partir de 2020, con la presentación de varios proyectos de ley en el Congreso de la Nación (Cámara de Diputados de Argentina, 2021) enfocados en la promoción del hidrógeno renovable y distintas iniciativas públicas y privadas para la elaboración de una estrategia y hoja de ruta nacional (Consejo Económico y Social, CES, 2021) (Plataforma H2 Argentina, 2020).

En la segunda Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDN) publicada en 2020, junto con su actualización de 2021 (Jefatura de Gabinete de Ministros, 2020), el país estableció el compromiso de no superar la emisión neta de 349 Mt de CO₂e a 2030. La Estrategia de Desarrollo Resiliente con Bajas Emisiones a Largo Plazo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022), elaborada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el marco del Artículo 4, párrafo 19 del Acuerdo de París, reconoce la necesidad de hacer todos los esfuerzos para alcanzar la neutralidad en emisiones de GEI para el 2050.

Dentro del proceso de transición energética, el sector del hidrógeno tiene una relevancia estratégica. Mediante la Resolución 517/2023 de la Secretaría de Energía (Ministerio de Economía), Argentina aprobó el Plan Nacional de Transición Energética a 2030 (Secretaría de Energía, 2023), con los lineamientos y escenarios para la Transición Energética a 2050. Entre los diferentes campos de acción y las distintas medidas a desarrollar se contempla específicamente el hidrógeno bajo en emisiones. Las disposiciones buscan eliminar los obstáculos al desarrollo de proyectos y hacer del hidrógeno bajo en emisiones un sector viable, situando al país como un competidor clave en el contexto global como exportador.

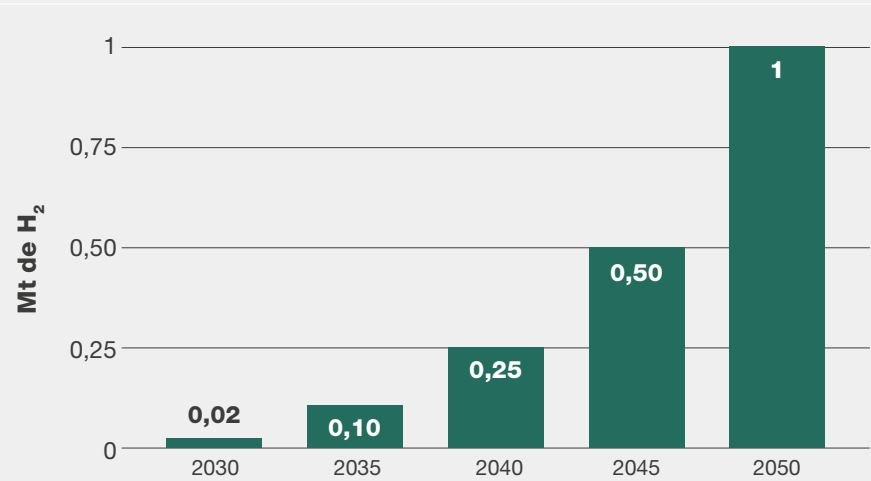
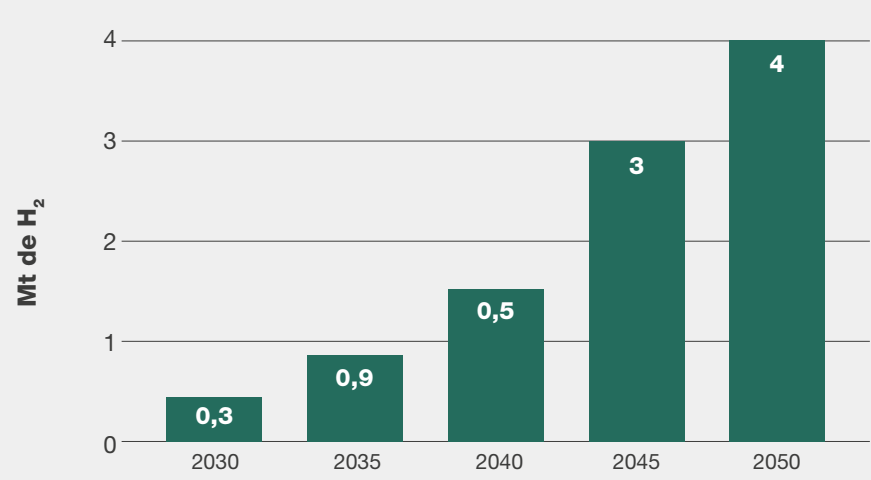
Los ámbitos de acción no se limitan al hidrógeno renovable, sino que incluyen otras opciones de hidrógeno de bajas emisiones que podrían ser viables para el país. Así, el Área de Acción 19 apunta a la generación de las condiciones regulatorias propicias para su desarrollo, con énfasis en las tecnologías para

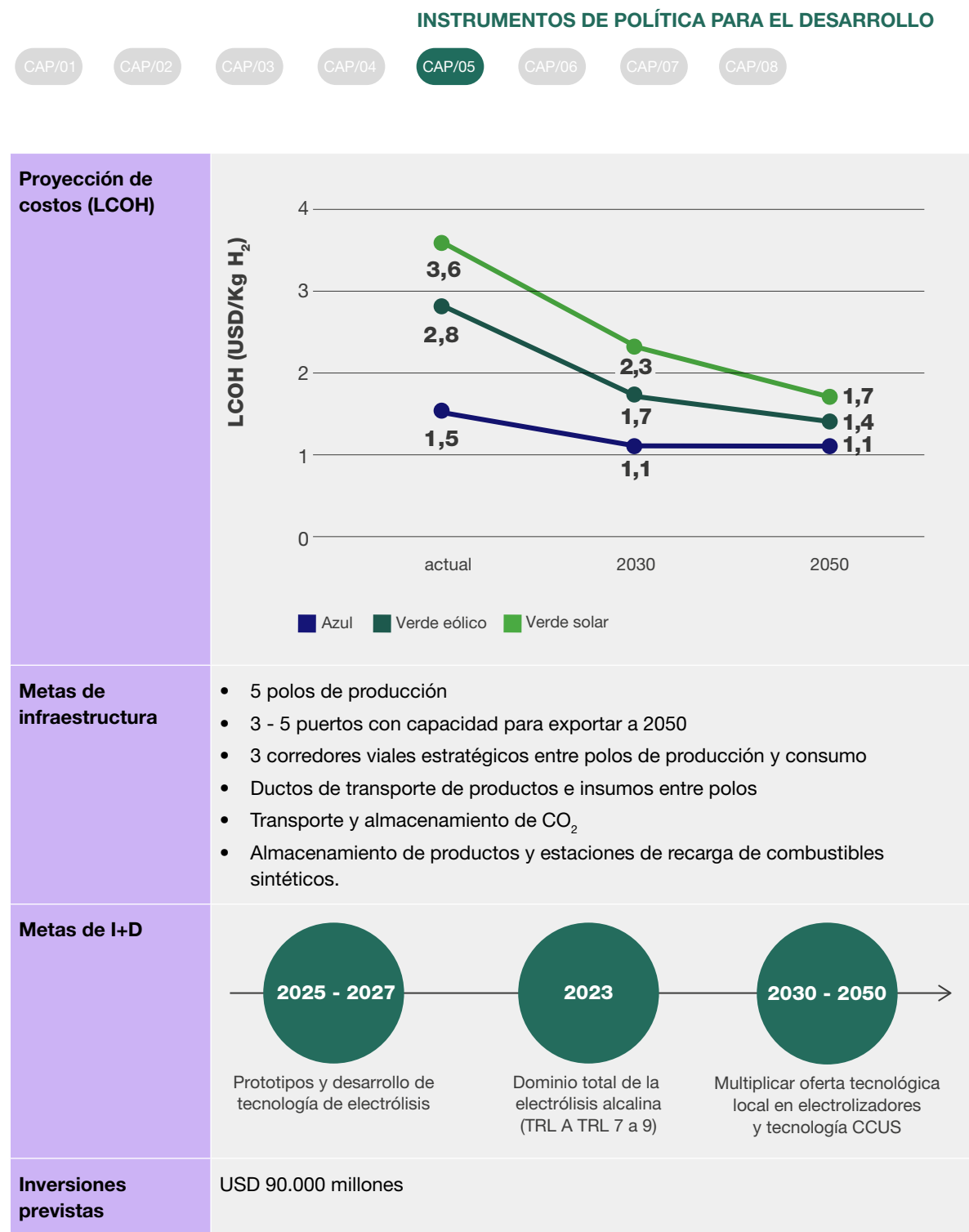
la captura del CO₂ o la producción de hidrógeno utilizando energías bajas en emisiones como la energía nuclear y el gas natural, considerando nuevas tecnologías como la pirólisis. El Área de acción 20 apunta al desarrollo de conocimiento para impulsar la aplicación del hidrógeno bajo en emisiones en la industria, la creación de valles del hidrógeno y la adopción del hidrógeno verde en el transporte terrestre, favoreciendo la producción de vehículos eléctricos de pila de combustible alimentados con hidrógeno.

En septiembre de 2023, el Gobierno de Argentina presentó la Estrategia Nacional para el Desarrollo de una Economía del Hidrógeno (ENH) (Secretaría de Asuntos Estratégicos, 2023). El instrumento es el resultado del trabajo coordinado de diferentes áreas de gobierno nacionales y provinciales con los sectores privados, académicos y sindicales, principalmente canalizado a través de la Mesa Intersectorial del Hidrógeno. Se trata de una herramienta de política pública que traza líneas de acción y metas a 2050 para generar certidumbre en torno al desarrollo del hidrógeno de bajas emisiones, identificado como un vector energético y un insumo para la industria. En la Tabla 2 se resumen sus principales elementos.

TABLA 2:
Elementos de la ENH Argentina

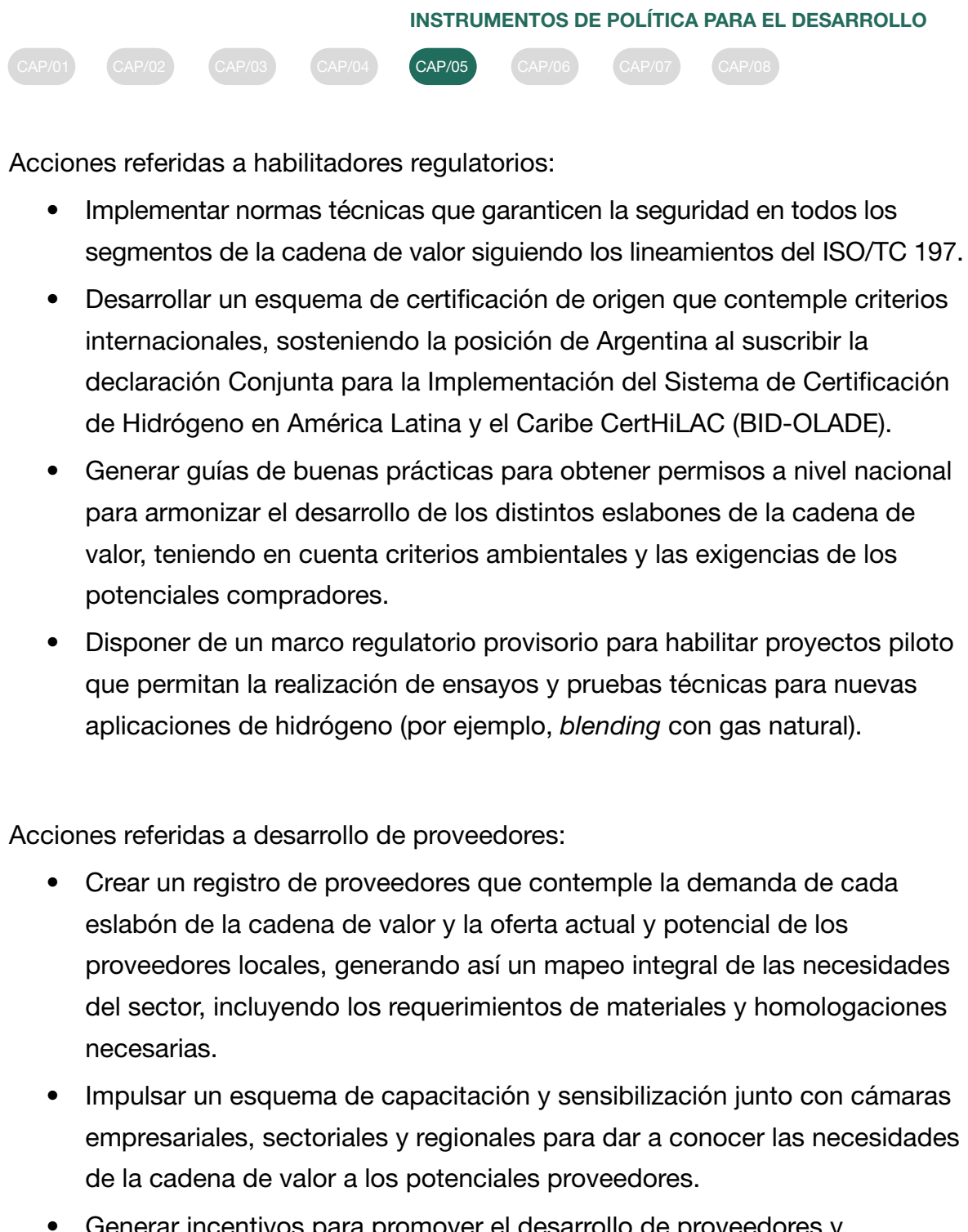
Visión	Tres ejes: - Se reconoce la importancia de impulsar el desarrollo tecnológico y productivo en toda la cadena de valor, incluyendo la producción de bienes de capital críticos y la provisión de servicios tecnológicos - Se contempla la producción de hidrógeno de bajas emisiones por medio de distintas tecnologías - Se establecen dos pilares para el despliegue de la economía del hidrógeno: el mercado interno y los mercados de exportación
Tecnologías de producción	Hidrógeno de bajas emisiones, producido mediante: - Fuentes renovables (verde) - Energía nuclear (rosa) - Combustibles fósiles con captura de CO₂ (azul)

Ámbitos	Dos pilares para el despliegue: - Mercado interno - Mercados de exportación.												
Metas de producción	5 Mt anuales a 2050 (20% mercado interno y 80% mercado de exportación)												
Metas de mercado interno	 <table><tr><th>Año</th><th>2030</th><th>2035</th><th>2040</th><th>2045</th><th>2050</th></tr><tr><td>Mt de H₂</td><td>0,02</td><td>0,10</td><td>0,25</td><td>0,50</td><td>1</td></tr></table>	Año	2030	2035	2040	2045	2050	Mt de H ₂	0,02	0,10	0,25	0,50	1
Año	2030	2035	2040	2045	2050								
Mt de H ₂	0,02	0,10	0,25	0,50	1								
Metas de exportación	 <table><tr><th>Año</th><th>2030</th><th>2035</th><th>2040</th><th>2045</th><th>2050</th></tr><tr><td>Mt de H₂</td><td>0,3</td><td>0,9</td><td>1,5</td><td>3</td><td>4</td></tr></table>	Año	2030	2035	2040	2045	2050	Mt de H ₂	0,3	0,9	1,5	3	4
Año	2030	2035	2040	2045	2050								
Mt de H ₂	0,3	0,9	1,5	3	4								
Metas de capacidad instalada de electrólisis	2 GW a 2030 30 GW a 2050 (55 GW de generación renovable)												



Fuente: elaboración propia

La Mesa Intersectorial del Hidrógeno elaboró una propuesta de Planes de Acción (Secretaría de Asuntos Estratégicos, 2023) para organizar la agenda de trabajo de los próximos años, considerando las metas a 2030-2050 establecidas en la ENH. Las acciones se agrupan en función de cinco temas críticos identificados: habilitadores regulatorios, desarrollo de proveedores, formación y empleo, infraestructura y promoción de la demanda.



- Mejorar los datos estadísticos respecto a los niveles técnicos y de competencias certificadas.
- Articular entre instituciones las capacitaciones existentes para brindar formaciones teórico-prácticas, vinculando los contenidos con las necesidades planteadas por las empresas y generar espacios de prácticas (técnicos, finanzas, directivos).
- Desarrollar cursos de corto plazo y para mandos medios, rescatando aprendizajes de experiencias de otros países.
- Generar un registro de oferta de capacitaciones para la certificación de competencias.
- Incentivar programas de becas compartidas con empresas operadoras de energía y gremios para perfeccionar el personal de las PYME, con reducciones impositivas.

Acciones referidas a infraestructura:

- En el corto plazo, planear estaciones de carga piloto para expendio de *blend* de hidrógeno considerando la red de estaciones de GNC. A largo plazo, evaluar el establecimiento de estaciones piloto de carga de combustibles sintéticos líquidos asociados a PtX y combustibles sintéticos para la aviación (SAF).
- Realizar estudio sobre posible corredor bioceánico entre polos de producción y puertos entre Argentina y Chile.
- Establecer un primer proyecto insignia piloto en Bahía Blanca, por su avance en logística de puerto y producción de hidrógeno gris, y en la Patagonia un proyecto piloto de combustibles limpios por la densidad de barcos de turismo y otros, como acciones para generar la demanda del exterior.
- Priorizar rutas para su acondicionamiento y establecer a futuro corredores verdes de transporte e infraestructura de carga.
- Evaluar disponibilidad de transporte en ductos para proveer caudal firme para producir H₂ azul.
- Establecer un canal para la recepción de necesidades de los productores de hidrógeno, que permita a las áreas de planificación de infraestructura

eléctrica analizar las necesidades para diseñar el refuerzo de la red de transporte de energía eléctrica.

Acciones referidas a promover la demanda:

- Sensibilizar e informar sobre mercados de carbono, ajuste de carbono en frontera, bonos, financiamiento climático y otros instrumentos financieros en desarrollo a nivel global y la relación potencial con el desarrollo de la economía del hidrógeno.
- Articular con áreas gubernamentales de turismo, defensa, transporte a nivel provincial y nacional para incentivar la carga de combustibles limpios en barcos y aviones, en particular los de turismo (cruceros) en puertos argentinos, así como el turismo antártico.
- Promocionar la descarbonización de la actividad minera a través de la utilización de hidrógeno de bajas emisiones.
- Difundir las ventajas competitivas de la Argentina para la economía del hidrógeno en ferias, misiones internacionales y otros espacios para generar acuerdos con países potencialmente demandantes de hidrógeno de bajas emisiones.

Además de los instrumentos y normativa a nivel nacional, también existen estrategias provinciales:

- **Plan Estratégico de Hidrógeno - Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur:** apunta al desarrollo de proyectos de inversión para la producción y comercialización de hidrógeno azul y verde, así como de otros derivados. Su objetivo es generar las herramientas para lograr organizar la producción de hidrógeno en esas regiones, respetando criterios socioambientales en toda la cadena de valor.
- **Plan Estratégico Hidrógeno Verde - Río Negro:** destaca los recursos naturales, las capacidades y la infraestructura existente en la provincia, que la ubica como una posibilidad competitiva para el desarrollo de proyectos de producción de hidrógeno verde. Su objetivo es la industrialización de la cadena de valor, la exportación de hidrógeno verde y la visibilización de Río Negro como plaza de inversiones nacionales y extranjeras.

Barbados

Hasta el momento, Barbados no ha avanzado en la elaboración de una estrategia u hoja de ruta para el hidrógeno verde ni en una normativa específica para su desarrollo. Aun así, el país está actuando para impulsar la transición al hidrógeno verde, a través de proyectos e inversiones I+D.

El 7 de junio de 2024, el Gobierno, a través de su agencia Barbados Investment and Development Corporation (BIDC) (Barbados Investment and Development Corporation, s.f.), y la empresa Seabased Group firmaron un memorando de entendimiento (Barbados Investment and Development Corporation y Seabased Group, 2024) para construir un parque piloto de energía undimotriz de 2 megavatios (MW), que se ampliará a 10 MW o más y que proveerá el insumo eléctrico para una instalación de producción de hidrógeno verde.

BIDC (Export Barbados) es un organismo gubernamental dependiente del Ministerio de Industria, Innovación, Ciencia y Tecnología, que apoya la diversificación y el crecimiento de la economía mediante nuevas inversiones, el aumento de las exportaciones y la creación de empleo. La implementación de este proyecto de hidrógeno a través de la agencia gubernamental de exportaciones parece indicar una voluntad política orientada a los mercados internacionales. Sin embargo, la consolidación del sector del hidrógeno dentro de la economía de Barbados requerirá que el país aborde una estrategia integral, donde se exprese una visión nacional completa, los objetivos y las acciones para lograrlos.

Esa estrategia integral deberá estar articulada con las políticas públicas nacionales en materia energética e industrial. La Política Energética Nacional de Barbados 2019–2030 (Ministry of Energy and Water Resources, 2019) está diseñada para alcanzar los objetivos de transformación de los estados insulares con energía 100% renovable y neutralidad de carbono para 2030. El instrumento abarca todos los aspectos del sector energético y ofrece un marco para que la isla pase de una economía basada en combustibles fósiles a una basada completamente en fuentes de energía renovables. Sin embargo, no se incluye al hidrógeno entre los sectores identificados. La modificación de esta Política Energética Nacional de Barbados para la inclusión del hidrógeno también puede ser un paso importante en la formulación de una política pública sólida para el desarrollo del sector, enviando una señal clara a los potenciales inversores en el sector energético en ese país.

Bolivia

Bolivia todavía no cuenta con una estrategia nacional ni regulación relacionada para el hidrógeno, pero está trabajando en distintos niveles para el desarrollo de normativa en el sector.

En octubre de 2024 el Gobierno anunció avances en una Hoja de Ruta y la Estrategia Nacional para la producción y usos del hidrógeno verde en Bolivia, que será publicada en el corto plazo. Si bien el borrador del documento no fue publicado, se dio a conocer que definirá los lineamientos del rumbo para Bolivia en el desarrollo del hidrógeno, considerando su situación actual y potencial, incluyendo una estimación del potencial para la producción, un análisis de infraestructura, capacidades humanas, tecnológicas y estimación de LCOH. Asimismo, se incorpora una estimación de la demanda interna con foco en sustitución de importaciones de combustibles y demanda en mercados extranjeros. La proyección para 2050 incluye una identificación de áreas de oportunidad para Bolivia, su Visión a 2050, líneas objetivo y metas, así como la identificación de los principales desafíos y riesgos y contingencias, considerando la realidad nacional.

En junio de 2024, impulsado por el Gobierno Autónomo Departamental de Oruro, se presentó ante la Asamblea Legislativa el Proyecto de Ley No. 170-23, de Fomento y Promoción del Desarrollo de la Industria del Hidrógeno Verde (Periódico La Patria, 2023), que incluye los siguientes aspectos:

- **Hidrógeno verde:** la Ley será de aplicación al hidrógeno verde producido a través de un proceso de electrólisis de agua. No entran en el ámbito de la ley otros medios de producción renovables ni el hidrógeno producido a partir de fuentes fósiles.
- **Marco regulatorio:** no consigna regulaciones específicas de la industria sino lineamientos generales, por ejemplo, la participación de las Entidades Territoriales Autónomas de Bolivia, que deberán ser tomadas en cuenta por el Ministerio de Hidrocarburos y Energía y por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua al momento de emitir las regulaciones correspondientes.
- **Sandbox regulatorio:** encomienda al gobierno la confección de un Sandbox Regulatorio, como herramienta para agilizar el mercado, en la medida que permitiría llevar a cabo proyectos de producción y

comercialización de hidrógeno verde sin la necesidad de contar con licencias y permisos.

- **Incentivos:** se prevén beneficios económicos y tributarios para incentivar la producción y la comercialización del hidrógeno verde, así como incrementar su consumo y el de sus derivados.
- **Fiscalización:** las actividades relacionadas con la cadena de valor del hidrógeno verde serán supervisadas y fiscalizadas, en el marco de las leyes, por una nueva institución gubernamental, a ser creada por el Ministerio de Hidrocarburos y Energías.
- **Mecanismos de inversión:** establece que el Estado podrá asociarse con inversionistas privados para la producción y comercialización de hidrógeno verde. Dichas asociaciones podrán ser sociedades comerciales privadas, empresas públicas, sociedades de economía mixta, asociaciones accidentales o instrumentos de alianza conjunta.
- **Certificación:** dispone la necesidad de implementar una certificación de origen verde, de modo que los productores y los comercializadores cuenten con un documento que garantice que el hidrógeno que producen y comercializan proviene de fuentes renovables, valorizando el beneficio medioambiental del producto.

• Brasil

Brasil cuenta con una larga historia de políticas públicas para el desarrollo del hidrógeno. El hito más relevante fue la publicación de la Hoja de Ruta para la Estructuración de la Economía del Hidrógeno en Brasil por el Ministerio de Minas y Energías en 2005. En ella se establecían objetivos a más de 20 años, señalando la importancia de las diferentes rutas tecnológicas en las que Brasil podría tener ventajas competitivas, el papel del gas natural en la transición hacia el predominio del hidrógeno verde y la difusión en los mercados de generación distribuida, regiones aisladas y autobuses urbanos.

En 2020, el Plan Nacional de Energía 2050 (PNE 2050) (EPE, 2020) señaló al hidrógeno como una tecnología disruptiva y como un elemento de interés en el contexto de la descarbonización de la matriz energética, enumerando varios usos y aplicaciones, además de aportar recomendaciones para la política energética.

Entre ellas, se enumera el diseño adecuado del marco jurídico-regulatorio que fomente la penetración de tecnologías aplicables a la cadena energética del hidrógeno en su conjunto (producción, transporte, almacenamiento y consumo), así como la necesidad de trabajar de manera articulada y coordinada con las instituciones internacionales.

A nivel nacional, Brasil está abordando el tema del hidrógeno con la participación de distintas agencias gubernamentales. En 2021, el Consejo Nacional de Política Energética (CNPE), del Ministerio de Minas y Energía, publicó la Resolución N°6 de 20 de abril de 2021 (Ministerio de Energía y Minas, 2021), que determina la realización de un estudio para una propuesta de directrices para el Programa Nacional de Hidrógeno (PNH2).

Las Directrices para el PNH2 (Ministerio de Minas y Energía, 2021) fueron presentadas por el CNPE en agosto de 2021. En ellas, se proyecta la visión de futuro sobre el rol del hidrógeno en Brasil y se establecen los principios sobre los cuales se construirá el PNH2, que estará estructurado en seis ejes temáticos (Tabla 3). Sin embargo, no se fijan metas cuantitativas de producción, capacidad instalada, infraestructura o aplicaciones.

TABLA 3:
Directrices para el PNH2 de Brasil

Visión de futuro	Posicionamiento con base en las características de la economía y del mercado brasileños:
	• Potencial de los recursos energéticos diversificados (incluido el gas natural) • Alta participación de fuentes renovables en la matriz energética nacional • Infraestructura de transporte de energía • Disponibilidad de agua • Base instalada de consumo potencial en industria, transporte, comercio, servicios y residencias, así como su potencial de expansión • Infraestructura portuaria y logística favorable para la inserción global • Base de formación tecnológica y de recursos humanos ya establecida y con un considerable potencial de expansión • Disponibilidad de fondos de I+D • Diferentes condiciones de financiación para proyectos de energías renovables e hidrógeno

Principios del PNH2	- Valorar el potencial nacional de recursos energéticos: reconocer las diversas fuentes de obtención de hidrógeno, renovable o no, así como la aplicación en múltiples sectores de la economía (transporte, energía, acero y minería, etc.) - Ser integral: reconocer las alternativas tecnológicas disponibles o potenciales, incluidas las sinergias, para producción, logística, almacenamiento y uso de hidrógeno - Alinearse con las ambiciones de descarbonizar la economía: considerar trayectorias que permitan al hidrógeno contribuir a la neutralidad de carbono para 2050 - Valorar e incentivar el desarrollo tecnológico nacional: en vista de las inversiones y experiencias ya existentes y la necesidad de continuidad del esfuerzo en I+D+i, para la formación y autonomía tecnológica y el desarrollo del sistema productivo nacional - Apuntar al desarrollo de un mercado competitivo: considerando el potencial de demanda interna y de exportación de hidrógeno, así como la evolución de los costos y riesgos en el corto, mediano y largo plazo - Buscar sinergias y articulación con otros países: reconociendo que este mercado debe tener cobertura global y su desarrollo puede acelerarse a través de la cooperación y coordinación internacional - Reconocer el aporte de la industria nacional: el país cuenta con una base industrial robusta para la producción de bienes de capital, productos y servicios capaces de contribuir a la economía del hidrógeno
Tecnologías de producción	Hidrógeno de bajas emisiones, producido sin discriminación de tecnología
Ámbitos esenciales para el desarrollo de una economía de hidrógeno	Tres pilares para el despliegue: Políticas públicas Tecnología Mercado
Ejes temáticos del PNH2	- Eje 1: Fortalecimiento de las bases científico-tecnológicas - Eje 2: Capacitación de recursos humanos - Eje 3: Planeamiento energético - Eje 4: Marco de referencia legal y regulatorio-normativo - Eje 5: Apertura y crecimiento del mercado y competitividad - Eje 6: Cooperación internacional

Fuente: elaboración propia

Acciones referidas al Eje 4: Marco de referencia legal y regulatorio-normativo:

- Mapear la legislación y normativa nacional existente para apoyar la inclusión del hidrógeno como vector energético y combustible en la matriz energética brasileña.
- Promover la regulación, a través de agencias gubernamentales, sobre la producción, el transporte, la calidad, el almacenamiento y el uso del hidrógeno y sus tecnologías mediante:
 - El mapeo de las competencias existentes de las agencias, organismos o entidades competentes reguladoras, así como de las nuevas necesidades.
 - La evaluación de la necesidad de proponer normativa sobre nuevas tecnologías en los tres niveles (federal, estatal y municipal).
 - La comprobación de que la regulación se mantiene abierta a las condiciones del mercado, evitando barreras y bloqueos tecnológicos.
 - La evaluación de las interrelaciones entre los sectores y la promoción de la armonización.
 - La elaboración de códigos, normas y estándares emitidos por las instituciones nacionales en consonancia con las reglas internacionales.
 - La promoción de la cooperación entre las dependencias gubernamentales para la regulación del hidrógeno, considerando sus múltiples fuentes y usos, buscando la armonización regulatoria, citando como ejemplo el transporte de hidrógeno mezclado con gas natural.
 - La evaluación de la necesidad de proponer normas de seguridad adicionales para la producción, el transporte y el uso del hidrógeno.
 - La evaluación de la necesidad de desarrollar mecanismos de certificación de hidrógeno para la producción y el consumo.

En las Directrices se definen pautas adicionales de gobernanza, como el establecimiento de un Comité Técnico del PNH2, representativo de los actores del sector, para gestionar el programa, que aprobará periódicamente el plan de trabajo, con las acciones, responsables y plazos con horizonte. Las acciones aprobadas deben buscar armonizar y crear sinergia con otros programas y políticas públicas.

Posteriormente, a través de la Resolución N° 6, de 23 de junio de 2022, se instituye el Programa Nacional de Hidrógeno PNH2 (Ministerio de Minas y Energía, 2022), que tiene como objetivo fortalecer el mercado y la industria del hidrógeno como vector energético en Brasil y recoge los principios y los ejes temáticos expuestos en las Directivas. Además, se crea el Comité Gestor y se establecen sus reglas de funcionamiento, incluyendo cinco Cámaras Temáticas para discusión de cuestiones específicas.

En agosto de 2023, el Ministerio de Minas y Energía hizo público el Plan de Trabajo Trienal (2023-2025) (Ministerio de Energía y Minas, 2023) elaborado por el Comité Gestor del PNH2. Enfocándose en todas las rutas tecnológicas bajas en carbono, el Plan de Trabajo Trienal contiene acciones orientadas a posicionar a Brasil como el mayor y más competitivo productor de hidrógeno de bajas emisiones de carbono de América Latina hasta 2035. El Plan de Trabajo Trienal define tres prioridades para el ciclo 2023-2025 (Figura 69) y las acciones que están directamente relacionadas con ellas ya están en curso de implementación.

FIGURA 69:
Prioridades establecidas para el ciclo 2023 – 2025 del Plan Trienal



Fuente: Plan Trienal

En las acciones referidas al marco de referencia legal y regulatorio-normativo, se definen los siguientes Componentes, muchos de los cuales ya en curso:

- Componente 1:** Mejoras de los marcos institucionales, jurídicos y regulatorios, como la normativa que establece la definición de hidrógeno bajo en carbono y las directrices para la definición de objetivos para la inserción del hidrógeno bajo en carbono en la economía brasileña.
- Componente 2:** Códigos, normas, estándares y certificaciones emitidos por instituciones nacionales en línea con las reglas internacionales. Mecanismos de certificación de la intensidad de carbono en las cadenas de hidrógeno y derivados.
- Componente 3:** Interrelaciones entre sectores, armonización y cooperación entre organismos gubernamentales.
- Componente 4:** Normas de seguridad adicionales.
- Componente 5:** Regulación, códigos, normas, estándares para nuevos usos y tecnologías.

La Ley N° 14.948/2024, publicada en agosto de 2024, instituye el marco legal para el hidrógeno bajo en carbono y establece la Política Nacional de Hidrógeno Bajo en Carbono (Presidencia de la República, 2024), con base en los siguientes principios, objetivos principales y herramientas (Tabla 4).

TABLA 4:
Principios y principales objetivos para la Política Nacional de Hidrógeno de Bajas Emisiones de Brasil

Principios	- Respeto de la neutralidad tecnológica en la definición de incentivos para la producción y el uso de hidrógeno con bajas emisiones de carbono - Inserción competitiva del hidrógeno bajo en carbono en la matriz energética brasileña para su descarbonización - Previsibilidad en la formulación de regulaciones y en el otorgamiento de incentivos para la expansión del mercado - Uso racional de la infraestructura existente dedicada al suministro de fuentes de energía - Promoción de la investigación y el desarrollo del uso del hidrógeno bajo en carbono
Principales objetivos	- Preservar el interés nacional - Incentivar las diversas rutas de producción del hidrógeno bajo en carbono y sus derivados, con el fin de valorar las múltiples vocaciones económicas nacionales - Promover el desarrollo sostenible y ampliar el mercado laboral de las cadenas productivas del hidrógeno bajo en carbono y sus derivados - Promover las aplicaciones energéticas del hidrógeno bajo en carbono y sus derivados y valorar su papel como vector de transición energética en diversos sectores de la economía nacional - Valorar el uso del hidrógeno bajo en carbono y sus derivados para abastecer el mercado interno y con fines de exportación
Herramientas	- El Programa Nacional del Hidrógeno (PNH2) - El Programa de Desarrollo de Hidrógeno Bajo en Emisiones de Carbono (PHBC) - La certificación del hidrógeno bajo en carbono (SBCH2) - El Régimen Especial de Incentivos a la Producción de Hidrógeno Bajo en Emisiones de Carbono (Rehidro) - La cooperación técnica y financiera entre los sectores público y privado para el desarrollo de la investigación de nuevos productos, métodos, procesos y tecnologías para la producción de hidrógeno bajo en emisiones en carbono - Los incentivos fiscales, financieros, crediticios y regulatorios legalmente instituidos

Fuente: elaboración propia

La ley introduce varias definiciones de hidrógeno, con base en un umbral de emisiones a lo largo del ciclo de vida y las fuentes de producción (Tabla 5).

TABLA 5:
Definiciones de Hidrógeno Ley N° 14.948/2024 de Brasil

Categoría	Definición
Hidrógeno bajo en carbono	Combustible de hidrógeno o insumo industrial recolectado u obtenido de fuentes distintas al proceso de producción y que tiene emisiones de GEI, según el análisis del ciclo de vida, con un valor inicial menor o igual a 7 kg CO ₂ eq/kg H ₂
Hidrógeno renovable	Hidrógeno bajo en carbono, combustible o insumo industrial recogido como hidrógeno natural u obtenido de fuentes renovables, incluido el hidrógeno producido a partir de biomasa, etanol y otros biocombustibles, así como hidrógeno electrolítico, producido por electrólisis del agua, utilizando energías renovables, como solar, eólica, hidráulica, biomasa, etanol, biogás, biometano, gas de vertedero, geotérmica y otras que serán definidas por el gobierno
Hidrógeno verde	Hidrógeno producido por electrólisis del agua, utilizando fuentes de energía renovables, tales como energía solar, eólica, hidroeléctrica, biomasa, etanol, biogás, biometano, gas de vertedero, geotérmica, sin perjuicio de otras que puedan ser reconocidas como renovables

Fuente: elaboración propia

La Ley N° 14.948/2024 confiere a la Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP) las competencias de órgano regulador y autoridad de aplicación para otorgar autorizaciones de producción de hidrógeno (incluyendo el hidrógeno natural o geológico) y las actividades relacionadas de procesamiento, importación, exportación, almacenamiento, transporte y comercialización de hidrógeno, sus derivados y portadores. Estas competencias están sujetas al desarrollo reglamentario.

En 2024, la ANP publicó el Informe sobre la Implementación del Marco Regulatorio del Hidrógeno Bajo en Carbono en Brasil (Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles, 2024), en elaboración desde 2022. Además de una visión general del tema y elementos técnicos relevantes, el informe presenta la estrategia regulatoria que adoptará la ANP para el hidrógeno bajo en carbono. Se incluye un mapa de necesidades regulatorias y un análisis de la posibilidad de aprovechar la normativa vigente, indicando las áreas técnicas involucradas, de acuerdo con la estructura organizacional de la ANP y su normativa interna vigente.

Una de las herramientas que instituye la Ley para promover el uso del hidrógeno es el Sistema Brasileño de Certificación del Hidrógeno (SBCH2). La certificación adoptará como atributo la intensidad de las emisiones de GEI, con base en el análisis del ciclo de vida. El sistema será de carácter voluntario para los productores de hidrógeno o sus derivados en el territorio nacional y podrá ser utilizado para fines de reporte y difusión. Para el eventual uso de hidrógeno de origen importado, el proceso de reconocimiento de la certificación adoptada en el territorio de origen se fijará por vía reglamentaria.

Cabe destacar que en Brasil ya existe un sistema de certificación de hidrógeno que está operativo. En 2022, la Cámara de Comercialización de Electricidad (CCEE) lanzó un esquema de Certificación de Hidrógeno para el mercado brasileño, con el apoyo del Banco Mundial. Las normas y principios del esquema están reflejados en el Manual para Certificación de Hidrógeno (Cámara de Comercialización de Energía Eléctrica, 2022). La versión inicial del documento estaba destinada a certificar la fuente de producción de bajas emisiones de carbono, para atender la demanda de proyectos piloto para fabricar el producto en Brasil. En los años posteriores, se realizaron ajustes atendiendo las demandas del mercado en relación con los estándares nacionales e internacionales. Con el objetivo de adaptarse a las reglas del mercado y ofrecer una certificación que esté en armonía con el mercado mundial del hidrógeno, el desarrollo del esquema de certificación se realizará por etapas y se irá revisando periódicamente.

A finales de 2023, la CCEE emitió los primeros certificados para dos proyectos, uno en Ceará y otro en Minas Gerais. Asimismo, actualizó su manual para cumplir con criterios de la RED II y RED III, y en enero de 2024 inició el proceso de reconocimiento como esquema voluntario nacional de certificación ante la Comisión Europea.

● Chile

El Gobierno de Chile publicó la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde en noviembre de 2020 (Gobierno de Chile, 2020), convirtiéndose así en el primer país de América Latina en contar con este tipo de instrumento de política pública para el hidrógeno.

El documento es el resultado del trabajo participativo y colaborativo desarrollado a lo largo de 2020, a través de talleres ciudadanos nacionales y locales, mesas técnicas con representantes de empresas, universidades, centros de investigación y organizaciones sectoriales, la mesa interinstitucional conformada por diversos ministerios y el consejo asesor formado por especialistas, que asesoró al Ministerio de Energía.

TABLA 6:
Visión y Objetivos de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Chile

Visión	El hidrógeno es una nueva industria que puede ser motor de crecimiento e instrumento para lograr una nueva identidad productiva para Chile, que puede permitirle transitar de ser un país históricamente basado en recursos no renovables a uno que añade valor verde a sus exportaciones, como cobre verde, energéticos limpios y otros productos con baja huella de carbono que el mundo necesita para descarbonizarse. La descarbonización y la competitividad en energías renovables le dan la oportunidad de crear un sector económico que podría equiparar en tamaño a la industria minera nacional.
Objetivos	• Contar con 5 GW de capacidad de electrólisis construida y en desarrollo a 2025 • Producir el hidrógeno verde más barato del planeta para 2030, con un costo inferior a 1,5 USD/kg • Ser productor y exportador líder de hidrógeno verde y sus derivados a 2030, con una capacidad instalada de electrólisis de 25 GW 2025 Capacidad de electrólisis construida y en desarrollo Líder exportador global de hidrógeno verde y sus derivados Líder productor global de hidrógeno verde por electrólisis 5 BUSD 5 GW 200 kton/año 2,5 BUSD/año <1,5 USD/kg 25 GW Top 1 inversiones en hidrógeno verde en ALC Producción en al menos 2 polos de hidrógeno verde en Chile El hidrógeno verde más barato del planeta 2030

Fuente: elaboración propia

Se prevé el despliegue de la economía del hidrógeno verde en tres etapas, partiendo de la implementación de aplicaciones locales en el corto plazo para luego acceder a mercados de exportación (Tabla 7).

TABLA 7:
Etapas de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Chile

Etapa	Definición
I: 2020 – 2025 Activar la industria doméstica	Despliegue del hidrógeno verde en 6 aplicaciones prioritarias para construir un mercado local. El foco está en las aplicaciones que se encuentran más cerca de mercado y/o que presentan una demanda establecida, concentrada y de gran escala: • Uso en refinerías • Amoníaco doméstico • Camiones mineros (CAEX) • Camiones pesados de ruta • Buses de larga autonomía • Inyección en redes de gas (hasta 20%) Así, se generará conocimiento, escala, infraestructura y cadenas de suministro que permitirán a Chile acceder a mercados de exportación.
II: 2025 – 2030 Apalancar la experiencia local para entrar en mercados internacionales	Se prevén más usos de transporte y el inicio de la exportación. Una producción de hidrógeno más competitiva desplazará a combustibles líquidos en el transporte terrestre en nuevas aplicaciones, como en la minería, y a combustibles gaseosos en redes de distribución. Se levantará una industria de producción y exportación de amoníaco verde mediante la atracción y promoción de consorcios de escala de GW. En paralelo, se abre una clara oportunidad de exportación de hidrógeno y sus derivados a mercados internacionales. Se establecerán acuerdos para acelerar el desarrollo de la exportación de hidrógeno.
III: 2030 + Explotar las sinergias y economías de escala para avanzar como proveedor global de energéticos limpios	2 Exportaciones de hidrógeno verde¹ 1: Incluye exportaciones de metanol verde y combustibles sintéticos. ■ Europa ■ EEUU ■ Japón/Corea ■ China ■ LATAM

Fuente: elaboración propia

La Estrategia traza los lineamientos de un plan de acción para la implementación, sobre los cuatro ejes siguientes:

- **Fomento al mercado doméstico y a la exportación**
 1. Ronda de financiamiento (de USD 50 millones) para proyectos tempranos y competitivos de producción y uso de hidrógeno verde cuya implementación permita cerrar brechas de costos, con una producción de menos de 1,5 USD/kg H₂ a 2030.
 2. Mesa público-privada para discutir un precio al carbono e impuestos que reflejen de mejor manera las externalidades de los combustibles y acordar una hoja de ruta que refleje adecuadamente el costo social de utilizar combustibles fósiles.
 3. Diplomacia del hidrógeno verde para posicionar internacionalmente a Chile como fuente de combustibles limpios, utilizando la amplia red de acuerdos comerciales de Chile, su participación en plataformas internacionales y sus relaciones diplomáticas.
- **Normativa, seguridad y pilotajes**
 1. Desarrollo de regulación y normativa para resguardar aspectos de seguridad y dar certeza a los inversionistas, mediante un plan coordinado de desarrollo normativo entre todos los servicios públicos con competencia regulatoria sobre la cadena de valor del hidrógeno.
 2. Establecimiento de un equipo operativo para acompañar la tramitación de permisos y el desarrollo de pilotajes de hidrógeno verde y sus derivados.
 3. Revisión de la regulación y la infraestructura del gas natural para promover la introducción de cuotas de hidrógeno verde. Se estudiará la capacidad de la infraestructura existente de gas natural en Chile y la experiencia internacional.
- **Desarrollo social y territorial**
 1. Participación temprana y continua de las comunidades cercanas a proyectos, a través de diálogo con desarrolladores de proyectos, capacitación y fortalecimiento técnico, mecanismos de asociatividad

para fomentar el desarrollo de proveedores locales y mejores prácticas en gestión de intereses territoriales y comunitarios.

2. Promoción del uso de hidrógeno verde para complementar o reemplazar la generación eléctrica basada en combustibles fósiles en sistemas eléctricos aislados y medianos, fuera del sistema eléctrico nacional.
3. Evaluación de oportunidades y desafíos del hidrógeno verde, para incluir la cadena de valor del hidrógeno verde en los procesos de elaboración de políticas y planes territoriales en diversas regiones, con miras a una adecuada inserción territorial y un uso racional del suelo y los recursos naturales, considerando sinergias e interacciones con otras actividades y requerimientos humanos, tales como el uso de agua.

• Formación de capacidades e innovación

1. Convocatoria a los actores de la industria, la academia y los centros de formación, para identificar brechas y formar las capacidades nacionales requeridas por la industria.
2. Elaboración de una hoja de ruta I+D que determine hitos, pilotos y actividades necesarias para desarrollar nuevo conocimiento, en colaboración con el Instituto de Tecnologías Limpias –plataforma de innovación con financiamiento público de hasta USD 193 millones-, otros actores nacionales de innovación y el sector privado.
3. Creación de grupo de trabajo con empresas del Estado para acelerar la adopción del hidrógeno verde en ellas y sus proveedores.

En cuanto a la gobernanza, se otorga al Ministerio de Energía, a través de la División de Combustibles y Nuevos Energéticos, la responsabilidad de realizar el seguimiento de la Estrategia, coordinar la ejecución del plan de acción y ejecutar la actualización de este proceso cada 3 años. En 2021, la Ley N° 21.305 (Congreso Nacional de Chile, 2021) incorporó al hidrógeno y los combustibles a partir de hidrógeno, y demás fuentes y vectores energéticos dentro de las competencias del Ministerio de Energía.

En mayo de 2024 el Ministerio de Energía de Chile publicó el Plan de Acción Hidrógeno Verde 2023-2030 (Ministerio de Energía de Chile, 2024), contemplado

Las acciones propuestas son variadas tanto en alcance como en temática y competencia. Así, algunas dependen de un solo servicio público y otras requieren un trabajo interministerial coordinado.

para el hidrógeno verde, sus derivados y toda su cadena de valor. Se destaca su rol fundamental en la consecución de la meta de carbono neutralidad a 2050, así como las oportunidades que ofrece para el desarrollo sostenible del país.

Las acciones propuestas son variadas tanto en alcance como en temática y competencia. Así, algunas dependen de un solo servicio público y otras requieren un trabajo interministerial coordinado. Muchas de ellas están diseñadas para implementarse de manera concatenada y lógica. Algunas son de naturaleza específica, mientras que otras son transversales.

El Plan de Acción organiza 81 medidas en 18 líneas de acción, a ser desarrolladas en dos ventanas temporales. La primera ventana de implementación (2023-2026) está diseñada para lograr las adecuadas señales de inversión, normas y regulaciones necesarias, con un fuerte enfoque en tendencias hacia el amoníaco, y afianzando relaciones con posibles compradores. La segunda ventana (2026-2030) está concebida para comenzar a concretar el desarrollo productivo y la descarbonización con un énfasis en el desarrollo regional y local (Figura 70).

FIGURA 70:
Ventanas Temporales de Implementación del Plan de Acción Hidrógeno Verde 2023-2030 de Chile



Fuente: Plan de Acción 2023-2030

Colombia

Publicada en septiembre de 2021 por el Ministerio de Minas y Energía, la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia (Ministerio de Energía y Minas, 2021) subraya la competitividad del país en recursos renovables y fósiles, admitiendo ambas vías de producción para el hidrógeno de bajas emisiones y sus derivados. Sin embargo, reconoce que el hidrógeno azul dispone de una ventana de oportunidad limitada al corto y medio plazo, aunque su uso puede contribuir a la descarbonización de sectores industriales importantes. Por su parte el hidrógeno verde será la ruta de producción de referencia para abastecer la demanda de hidrógeno de bajas emisiones en el largo plazo, a partir de 2040.

Se destaca también el posicionamiento geográfico estratégico e infraestructura del país. Colombia se encuentra en el punto de encuentro entre América Central y América del Sur, y tiene costas en dos océanos con rutas marítimas a todos

los continentes. Además, está unida mediante redes de transporte, distribución y comercio con otros cinco países. Esta situación, sumada a la competitividad de los costos, permitirá a Colombia formar parte de los mercados internacionales de hidrógeno de bajas emisiones y derivados, que abarcarán tanto los países cercanos de ALC como los grandes centros de demanda en otros continentes.

La estrategia elaborada se cimienta en cinco pilares que buscan el desarrollo social, medioambiental y económico de Colombia (Tabla 8).

TABLA 8:
Pilares de la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia

Reducción de emisiones	El hidrógeno y sus derivados serán una pieza clave para alcanzar la neutralidad de carbono, a la que Colombia se ha comprometido para 2050. Su despliegue atenderá a razones de costo-beneficio y tendrá cabida en aplicaciones en las que la electrificación no es viable o no hay otros energéticos adecuados desde el punto de vista de costo, ambiental o técnico, por ejemplo, el transporte pesado de larga distancia, el transporte aéreo y marítimo y distintos sectores industriales. Además, puede facilitar el despliegue e integración de mayor capacidad de generación renovable, favoreciendo una economía sostenible, facilitando la gestión del sistema y habilitando el transporte y el almacenamiento de energía
Desarrollo económico	El desarrollo de la cadena de valor del hidrógeno es una vía hacia una economía de exportación de bajas emisiones. La abundancia de recursos naturales para la producción de energía renovable y el posicionamiento geoestratégico permitirán a Colombia competir en los mercados globales. Para ello, se necesitará la cooperación con los países que son grandes economías industriales e importarán hidrógeno de bajas emisiones para cumplir sus objetivos de descarbonización. A través de esa cooperación, Colombia podrá acceder a la tecnología, capacitación e inversiones para posicionarse en el mercado incipiente. La producción y exportación de hidrógeno compensará progresivamente la disminución del peso de la exportación de los energéticos tradicionales de origen fósil, que actualmente es uno de los pilares de la economía colombiana y que irá disminuyendo en una economía global de bajas emisiones. El hidrógeno no sólo será aprovechado para la exportación sino también para el desarrollo de una nueva capacidad industrial nacional, atrayendo oportunidades dentro de las cadenas de valor tecnológicas mediante fabricación de equipos y el establecimiento de industrias de bajas emisiones que lo utilicen en sus procesos

Objetivo de país	El Gobierno nacional manifiesta su claro compromiso con el despliegue del hidrógeno de bajas emisiones como motor de desarrollo económico, social y medioambiental. El Gobierno desarrollará en el corto plazo un marco regulatorio y normativo transparente y estable, junto con una estrategia de incentivos. Además, se realizará un planeamiento integrado de infraestructuras que permita los primeros despliegues. Dichas iniciativas involucrarán al sector privado, la academia y la sociedad civil como actores clave en el despegue de la industria en Colombia.
Comunidades locales	El hidrógeno será una vía de integración del territorio y herramienta de desarrollo inclusivo. El desarrollo de la economía del hidrógeno pondrá en el centro a las comunidades desde el inicio, teniendo en cuenta su situación actual, necesidades, aspiraciones y capacidades. El Gobierno y autoridades locales pondrán en marcha un plan de socialización que traslade el potencial del hidrógeno para transformar económicamente las comunidades mediante la generación equilibrada de riqueza y empleo a la vez que se capacita el personal y se protegen los recursos naturales, las personas y el medio ambiente. Se involucrará a las comunidades en el diálogo acerca de las oportunidades para el territorio, situándolas en el centro de la planeación territorial y económica, involucrando también a los promotores para definir las mejores prácticas para el desarrollo económico local, favoreciendo la creación compartida de valor.

Fuente: Elaboración propia.

La estrategia nacional a largo plazo se divide en dos periodos principales: 2020-2030 y 2030-2050 (Tabla 9).

TABLA 9:
Períodos de la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia

Periodo 2020 - 2030	
El hidrógeno de bajas emisiones penetra únicamente en aquellas aplicaciones más competitivas. Este periodo destaca por una estrecha colaboración público-privada que habilitará y fomentará el desarrollo del mercado. Se establecen metas nacionales a 2030, tanto del lado de la producción como del de la demanda, cuya consecución permitirá desarrollar las capacidades técnicas e industriales y la experiencia necesaria para poder aprovechar todo el potencial futuro del hidrógeno.	
Producción	- Desarrollo de 1 a 3 GW de electrólisis, tanto en regiones de alto recurso renovable como en lugares próximos al consumo, con el objetivo de minimizar los costos asociados al transporte, con la instalación de 1,5 a 4 GW de generación renovable - Alcanzar un hidrógeno verde competitivo, logrando costos de 1,7 USD/kg cuando se produzca en las zonas con recurso renovable - Producción de al menos 50 kt de hidrógeno azul mediante la captura de CO₂ en plantas SMR existentes o nuevas plantas (SMR o gasificación) para su almacenamiento o utilización
Demanda	- Flota de 1.500 a 2.000 vehículos ligeros de pila de combustible para transporte de pasajeros y carga. Se fomentará el desarrollo de hidrogeneras⁶ en grandes núcleos de población y la adquisición de vehículos de hidrógeno para aplicaciones de gran recorrido como taxis o furgonetas de reparto - Flota de 1.000 a 1.500 vehículos pesados de pila de combustible para transporte de pasajeros y carga. Se pondrá foco en el despliegue de hidrogeneras en rutas de gran tránsito de vehículos que conecten ciudades, fomentando la adopción de esta tecnología por empresas de transporte de mercancías y pasajeros - Red de 50 a 100 hidrogeneras de acceso público para el repostaje de los vehículos anteriores - Consumo de 40% de hidrógeno de bajas emisiones en el sector industrial respecto del total del hidrógeno consumido actualmente en el sector, considerando el consumo de hidrógeno como materia prima y su uso como fuente energética
Transversales	- Movilizar entre 2.500 y 5.500 millones de dólares de inversión, correspondiendo el rango inferior a la meta de 1 GW a 2030 y el superior a los 3 GW. Estas inversiones provendrán principalmente del sector privado, aunque contarán con apoyo público en los casos en los que se precise. Se espera la creación de 7.000 a 15.000 empleos directos e indirectos gracias al desarrollo de proyectos de producción, demanda y transporte de hidrógeno. - Contribuir a la descarbonización de Colombia con el abatimiento de 2,5 a 3 Mt de CO₂ gracias al uso de hidrógeno de bajas emisiones en transporte e industria

6. Una hidrogenera es una instalación para el abastecimiento de hidrógeno a vehículos.

Periodo 2030 - 2050

El hidrógeno es competitivo en un gran número de aplicaciones, lo que desencadena un gran aumento de la demanda tanto a nivel nacional como internacional.

Durante este periodo comienza la exportación a otras geografías y se habilitan las aplicaciones de menor madurez tecnológica: camiones mineros, generación eléctrica, aviación, siderurgia, marítimo.

Gracias al desarrollo de la cadena de valor alcanzado en el Periodo 2020-2030, se podrá explotar todo el potencial futuro del hidrógeno de bajas emisiones:

- Descarbonización de sectores de difícil abatimiento
- Desarrollo de industria local, I+D+i y creación de empleo
- Aumento de la resiliencia del sistema energético

Fuente: elaboración propia

Los instrumentos principales para alcanzar las metas fijadas a 2030 son las medidas establecidas en cuatro Ejes de Actuación:

- **Habilitadores jurídicos y regulatorios:** Medidas orientadas a establecer un marco regulatorio claro, coherente y justo. Dentro de este eje se cuenta con las actuaciones para identificar y asignar competencias institucionales entre los distintos ministerios; establecer los conceptos de hidrógeno verde y azul acorde al marco jurídico nacional, consolidando las definiciones y la taxonomía que tengan en cuenta las emisiones asociadas; diseñar un sistema de garantías de origen y certificaciones para el hidrógeno; y fortalecer el posicionamiento y la cooperación internacional de Colombia en torno al hidrógeno mediante acuerdos internacionales y la participación en foros y comités.
- **Instrumentos de desarrollo de mercado:** Mecanismos y herramientas destinados a incentivar la transición desde las soluciones convencionales basadas en combustibles fósiles a tecnologías limpias de hidrógeno, fomentando tanto la producción como el consumo de hidrógeno de bajas emisiones, entre las que se encuentra el sistema nacional de cupos transables para el comercio de emisiones de CO₂, en desarrollo⁷.

⁷ La Ley 1931 de 2018 establece un Sistema de Comercio de Emisiones (ETS), denominado Programa Nacional de Cupos Transables de Emisión de Gases de Efecto Invernadero, PNCTE. El diseño del sistema se encuentra actualmente en desarrollo. Programa Nacional de Cupos Transables -

- **Apoyo al despliegue de infraestructuras:** Acciones orientadas a facilitar el despliegue efectivo y coordinado de infraestructuras de transporte y distribución de hidrógeno. Estas acciones tendrán en cuenta la interacción con la infraestructura de transporte de electricidad y gas natural, así como las estaciones de servicio existentes en Colombia.
- **Impulso al desarrollo tecnológico e industrial:** Medidas destinadas a garantizar el desarrollo de la industria de manera sostenible y con valor socio-económico para el país. Estos instrumentos se apalancarán en los recursos técnicos e industriales existentes, impulsando la investigación, el desarrollo tecnológico, la innovación nacional y la elaboración de normativa técnica de seguridad.

Es responsabilidad de los ministerios competentes velar por que las medidas definidas se apliquen y financien con base en las partidas presupuestarias y a los planes financieros existentes.

La Ley 2099 de 2021 (Presidencia de la Nación, 2021) incluyó al hidrógeno verde y azul como fuente no convencional de energía (FNCE), con lo que se les aplica el régimen de la Ley 1715 de 2014 (Congreso de Colombia, 2014) que crea beneficios tributarios y financieros para las inversiones en bienes, equipos y maquinaria que se destinen a la producción, almacenamiento, acondicionamiento, distribución, re-electrificación, investigación y uso final de las FNCE. En el Capítulo IV de esta ley se designa al Ministerio de Minas y Energía como organismo competente para regular todos los aspectos del desarrollo de proyectos de hidrógeno.

El 3 de agosto del 2022 se sancionó el Decreto 1476⁸, reglamentario de la Ley 2099 de 2021, por el cual se definen varios aspectos relativos a la caracterización de los proyectos de hidrógeno renovable, con asignación de competencias:

- **Definición de Proyecto de Hidrógeno Verde:** Un proyecto de hidrógeno verde es un conjunto de actividades desarrolladas para la producción, almacenamiento, acondicionamiento, distribución, re-electrificación, investigación o uso final de hidrógeno a partir de fuentes renovables.

⁸ Decreto 1476 de 2022 para la promoción, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno.

Podrán utilizar energía eléctrica autogenerada o tomada de la red, en cuyo caso la totalidad de la energía debe ser respaldada con fuentes renovables a través de un PPA y contar con certificados de energía renovable expedidos por un tercero bajo estándares internacionales reconocidos y verificables a través de una plataforma de registro de consulta pública.

- **Reporte de Información:** El Ministerio de Minas y Energía, o la entidad en quien éste delegue, podrá implementar un sistema de información aplicable a los agentes y actores de la cadena de valor del hidrógeno, con el fin de organizar y obtener información sistematizada. Este sistema de información del hidrógeno podrá incorporarse en alguno de los sistemas de información ya operantes en el sector de minas y energía.

También asigna a diferentes carteras del gobierno las facultades de reglamentación pertinente para los asuntos de su competencia, tales como:

- **Ministerio de Transporte:** expedir y reglamentar los requisitos, procedimientos, condiciones e incentivos para el uso del hidrógeno en el sector transporte.
- **Ministerio de Comercio, Industria y Turismo:** establecer las condiciones para la importación de autopartes de vehículos que funcionen con hidrógeno.
- **Ministerio de Minas y Energía:** definir las condiciones técnicas para la construcción de infraestructura de uso público o privado para suministro de hidrógeno de uso vehicular y reglamentar el almacenamiento de hidrógeno en subsuelo.
- **Ministerio de Ciencia y Tecnología:** establecer programas de ciencia y tecnología para promover investigación en el desarrollo de esta industria.

La reglamentación prevé el desarrollo de aplicaciones del hidrógeno como combustible, insumo industrial o almacenamiento energético.

Costa Rica

En los últimos años Costa Rica ha incorporado el hidrógeno verde en múltiples planes y políticas públicas relacionadas con la descarbonización, la energía y el transporte.

En particular el Plan Nacional de Descarbonización (Gobierno de Costa Rica, 2019), prevé diseñar y oficializar una Hoja de Ruta para la consolidación de un clúster en hidrógeno como una de las metas a ser alcanzadas en el periodo 2019–2022 para promover la descarbonización del transporte público. Entre las actividades se incluye diseñar un plan de impulso al hidrógeno, implementar el plan de acción interinstitucional para propiciar el uso del hidrógeno en el sector transporte, realizar estudios de prefactibilidad de proyectos clave identificados y diseñar un piloto con buses públicos de hidrógeno, entre otras.

También se puede destacar la Política para el aprovechamiento de los recursos excedentes en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) para el desarrollo de una economía de hidrógeno verde, aprobada por el Decreto N° 43366 (Presidente de la República y Ministra de Ambiente y Energía, 2022), que tiene como objetivo promover e incentivar una economía de hidrógeno verde mediante el establecimiento de orientaciones para desarrollar un marco regulatorio flexible que facilite a las empresas distribuidoras aprovechar los excedentes del SEN mediante su gestión comercial.

En la Figura 71 se aprecia cómo se han tomado estas medidas a lo largo de los años.

FIGURA 71:

Línea de tiempo de regulación en torno al hidrógeno verde en Costa Rica



Fuente: Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde en Costa Rica

A lo largo de 2021, el Gobierno desarrolló un proceso colaborativo con los principales actores a nivel público y privado para la elaboración de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Costa Rica 2022–2050 (Ministerio de Ambiente y Energía, 2022).

El documento analiza las fortalezas del país para la adopción del hidrógeno verde, destacando en primer lugar su matriz eléctrica, donde más del 98% de la electricidad proviene de fuentes renovables, pero también el talento humano con experiencia adquirida en grandes proyectos de energía renovable, su marca “país verde” de líder mundial en cuidado del medioambiente, el posicionamiento geográfico estratégico con acceso a rutas marinas de dos océanos, la proximidad a mercados importantes y al canal de Panamá y, finalmente, la estabilidad política y su marco regulatorio energético y climático.

Teniendo en cuenta los objetivos del país con respecto al desarrollo del hidrógeno, las fortalezas de Costa Rica y las ideas aportadas en el proceso de elaboración, la Estrategia define los siguientes componentes (Tabla 10):

TABLA 10:
Componentes de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Costa Rica 2022-2050

Visión 2050	En 2050, Costa Rica producirá hidrógeno verde de manera competitiva aprovechando sus fuentes energéticas renovables, contribuyendo a la descarbonización de los sectores transporte e industria del país, a su independencia energética y al crecimiento económico, y se posicionará como un hub regional de conocimiento y tecnología
Misión	Se establecen tres objetivos estratégicos alineados a producción, a demanda y a un aspecto transversal con componentes económicos y sociales: • Producir hidrógeno verde de manera competitiva promoviendo su cadena de valor y proyectos de energías renovables en Costa Rica, manteniendo la matriz eléctrica renovable • Contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a través de la activación de la demanda de hidrógeno en los sectores de transporte e industria • Crear un hub regional de mercados y empleos alrededor de la cadena de valor del hidrógeno verde, que aprovechen el talento humano nacional para impulsar el crecimiento económico y bienestar social

Valores y principios	Se definen una serie de valores y principios que deben acompañar a la implantación de la estrategia, identificando cuatro categorías distintas: • Valores sociales: cooperación, honestidad e inclusión social • Valores morales: transparencia, competitividad y respeto • Valores intelectuales: calidad, justicia e innovación • Valores ambientales: sostenibilidad, bien común y compromiso con el medio ambiente						
Ejes estratégicos	Se identifican tres ejes estratégicos, alineados con la misión y visión del hidrógeno en Costa Rica, que constituyen los pilares de la estrategia: • Eje 1: Descarbonización del sector transporte e industria: su objetivo es la integración del hidrógeno verde y sus derivados en los sectores transporte e industria, para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel nacional. • Eje 2: Desarrollo de un hub tecnológico y de innovación en hidrógeno verde: acciones encaminadas a convertir al país en un hub tecnológico mediante la atracción de socios comerciales y tecnológicos para el desarrollo de emprendimientos, negocios, innovación y empleos asociados al hidrógeno, que permita el aprovechamiento y desarrollo de ventajas competitivas a nivel nacional y en la región. • Eje 3: Exportación de hidrógeno: iniciativas para desarrollar capacidades, infraestructura, alianzas y procesos de aseguramiento de la calidad, que permitan a Costa Rica incursionar en el mercado internacional del hidrógeno verde, con el propósito de viabilizar la producción nacional que contribuya a la descarbonización y al desarrollo económico.						
Líneas de acción	Para cada Eje Estratégico, se definen las siguientes líneas de acción principales: <table><tr><th>Descarbonización del sector transporte e industria</th><th>Desarrollo de un <i>hub</i> tecnológico y de innovación en hidrógeno verde</th><th>Exportación de hidrógeno</th></tr><tr><td> 1.1 Financiamiento de inversión extranjera 1.2 Demanda nacional 1.3 Producción y almacenamiento 1.4. Transporte y distribución </td><td> 2.1. Coordinación y alianzas estratégicas 2.2. Capacitación y formación 2.3. Desarrollo tecnológico y proyectos piloto 2.4. Apoyo a la innovación </td><td> 3.1. Identificación de la capacidad de infraestructura portuaria 3.2. Potencial y demanda de exportación 3.3 Acuerdos internacionales 3.4 Esquemas de certificación </td></tr></table> Dentro de cada línea de acción se incluyen varias acciones concretas, a ser desarrolladas a lo largo de las tres Fases de implementación previstas.	Descarbonización del sector transporte e industria	Desarrollo de un <i>hub</i> tecnológico y de innovación en hidrógeno verde	Exportación de hidrógeno	1.1 Financiamiento de inversión extranjera 1.2 Demanda nacional 1.3 Producción y almacenamiento 1.4. Transporte y distribución	2.1. Coordinación y alianzas estratégicas 2.2. Capacitación y formación 2.3. Desarrollo tecnológico y proyectos piloto 2.4. Apoyo a la innovación	3.1. Identificación de la capacidad de infraestructura portuaria 3.2. Potencial y demanda de exportación 3.3 Acuerdos internacionales 3.4 Esquemas de certificación
Descarbonización del sector transporte e industria	Desarrollo de un <i>hub</i> tecnológico y de innovación en hidrógeno verde	Exportación de hidrógeno					
1.1 Financiamiento de inversión extranjera 1.2 Demanda nacional 1.3 Producción y almacenamiento 1.4. Transporte y distribución	2.1. Coordinación y alianzas estratégicas 2.2. Capacitación y formación 2.3. Desarrollo tecnológico y proyectos piloto 2.4. Apoyo a la innovación	3.1. Identificación de la capacidad de infraestructura portuaria 3.2. Potencial y demanda de exportación 3.3 Acuerdos internacionales 3.4 Esquemas de certificación					

Fases de implementación	- Fase 1. Establecer las bases para el desarrollo del mercado (corto plazo, dos años aproximadamente): activar la industria doméstica y generar las bases sólidas para crear un mercado competitivo de hidrógeno en Costa Rica. Se incluyen acciones tales como definición de leyes, reglamentos, normativas, elaboración de estudios técnicos específicos, evaluación de la infraestructura y proyecciones de mercado, así como planes de capacitación, con el objetivo de establecer unos cimientos sólidos para el correcto desarrollo del mercado. - Fase 2. Habilitar y escalar el desarrollo del mercado (corto / medio plazo, entre 2 y 10 años): una vez creado el ecosistema, esta fase comprende las tareas orientadas a promover el uso del hidrógeno y crear las condiciones necesarias para esto. Las primeras medidas se enfocan en incentivar y potencializar a los primeros participantes, favoreciendo el camino para la entrada al mercado y mitigando el riesgo. Se buscará conseguir el escalado del hidrógeno a lo largo de toda la cadena de valor. - Fase 3. Monitorear y habilitar nuevos nichos (medio / largo plazo): acciones de monitoreo con objeto de dar seguimiento y garantizar la correcta implementación de las medidas de los periodos anteriores, así como hacer posible la entrada del hidrógeno en aquellas aplicaciones de menor madurez. Se tratará de acciones que se realizarán cíclicamente.
Condiciones habilitantes	Adicionalmente a los Ejes estratégicos, se identifican tres líneas de acción prioritarias que deberán ejecutarse para habilitar la creación del mercado del hidrógeno, denominadas “condiciones habilitantes”, que constituyen las acciones intermedias que permitirán alcanzar los resultados de la Estrategia: A. Normativa y regulación B. Incentivos C. Tramitología

Fuente: elaboración propia

La línea de acción A, “Normativa y regulación de las condiciones habilitantes”, está dirigida al avance, desarrollo y actualización de la normativa técnica del hidrógeno en toda su cadena de valor. Las acciones, previstas a lo largo de las tres Fases, estarán apoyadas en el trabajo que viene desarrollando el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO), por medio del cual en 2020 se creó el Comité Técnico Nacional de Hidrógeno, para la adecuación de las normas y estándares internacionales técnicos utilizados en el diseño de plantas de generación, almacenamiento, transporte, y la distribución de hidrógeno verde.

En cuanto a la línea de acción C, “Tramitología”, las acciones previstas incluyen:

- Mejorar los procedimientos actuales para el otorgamiento del licenciamiento ambiental, identificando oportunidades de mejora en los procesos que faciliten el trámite de las solicitudes para proyectos de hidrógeno.

- Realizar un plan regulatorio, identificando las instituciones responsables de otorgar los permisos, autorizaciones y concesiones para toda la cadena de valor del hidrógeno, e identificar oportunidades de mejora en los procesos existentes, con el fin de reducir el tiempo de respuesta en el otorgamiento de los permisos y autorizaciones a los proyectos.
- Lograr un mecanismo flexible y habilitante para la renovación de las concesiones de energías renovables, la venta al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) o la venta a terceros, según corresponda.
- Implementar mejoras en los procesos de otorgamiento de permisos y autorizaciones, incluyendo la creación de una plataforma digital única para gestión de trámites.

La Estrategia establece las siguientes metas de producción, demanda y transversales para la adopción de hidrógeno en Costa Rica en 2030 (Tabla 11):

TABLA 11:
Metas a 2030 de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Costa Rica 2022-2050

Producción	150 – 500 MW de capacidad de electrólisis instalada o en desarrollo
Demanda	Transporte 100–250 vehículos ligeros de pila de combustible⁹ (flotas) 200–600 vehículos pesados de pila de combustible 15–20 hidrogeneras de acceso público Industria 8–10% de hidrógeno verde sustituyendo al LPG o al bunker (en contenido energético, en las industrias de producción de madera, papel, químicos y otras industrias)

⁹. Una pila de combustible es un dispositivo que convierte directamente la energía química de un combustible, como el hidrógeno, en electricidad y calor mediante una reacción electroquímica, sin necesidad de combustión. A diferencia de una batería, una pila de combustible no necesita ser recargada, sino que genera energía mientras se le suministran continuamente el combustible y un oxidante (como el aire). Los únicos subproductos de la reacción con hidrógeno son agua y calor, lo que la convierte en una tecnología limpia y eficiente para diversas aplicaciones, desde vehículos hasta sistemas de energía estacionaria.

Transversales	- USD 830–1.100 millones de inversiones en proyectos de producción y demanda de hidrógeno en el período 2022–2030 72.000–225.000 toneladas de emisiones de CO₂eq abatidas anualmente en 2030, al cumplir las metas de demanda 12.000–18.000 empleos directos e indirectos generados por la adopción del hidrógeno, incluyendo el desarrollo de proyectos renovables
---------------	--

Fuente: elaboración propia

Ecuador

En julio de 2023, Ecuador publicó la Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde en Ecuador (Ministerio de Energía y Minas, 2023), que presenta la producción y el uso de H₂V como uno de los puntos de partida determinantes para impulsar una transición energética justa y alcanzar la neutralidad en carbono en 2050.

La Hoja de Ruta identifica la cadena de valor completa para el hidrógeno verde y sus derivados como una gran oportunidad para una industrialización verde de Ecuador y la reducción de su dependencia actual de combustibles fósiles, que fomenta el desarrollo económico y social en armonía con el medio ambiente. Este desarrollo sostenible le permitirá, adicionalmente, acceder a nuevos mercados internacionales con la exportación de productos con un alto valor agregado. Se destaca, como factor diferenciador con respecto a algunos países de la región, que Ecuador tiene acceso a biomasa residual, la que será fundamental como fuente sostenible de CO₂ para la producción de derivados del hidrógeno verde como el metanol y los combustibles sintéticos.

La Hoja de Ruta se estructura en tres Fases (Inicial, Despliegue y Afianzamiento), cada una de las cuales cuenta con metas (Figura 72).

FIGURA 72:
Fases y metas de la Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde en Ecuador

		Fase 1 2023-2025	Fase 2 2025-2030	Fase 3 Mas allá del 2030
Metas	Capacidades	- Energías renovables: 0,2 MW - Electrólisis: 0,1 MW	- Energías renovables: 2 GW - Electrólisis: 1 GW	- Energías renovables: 6 GW - Electrólisis: 3 GW
	Inversiones	- Energías renovables: 170.000 - 440.000 USD - Electrólisis: 400.000 USD	- Energías renovables: 1.714 - 4.400 M USD - Electrólisis: 1.271 M USD	- Energías renovables: 2.605 - 24.000 M USD - Electrólisis: 2.102 M USD
	Ingresos por exportaciones	N/A	51 M USD por año al 2030	1.242 M USD por año al 2040
	Reducción de emisiones	N/A	15,7% al 2030	36% al 2040

Fuente: Ministerio de Energía y Minas

Para alcanzar esas metas, en cada una de las Fases la Hoja de Ruta identifica una serie de acciones priorizadas.

En el ámbito de Normativa y Regulación en particular se definen las siguientes 13 acciones priorizadas (Tabla 12).

TABLA 12:

Acciones priorizadas en Normativa y Regulación, Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde en Ecuador

Fase 1 (Inicial 2023–2025)	Fase 2 (Despliegue 2025–2030)	Fase 3 (Afianzamiento más allá de 2030)
- Desarrollar el marco normativo - Establecer definiciones de energías renovables no convencionales - Establecer responsabilidades - Establecer políticas para el despliegue de las energías renovables no convencionales - Establecer condiciones de producción de hidrógeno para que sea considerado verde - Desarrollar mecanismos de financiación - Establecer reglas de uso de electricidad	- Establecer un esquema de garantías de origen para electricidad, hidrógeno verde y sus derivados - Establecer normativa para el desarrollo de infraestructura - Establecer normativa para usos del hidrógeno en el sector transporte	- Fortalecer el sistema de mercados de carbono - Evaluar el retiro progresivo de subsidios a los combustibles fósiles - Establecer un marco normativo para los derivados del hidrógeno

Fuente: elaboración propia

Para el cierre de brechas en el ámbito de políticas públicas y marco normativo se recomiendan las siguientes acciones:

- Emitir señales normativas a favor del despliegue del hidrógeno verde, como definir las reglas de uso de electricidad para la producción de hidrógeno, así como las estructuras de remuneración para su comercialización.
- Especificar las condiciones de producción de hidrógeno para que sea considerada verde, definiendo aspectos como la adicionalidad de la energía renovable, las condiciones para tomar energía de la red y otros aspectos de sostenibilidad que están siendo discutidos a nivel internacional.
- Definir un esquema de garantías de origen que permita registrar la trazabilidad del hidrógeno verde, de manera que facilite su reconocimiento a nivel internacional.

- Crear una normativa para proyectos piloto con enfoque flexible que permita su desarrollo de manera paralela con la regulación (sandbox regulatorio).
- Crear normativa y regulación para proyectos a escala comercial, definiendo, por ejemplo, los permisos y las licencias asociadas a las instalaciones de producción y el desarrollo de infraestructura de transporte, hidrogeneras y usos en el sector del transporte.
- Implementar mecanismos de acceso a financiación de proyectos, tales como regulaciones para el sector bancario, líneas de crédito específicas para hidrógeno o el fortalecimiento de los mercados de carbono para acelerar la competitividad de las energías renovables en general.

La Hoja de Ruta incluye un análisis de las oportunidades y beneficios a nivel ambiental, económico y social que representa el hidrógeno renovable para Ecuador, como también una evaluación de los riesgos a los que se enfrenta.

Oportunidades

- Cumplimiento de los compromisos de descarbonización.** Ecuador ha fijado la meta de reducir sus emisiones de GEI en los sectores energía, procesos industriales, residuos y agricultura en un 9% de manera incondicional o en un 20,9% condicionado al apoyo de cooperación internacional para 2025. Adicionalmente asumió un compromiso incondicional de disminución de 4% de GEI en el sector de cambio y uso de suelo, o de 20% sujeto al apoyo de la cooperación internacional. Ecuador considera que el despliegue de una economía del hidrógeno verde a nivel nacional contribuirá al cumplimiento de sus objetivos a través de la implementación masiva de las energías renovables, en línea con el plan de descarbonización del país.
- Despliegue de las energías renovables.** Las políticas deben asegurar que la producción de hidrógeno verde se vea acompañada de un incremento en la capacidad instalada de energías renovables. De lo contrario se estaría usando energía ya comprometida para la producción de hidrógeno, lo que podría impedir la descarbonización efectiva de la matriz energética.
- Impulso a la industrialización y el desarrollo tecnológico.** El establecimiento de la cadena de valor del hidrógeno y sus derivados a

escala comercial implicará una transición del enfoque histórico como productor centrado en el sector primario (hidrocarburos) hacia otro dirigido a la producción, uso interno y exportación de insumos con alto valor agregado.

4. Generación de capacidades técnicas, tecnológicas y de I+D+i.

El establecimiento y la operación de infraestructura de producción, almacenamiento, transporte, distribución y uso de hidrógeno renovable y sus derivados requerirán el desarrollo de habilidades técnicas y profesionales especializadas en diferentes áreas de la ingeniería, la gestión de proyectos, entre otras. Además, la inversión en I+D+i permitirá la creación de centros de investigación y laboratorios especializados, donde científicos y expertos ecuatorianos podrán desarrollar tecnologías, componentes y soluciones innovadoras en esta área.

5. Beneficios sociales y ambientales. El despliegue de la economía del hidrógeno fomentará la creación de empleo en los distintos sectores relacionados con la cadena de valor, que a su vez creará condiciones que aseguren el acceso generalizado de las comunidades a los servicios básicos y construirá la base, con la integración con las demás políticas gubernamentales, para la disminución de la desigualdad y el mejoramiento de la calidad de vida de la población. Complementando estos beneficios sociales, la producción sostenible de hidrógeno verde y sus derivados trae consigo beneficios ambientales al reducir las emisiones de GEI y permitir el acceso de la población a energéticos limpios en lugar de los combustibles convencionales.

6. Fortalecimiento institucional. El desarrollo de proyectos de hidrógeno requiere que se fortalezcan capacidades del sector público y privado. La implementación de un modelo de gobernanza para definir un marco regulatorio, normativo y de fomento permite a las instituciones responsables expandir y adaptar sus competencias y capacidades.

7. Oportunidades en el mercado regional. El establecimiento de alianzas de cooperación con países de la región debe considerarse como un paso prioritario para generar conocimiento apalancado de las experiencias adquiridas en estas fases iniciales de desarrollo de la economía del hidrógeno. La creación de alianzas regionales

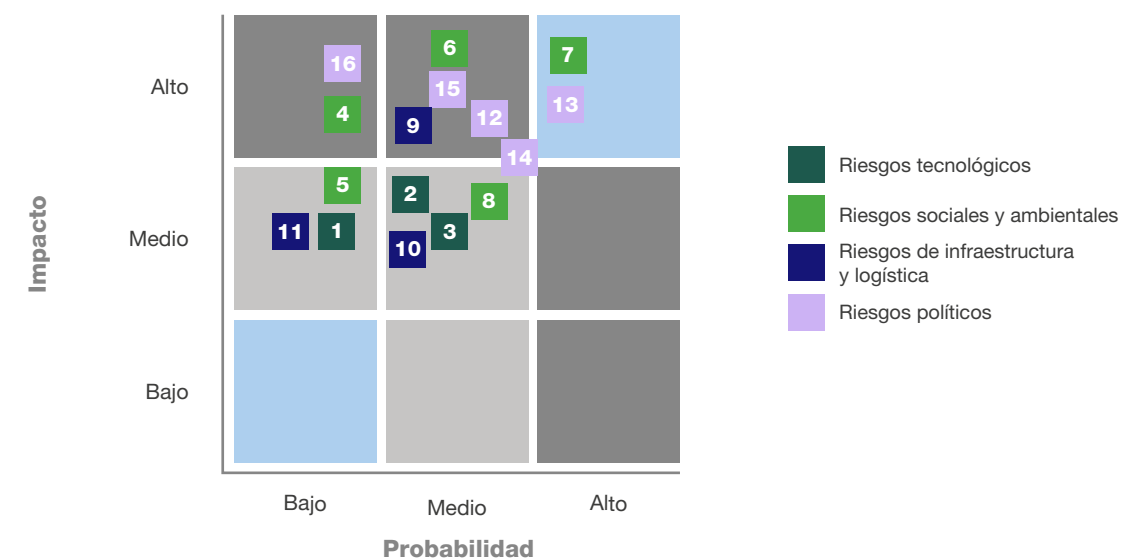
debe ir acompañada de una campaña de diplomacia internacional enfocada en la creación de alianzas estratégicas con potenciales países importadores y en la rápida implementación de proyectos de producción a escala comercial que le permitan al país posicionarse como uno de los pioneros en el suministro de energéticos e insumos renovables a los mercados que los requieren.

• Riesgos

La Hoja de Ruta clasifica los riesgos asociados al despliegue del hidrógeno verde en Ecuador en cuatro categorías y los evalúa teniendo en cuenta la probabilidad de ocurrencia y el impacto (Figura 73).

FIGURA 73:

Riesgos asociados al despliegue del Hidrógeno Verde en Ecuador



Fuente: Ministerio de Energía y Minas

De esta evaluación resulta que los riesgos más importantes (por su impacto y probabilidad de ocurrencia) son aquellos relacionados con la seguridad en el manejo del hidrógeno y sus derivados, que puede mitigarse con acciones de capacitación e implementación de normativa de seguridad. También resultan altamente relevantes los riesgos relacionados con aspectos políticos,

específicamente con inestabilidad en política fiscal, financiera y de comercio exterior. Este riesgo supone impactos en la confianza inversionista en Ecuador y tendría un gran impacto en el despliegue de una economía del hidrógeno. Para contrarrestar este riesgo se deben implementar instrumentos financieros y definir las metas del país en torno a la cadena de valor del hidrógeno, como políticas de estado.

● El Salvador

El país todavía no cuenta con políticas públicas ni regulación aplicable al hidrógeno verde, ni se conocen proyectos normativos en curso en ese ámbito. Desde la Dirección General de Energía, Hidrocarburos y Minas (DGEHM) se han hecho declaraciones públicas (Diario El Salvador, 2023) sobre la intención de que El Salvador sea el primer país de América Central en incursionar en el nuevo vector energético, destacando el gran potencial de energía geotérmica, que representa el 25% de la matriz, para producir hidrógeno renovable a costo competitivo. Sin embargo, al presente no se han hecho públicas iniciativas regulatorias específicas ni desarrollo de insumos técnicos para avanzar en la materia.

Sin embargo, existen referencias a la incorporación del hidrógeno en la matriz energética de El Salvador en otros instrumentos de política pública. El Consejo Nacional de Energía, como autoridad rectora y normativa en materia de política energética, ha formulado la Política Energética Nacional 2020-2050 (Consejo Nacional de Energía, 2020), la cual plasma la visión de largo plazo y los ejes estratégicos que El Salvador adoptará para el desarrollo y uso responsable de los recursos energéticos. Con base a esto se definen líneas de acción a seguir para la ejecución de planes, programas y proyectos que aporten al cumplimiento de los objetivos estratégicos planteados.

El Eje Estratégico 5 Seguridad e Integración Energética (E.5) busca minimizar la vulnerabilidad energética del país robusteciendo la cadena de suministro de energía y gestionando los riesgos de desabastecimiento energético asociados a la alta dependencia de los productos de petróleo y al impacto del cambio climático.

La línea de acción 4 (L.4) está dirigida a reducir la dependencia del petróleo y tiene como objetivo fomentar el uso de combustibles alternativos y poco contaminantes como sustitutos de los derivados de petróleo tradicionales,

incluyendo el hidrógeno de manera expresa en la actividad A.2 (Figura 74). La ejecución de esta actividad L.4 A.2 está programada para el periodo 2024 a 2035.

FIGURA 74:
Actividad E5. L.4. A.2 de la Política Energética Nacional de El Salvador 2020-2050

No.	Actividad	Resultado esperado
A.2	Evaluar la relación costo/beneficio para la incorporación de combustibles alternativos -bio combustibles, hidrógeno o biogás- en la matriz energética nacional como sustitutos de productos derivados de petróleo.	Incremento en el uso de combustibles alternativos

Fuente: Política Energética Nacional de El Salvador 2020-2050.

La línea de acción 5 (L.5) orientada a la integración energética regional tiene como objetivo apoyar los esfuerzos para la consolidación del Mercado Eléctrico Regional y explorar oportunidades de integración energética regional con gas natural u otros recursos energéticos. Una de las actividades principales de esta línea de acción también incluye al hidrógeno (Figura 75). El horizonte de ejecución de esta actividad L.5 A.2 se extiende a lo largo de todo el periodo entre 2024 y 2050.

FIGURA 75:
Actividad E5. L.5. A.2 de la Política Energética Nacional de El Salvador 2020-2050

No.	Actividad	Resultado esperado
A.2	Explorar alternativas de integración energética regional con proyectos de generación, proyectos de reducción de gases efecto invernadero, uso regional de Gas Natural o proyectos regionales de generación con tecnología de hidrógeno o nuclear.	Apoyo a iniciativas regionales.

Fuente: Política Energética Nacional de El Salvador 2020-2050

Según esta Política Energética Nacional, las actividades enumeradas no son exhaustivas, sino que se pueden actualizar a medida que las revisiones quinquenales de la política energética permitan incorporar nuevas actividades de impacto. Esas revisiones quinquenales pueden dar la oportunidad de reforzar y expandir el rol del hidrógeno dentro de la matriz energética de El Salvador, incluyéndolo en las diferentes líneas de actuación. Sin embargo, un verdadero impulso al sector requerirá la elaboración de políticas públicas específicas, como lo son una estrategia nacional, con su hoja de ruta de implementación y un plan de acción concreto.

● Jamaica

Aunque en los últimos años Jamaica se ha embarcado en múltiples proyectos de energía renovable para complementar su combinación energética actual, basada en combustibles fósiles, el país aún no ha avanzado en la regulación y planificación del hidrógeno para su integración en el sistema ni se han anticipado acciones gubernamentales en ese sentido.

Jamaica cuenta con una Política Nacional de Energías Renovables 2009-2030 (Ministerio de Energía y Minas, 2009), que data de 2009 y no contempla al hidrógeno en ninguna de sus disposiciones.

El Plan Integrado de Recursos de Jamaica de 2022 (Ministerio de Ciencia, Energía, Telecomunicaciones y Transporte, 2023), presenta la actualización del Plan Integrado de Recursos del Sector Eléctrico de Jamaica 2018, que se publicó en enero de 2020 y se editó en septiembre de 2020.

Teniendo en cuenta los cambios que impactaron al sector de la electricidad desde la versión anterior, esta actualización prevé el desarrollo de capacidades de recursos del Ministerio de Ciencia, Energía, Telecomunicaciones y Transporte para mantenerse al tanto de los desarrollos de las tecnologías de energía renovable y los avances en las tecnologías de almacenamiento de energía, en términos de alternativas, rendimiento, disponibilidad y costos. Se menciona que estas tecnologías deben incluir al hidrógeno y las pilas de combustible de hidrógeno, así como otras tecnologías emergentes para la generación y el almacenamiento de energía.

● México

México no cuenta aún con una estrategia nacional para el desarrollo de una economía del hidrógeno verde. El hito más importante en la senda hacia la implementación de una política pública para el sector son los Lineamientos en Materia de Hidrógeno (Secretaría de Energía, 2024) publicados por la Secretaría de Energía (SENER) el 19 de marzo de 2024 con 11 propuestas de prioridades para la elaboración de la hoja de ruta.

Los 11 lineamientos del documento son los siguientes:

1. Establecer las prioridades del Estado mexicano en torno a la adopción y despliegue del hidrógeno, sus derivados y procesos, como actor energético en los sectores productivos, que a su vez incluya una visión nacional de largo plazo, para que posteriormente se desarrolle una hoja de ruta y se genere la estrategia nacional de hidrógeno de bajas emisiones.
2. Propiciar la implementación de una cultura de generación, uso y consumo de hidrógeno (y sus derivados) en la matriz nacional energética, industrial, almacenamiento y de movilidad, a fin de contribuir al desarrollo sustentable, el desarrollo económico, la generación de tecnología, la soberanía energética y el beneficio social.
3. Promover todos los tipos de producción de hidrógeno, favoreciendo la transición hacia aquellos que representen menos huella de carbono y hagan uso de diferentes energías renovables, para contribuir a la descarbonización del sector energético, industrial y una reducción sustantiva de emisiones contaminantes en la movilidad.
4. Coordinar las condiciones para el desarrollo de una industria nacional del hidrógeno coherente con su entorno social y ambiental, incorporando las mejores prácticas, teniendo el Estado un rol principal para coordinar e impulsar la industria, así como identificar y resolver barreras y reducir incertidumbres.
5. Propiciar la cooperación desde el nivel básico de educación hasta las universidades, centros públicos de investigación, la industria y el gobierno, para la formación de recursos humanos y la transferencia de conocimientos e innovación en la producción de tecnología nacional que resulte en la generación de productos y patentes en la cadena de valor del hidrógeno, tomando en cuenta todos los sectores productivos.

6. Construir el marco regulatorio y normativo para la producción, comercialización y exportación del hidrógeno (y sus derivados), que tome en cuenta las opciones del sector gobierno, industrial, académico y social, así como establecer mecanismos para ser líder en la producción de hidrógeno con certificación de origen del hidrógeno reconocida internacionalmente.
7. La SENER, a través de la Subsecretaría de Planeación y Transición Energética, coordinará las estrategias para favorecer el desarrollo acelerado del hidrógeno y sus derivados.
8. Sentar las bases financieras–económicas–tecnológicas necesarias para lograr que en México se produzca hidrógeno bajo en emisiones a un precio competitivo a nivel internacional.
9. Generar condiciones de autosostenibilidad en relación con el consumo y uso de hidrógeno y favorecer que los proyectos productivos de hidrógeno en México cumplan con un porcentaje (a convenir) en tecnología, mano de obra, consumibles y recursos de producción nacional.
10. Identificar la infraestructura existente y a desarrollar para la integración del hidrógeno y sus derivados en la matriz energética nacional, industrial y de movilidad.
11. Generar alianzas con instituciones financieras de desarrollo que otorguen financiamiento para proyectos de hidrógeno bajo en emisiones.

En paralelo a estas acciones gubernamentales preparatorias, existen diversos estudios y proyectos desarrollados desde los sectores público y privado como contribuciones para el desarrollo de una economía del hidrógeno verde en México e insumos para una futura estrategia y hoja de ruta nacionales.

El documento *El Potencial Industrial de México en las Cadenas de Valor del Hidrógeno Verde* (PNUD, 2023) es el resultado de un proyecto del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en México implementado en alianza estratégica con la Embajada de Dinamarca. Su objetivo central es contar con un diagnóstico sobre el potencial del sector industrial en México para sumarse a las cadenas de valor que existen en torno a las tecnologías para la producción, almacenamiento y conversión del hidrógeno verde. Se incluyen recomendaciones de política pública para desarrollar un entorno habilitador para

las industrias nacientes, en temas de política industrial, incentivos y estímulos comerciales y apoyos financieros.

El estudio de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH *Guía para la adopción de garantías de origen para el hidrógeno verde en México* (GIZ, 2022) se realizó bajo el marco del Programa Internacional de Fomento del Hidrógeno (H2-Uppp) que se implementa por encargo del Ministerio Federal de Economía y Protección del Clima (BMWK) de Alemania. El objetivo del estudio es generar una propuesta de recomendaciones para la adopción de garantías de origen en México con base en los análisis realizados de experiencias internacionales y nacionales, puntos de vista de organismos internacionales y perspectivas de actores clave en la industria del hidrógeno en México.

Panamá

Los Lineamientos Estratégicos de la Agenda de Transición Energética (Consejo de Gabinete, 2020) de Panamá establecen varias estrategias nacionales relativas a energía, entre ellas la estrategia de Panamá como Hub Energético. En sus líneas de acción se incluye la evaluación de nuevas capacidades y oportunidades del país para consolidarse como un distribuidor y suministrador de hidrocarburos a nivel regional, lo que representa una importante oportunidad para la incorporación del hidrógeno verde como parte de ese Hub Energético Regional. La posición geográfica de Panamá brinda esa oportunidad de posicionar al país como *hub* regional y ruta global del hidrógeno verde, facilitando el fomento de la inversión en infraestructura de almacenamiento, producción de H₂V y sus derivados, junto a una oferta de servicios logísticos bajos en emisiones.

En enero de 2022 la Secretaría Nacional de Energía inició los avances en ese sentido al adoptar las bases de la Fase 1 de una Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde (Secretaría Nacional de Energía, 2022) y crear los Comités al Servicio del Hidrógeno Verde de Panamá.

En julio de 2023, el Gobierno aprobó la Estrategia Nacional del Hidrógeno Verde y Derivados de Panamá (ENHIVE) (Gobierno Nacional de Panamá, 2023), que se entiende como el escalamiento de la Hoja de Ruta publicada en enero de 2022, presentando líneas de acción y actividades generales, priorizadas en

relevancia y tiempo. También se crea el Comité Interinstitucional de Hidrógeno Verde y Derivados de Panamá, a efectos de que realice los trabajos necesarios para su adopción e implementación, con el apoyo de las instituciones públicas, universidades, empresas y asociaciones del sector privado.

La visión, objetivos, plazos y ejes estratégicos como elementos clave de la ENHIVE quedan reflejados en la Tabla 13.

TABLA 13:
Elementos clave de la ENHIVE de Panamá

Visión	Posicionar a Panamá como la Ruta Global de hidrógeno verde y sus derivados, potenciando su ubicación geográfica e infraestructura para abastecer con energéticos renovables al sector logístico, doméstico, marítimo, aéreo y transporte terrestre, desarrollando a la vez capacidades que permitan establecer un mercado innovador de este vector energético en el país.
Objetivos	- Facilitar el uso de derivados del hidrógeno verde en el transporte marítimo y aéreo convirtiéndose en un hub de Energía Sostenible a corto-mediano-largo plazo. - Crear un marco legal y regulatorio favorable para actividades relacionadas con hidrógeno verde y derivados al 2025 que fomente la inversión en la cadena de valor del hidrógeno verde y derivados e infraestructura habilitante. - Fomentar la integración regional en ALC de hidrógeno verde y derivados al 2025. - Generar conocimiento y experticia local y regional mediante la creación de un Centro de I+D+i con foco en energías e hidrógeno renovable y sus derivados al 2025. - Fomentar el mercado doméstico de hidrógeno verde promoviendo la demanda doméstica como energético al 2033.
Plazos	- Corto plazo: 2023–2030 (1-7 años) - Mediano plazo: 2030–2033 (5-10 años) - Largo plazo: más allá de 2033 (más de 10 años) Premisas de temporalidad 2022 (Q3/Q4) 2030 2033 2023 (Q1) corto plazo 1-7 años 7 años mediano plazo 1-10 años 10 años largo plazo 1-10 años

Ejes estratégicos

Se identifican tres Ejes Estratégicos Traccionantes y cuatro Ejes Estratégicos Habilitantes del mercado.

Ejes Estratégicos Traccionantes

Eje estratégico 1	Eje estratégico 2	Eje estratégico 3
Convertir a Panamá en el <i>hub</i> transformacional de H ₂ V	Promover un mercado regional integrado de H ₂ V y derivados	Fomentar el mercado doméstico de H ₂ V y derivados

Ejes Estratégicos Habilitados

Eje estratégico 4	Eje estratégico 5	Eje estratégico 6	Eje estratégico 7
Desarrollar el capital humano y la aceptación social que habilite la economía del H ₂ V y derivados	Desarrollar la legislación, regulación y financiamiento para el fomento de H ₂ V y derivados	Fomentar la creación de la infraestructura de la cadena de H ₂ V y sus derivados	Fomentar la gobernanza y el diálogo triangular para el desarrollo del H ₂ V y derivados

Fuente: elaboración propia

Cada uno de los Ejes Estratégicos Traccionantes y Habilitantes está compuesto por iniciativas concretas, expresadas en 30 Líneas de Acción, con actividades, subactividades, indicación del orden de prioridad (media o alta), designación de las autoridades responsables e hitos de cumplimiento.

En particular el Eje Estratégico Habilitante 5, referido a legislación, regulación y financiamiento, cuenta con las siguientes tres Líneas de Acción relacionadas con el hidrógeno verde:

- Línea de Acción 24:** Desarrollar y actualizar el marco legal, reglamentos y propuesta innovadoras para el fomento de la cadena de valor del hidrógeno verde y sus derivados.
- Línea de Acción 25:** Evaluar las opciones de instrumentos más rentables para desarrollar proyectos de hidrógeno verde en Panamá mediante la participación en mecanismos internacionales de crédito.
- Línea de Acción 26:** Analizar el establecimiento de un esquema de financiamiento de investigación en temas relacionados a la transición

energética, con énfasis en la cadena de suministro de hidrógeno verde y derivados para entidades académicas locales mediante concurso, cuyos fondos surjan del sector de combustibles fósiles.

La ENHIVE fija metas que buscan facilitar la implementación de un mercado de hidrógeno verde y derivados que acelere la descarbonización local, así como la reactivación económica de forma sostenible, justa e inclusiva en el territorio nacional. Además, busca convertir a Panamá en un habilitador de creación de oferta y demanda para la descarbonización del comercio de bienes y servicios en el sector marítimo, aviación y transporte terrestre (Tabla 14).

TABLA 14:
Metas de la ENHIVE de Panamá

2030	- Lograr que el 5% de la oferta de bunkering en Panamá provenga de hidrógeno verde y/o sus derivados - Producir 500.000 toneladas de hidrógeno verde y/o sus derivados localmente
2040	- Lograr que el 30% de la oferta de bunkering en Panamá provenga de hidrógeno verde y/o sus derivados - Producir 2.000.000 toneladas de hidrógeno verde y/o sus derivados localmente - Lograr que el 20% de los vehículos de transporte de carga pesada y maquinaria usen hidrógeno verde y/o sus derivados
2050	- Lograr que el 40% de la oferta de bunkering en Panamá provenga de hidrógeno verde y/o sus derivados. - Lograr que la oferta de energéticos para la aviación provenga en un 30% hidrógeno verde, sus derivados y/o SAF - Lograr que el 30% de los vehículos de transporte de carga pesada y maquinaria usen hidrógeno verde y/o sus derivados

Fuente: elaboración propia

La ENHIVE incluye una Propuesta Especial, que consiste en la creación de una Organización Internacional para el Comercio de Hidrógeno (HITO), mediante un tratado internacional para coordinar el desarrollo del mercado global de hidrógeno verde y sus derivados en temas de precios, certificaciones y estándares globales.

Se trata de un nuevo esquema de colaboración, donde, en coordinación con todos los países y regiones del Mundo, surja la Organización Internacional de Comercio de Hidrógeno (HITO), con el objetivo de coordinar y unificar las políticas de los países hidrogeneros (que han emprendido el aprovechamiento del hidrógeno verde), con el fin de garantizar unos precios justos y estables, junto a estándares y certificaciones, que garanticen un suministro eficiente, económico y regular de hidrógeno y sus derivados a los consumidores, y un rendimiento justo para los inversionistas en la industria del hidrógeno verde y sus derivados, de forma justa e inclusiva.

La intención es facilitar el establecimiento de estrategias comunes y cohesionadas de producción del hidrógeno verde y sus derivados, que permita acortar las curvas de aprendizaje en la implementación de iniciativas asociadas a este sector, analizando y expandiendo el conocimiento para los países miembros.

● Paraguay

En la Política Energética Nacional 2040 (PEN 2040) (Ministerio de obras públicas y comunicaciones, 2016), Paraguay se comprometió a fomentar la sustitución de combustibles fósiles importados por bioenergía, electricidad y otras fuentes energéticas de origen nacional. Las acciones del Gobierno con respecto al hidrógeno se inscriben en ese contexto, en el que ha sido un hito relevante la propuesta del estudio *Hacia la Ruta del Hidrógeno Verde en Paraguay* (Viceministerio de Minas y Energía, 2021), que presenta al hidrógeno verde como un vector que puede contribuir al desarrollo energético del país, principalmente para el sector de transporte, aprovechando los grandes excedentes de hidroelectricidad.

El estudio fue realizado por el Vice Ministerio de Energía y Minas, con la colaboración de otros ministerios y organismos públicos de distintos sectores. Se compone de dos documentos. En su marco conceptual se dan los lineamientos para promover el desarrollo del hidrógeno verde para el crecimiento socioeconómico sostenible en Paraguay.

Según las conclusiones, el sector transporte es el principal nicho para la introducción del hidrógeno en la matriz energética nacional, que permitiría

cumplir el objetivo de reducir el consumo de combustibles fósiles fijado en la Política Energética Nacional 2040 (PEN 2040) mencionada. El transporte fluvial resulta un caso favorable para el reemplazo de los derivados del petróleo por las tecnologías de hidrógeno y sus derivados, en especial la hidrovía Paraguay-Paraná, donde circulan unas 2.500 barcas, 300 remolcadores de empuje y 50 buques autopropulsados, de los cuales el Paraguay dispone 75% de la flota.

Se realizó un análisis FODA con el objetivo de evaluar y comparar los beneficios y barreras en el uso del hidrógeno para el transporte de cargas y de pasajeros de larga distancia. En los resultados se destacan como primera fortaleza la abundancia de recursos naturales renovables para generar energía eléctrica, en particular, la generación hidroeléctrica. Entre las debilidades, se subraya la falta de normativas y regulaciones específicas del hidrógeno como vector energético.

El segundo documento del estudio es la *Propuesta de innovación* (Viceministerio de Minas y Energía, 2021). El trabajo presenta el marco conceptual para la implementación de un proyecto demostrativo estructurado en dos líneas de acción:

- **Línea de Acción 1:** Generar lineamientos estratégicos y marcos de política, de promoción y de regulación, así como capacidades institucionales y técnicas para el desarrollo de la economía del hidrógeno verde, como un instrumento de transición energética y de mitigación del cambio climático en sectores pendientes de la economía en el país.
- **Línea de Acción 2:** Instalar plantas piloto de producción de hidrógeno verde a partir de la electrólisis de agua, para su utilización como vector energético y demostrar su viabilidad. La demanda mínima inicial de vehículos será provista por el proyecto y las agencias de gobierno promotoras en su plan de renovación de flota.

El Decreto N.º 2.553/24 (Presidencia de la República, 2024) aprueba la Política Energética de la República del Paraguay, con proyección a 2050. La política contempla objetivos estratégicos para cada subsector de la energía y más de 300 metas a ser implementadas en tres horizontes temporales: corto plazo hasta 2028, mediano plazo hasta 2035 y largo plazo hasta 2050.

El hidrógeno está contemplado en dos de los objetivos estratégicos del Subsector de Fuentes Alternativas Renovables, con metas a ser alcanzadas en el corto o mediano plazo:

- **Objetivo estratégico:** Consolidar la coordinación, la articulación institucional, así como el marco legal, regulatorio y normativo con alcance ambiental, social y económico para el desarrollo del subsector.
 1. **Línea estratégica:** Marco normativo para el aprovechamiento del potencial de recursos naturales locales para producción de vectores energéticos.
 2. **Instrumentos:**
 - Normativa para la producción y uso de hidrógeno sostenible o de emisiones bajas de carbono (verde y otros). Meta y año crítico: contar con normativas para la producción y uso de hidrógeno sostenible o de emisiones bajas de carbono publicadas (2024).
 - Reglamentación sobre seguridad en la producción, transporte, almacenamiento, comercialización y uso de hidrógeno. Meta y año crítico: contar con reglamento técnico sobre seguridad en la producción, transporte, almacenamiento, comercialización y uso de hidrógeno publicado (2025).
- **Objetivo estratégico:** Contribuir a la diversificación de la matriz energética, con criterios de seguridad, eficiencia, asequibilidad y sostenibilidad.
 1. **Línea estratégica:** Promoción de fuentes alternativas renovables de energía.
 2. **Instrumento:**
 - Programa de promoción de hidrógeno sostenible. Meta y año crítico: contar con un programa de promoción de H₂ para transporte público de pasajeros y transporte de cargas en ejecución (2030).

• Perú

En Perú no se ha publicado una estrategia y hoja de ruta para el hidrógeno a partir de una iniciativa pública. En cambio, existe una propuesta de Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde en el Perú a 2050, elaborada por la Asociación Peruana del

Hidrógeno en 2022, como punto de partida para el desarrollo de proyectos a gran escala. La visión a 2050 del documento expresa tres ambiciones:

- Lograr un nivel alto de autosuficiencia en productos relacionados al hidrógeno verde, desarrollar la industria nacional y reemplazar la dependencia de productos e insumos extranjeros.
- Convertir el hidrógeno verde en una de las palancas clave para la reducción de emisiones y la mitigación del cambio climático.
- Generar un mercado de exportación del hidrógeno verde, aportando diversificación económica, desarrollo socioeconómico e innovación.

A partir de esa visión, se traza la hoja de ruta con objetivos de producción y demanda en tres horizontes temporales, en los cuales para 2030 se espera sentar las bases del mercado local, para 2040 fomentar la innovación industrial y los pasos para la exportación, y para 2050 alcanzar el despliegue a gran escala.

● República Dominicana

En su primera Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDN) de 2015, el país se comprometió a reducir las emisiones en un 25% en comparación con el escenario base para 2030. En 2020, República Dominicana actualizó su CDN, aumentando su ambición a una reducción del 27%. El Gobierno dominicano ha expresado en reiteradas oportunidades que trabaja para establecer un marco regulatorio que incentive el uso de hidrógeno como combustible para la producción de energía limpia, contribuyendo así con la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero. No obstante, también se ha destacado que el hidrógeno es un combustible a futuro, y que los estudios realizados indican que no se puede aspirar a un mercado de hidrógeno sin una alta penetración de energías renovables en la matriz energética del país.

En 2024, se presentó el estudio Hacia una Estrategia de Hidrógeno Renovable para la República Dominicana (GIZ, 2024) ejecutado por GIZ y la Superintendencia de Electricidad del Ministerio de Energía y Minas.

El estudio propone acciones estratégicas fundamentales para posicionar a la República Dominicana como un líder en la producción y utilización de hidrógeno

renovable, contribuyendo a sus objetivos de descarbonización y desarrollo sostenible. Así, para fomentar el desarrollo de la industria del hidrógeno renovable, se recomienda impulsar el ámbito I+D, tanto a nivel académico como técnico, crear un marco regulatorio claro que abarque toda la cadena de valor del hidrógeno, y evaluar y potenciar las infraestructuras existentes, así como establecer alianzas estratégicas internacionales.

A continuación, se presentan las acciones priorizadas para la definición y el desarrollo de un marco regulatorio para el hidrógeno renovable en la República Dominicana:

- Definir un marco normativo para establecer los lineamientos de funcionamiento del mercado y otorgar seguridad jurídica a inversionistas y desarrolladores de proyectos.
- Definir al hidrógeno como un vector energético que puede ser utilizado como combustible, medio de almacenamiento y agente de reducción.
- Establecer las competencias y responsabilidades de las diferentes instituciones involucradas.
- Establecer políticas y programas enfocados en acelerar el despliegue del hidrógeno de origen renovable.
- Establecer las condiciones de producción de hidrógeno para que sea considerado renovable, de manera armonizada con las normativas internacionales.

● Trinidad y Tobago

En noviembre de 2022, el Ministerio de Energía e Industrias Energéticas (MEEI) lanzó la Hoja de Ruta para una Economía de Hidrógeno Verde en Trinidad y Tobago (Ministerio de Energía e Industrias Energéticas, 2022), un documento desarrollado por la Corporación Nacional de Energía de Trinidad y Tobago Ltd. (National Energy), en nombre del MEEI, en colaboración con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

La Hoja de Ruta recoge los hallazgos del estudio previo para establecer un mercado de hidrógeno verde en Trinidad y Tobago, también desarrollado con el

apoyo del BID, que evalúa el potencial de ese país para producir H₂V como una importante opción de descarbonización para los sectores energético e industrial.

La economía del hidrógeno propuesta para Trinidad y Tobago se basa en la premisa de que la nación aprovecha su infraestructura y conocimientos existentes de hidrocarburos, combustibles fósiles y petroquímica para crear capacidad en otra vía, la del hidrógeno verde y los productos verdes.

El documento destaca la ventaja comparativa de Trinidad y Tobago para producir H₂V, gracias a su capacidad para capitalizar la infraestructura existente, sus conocimientos y capacidades, y sus relaciones comerciales de larga data.

Ya se ha mencionado que el país tiene una demanda cautiva de hidrógeno gris consumido por su industria petroquímica, pero este mercado podría llegar a ser verde. Las predicciones de la industria destacan que el amoníaco y el metanol verdes, producidos a partir de H₂V, desempeñarán un papel importante en la descarbonización mundial. Trinidad y Tobago puede aprovechar la infraestructura, la escala y la experiencia operativa existentes en la producción de estos productos químicos para ingresar a este nuevo mercado (Tabla 15).

TABLA 15:

Propuesta de valor de Trinidad y Tobago: aprovechamiento de la infraestructura existente

Nueva infraestructura requerida	Industria existente en Trinidad y Tobago	Red marítima y relaciones comerciales existentes
Parques eólicos offshore para producir hidrógeno verde	Instalaciones de producción, almacenamiento y exportación de amoníaco y metanol	Transporte marítimo

Fuente: elaboración propia

El país tiene las capacidades para comenzar a posicionarse en el mercado de amoníaco y metanol bajos en carbono, con la introducción de la captura de carbono en las instalaciones existentes aguas abajo, antes de la transición a la energía renovable y el hidrógeno verde, una vez que la infraestructura verde

aguas arriba esté en su lugar. Pero necesita políticas propicias adecuadas, marcos regulatorios y apoyo institucional que fomente la capacidad, lo que a su vez atraerá la inversión extranjera directa.

Existe la oportunidad para que Trinidad y Tobago amplíe y aumente su cartera de productos energéticos con productos bajos en carbono, y la necesidad y la base para que invierta en el desarrollo de la cadena de valor del hidrógeno, desde las plantas de electrólisis hasta las turbinas eólicas, así como para garantizar que se amplíe la infraestructura posterior para el amoníaco y el metanol verdes.

Las tecnologías eólicas marinas son la mejor fuente de energía renovable disponible en Trinidad y Tobago en la producción de hidrógeno verde. Esto brindaría la oportunidad de descarbonizar la industria petroquímica existente y contribuiría significativamente al crecimiento del PIB a través de un potencial de exportación adicional.

La hoja de ruta propuesta para Trinidad y Tobago se basa en un programa de desarrollo de 35 años y se divide en tres horizontes:

- Horizonte 1 (2022–2028):** se centra en establecer una base sólida para el futuro de Trinidad y Tobago. Considerada la parte más crítica de la hoja de ruta, el Horizonte 1 busca lograr un consenso entre todas las partes interesadas locales, desarrollar las políticas habilitantes y el marco regulatorio necesarios, así como establecer iniciativas de descarbonización visibles en el país. También se prevé el primer piloto de energía eólica marina hacia el final de este Horizonte.
- Horizonte 2 (2029–2044):** se basa en el Horizonte 1 y en el entorno propicio desarrollado para iniciar el primer proyecto de energía renovable a gran escala, así como la instalación de producción de hidrógeno verde. La meta del Horizonte 2 es instalar 25 GW de energía eólica marina con una producción de 10,5 GW para alimentar electrolizadores y producir 1,5 Mtpa de hidrógeno verde.
- Horizonte 3 (2045–2065):** refuerza el liderazgo de Trinidad y Tobago en el sector de las nuevas energías, alcanzando los 57 GW de capacidad eólica marina con una producción de 25 GW para alimentar el electrolizador y producir 4 Mtpa de hidrógeno verde para 2065, de los cuales 1,5 Mtpa se destinarán a los mercados existentes de amoníaco y metanol, y el resto a aplicaciones que se dirigen a nuevos mercados.

Se identifican tres facilitadores clave de la economía del hidrógeno: las cadenas de suministro locales, el marco regulatorio y la infraestructura existente. En cuanto al marco regulatorio, se hace hincapié en la necesidad de contar con políticas y normativa que construyan, faciliten y promuevan un entorno atractivo para la inversión extranjera a través de incentivos fiscales, subsidios y períodos de exenciones fiscales, así como subvenciones gubernamentales e impuestos a las ganancias más bajos. Esto también incluye la creación de mecanismos de financiación para impulsar el desarrollo de proyectos de energías renovables e hidrógeno verde y ampliar el acceso a fondos internacionales.

Uruguay

Uruguay ha desarrollado una exitosa política de Estado en materia de energías renovables para la descarbonización de su matriz energética, alcanzando 97% de generación renovable entre 2017 y 2020. La segunda etapa de sus planes de transformación energética incluye la descarbonización del resto del sector energético (transporte e industria) y de las materias primas industriales, e impulsar el desarrollo de nuevas fuentes como el hidrógeno verde y sus derivados.

La Estrategia Climática de Largo Plazo de Uruguay (Ministerio de ambiente, 2021) otorga un papel relevante al hidrógeno verde y sus derivados en el corto y largo plazo, proyectando su uso para el transporte de carga pesada y de pasajeros de larga distancia, así como para algunas industrias.

En diciembre de 2022, mediante Resolución N° 294/022, el Poder Ejecutivo encomendó al Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) la implementación y administración del Programa H2U (MIEM, 2022), con el objetivo de promover el desarrollo del hidrógeno verde en Uruguay. Dentro de su mandato, el MIEM lleva a cabo acciones en las áreas de innovación, aspectos regulatorios, atracción de inversiones, generación de capacidades, cooperación internacional, análisis de aspectos de infraestructura y logística, evaluación del potencial *offshore* y comunicación, entre otras. También se encomienda a siete ministerios, la Oficina de Planeamiento y Presupuesto y ocho organizaciones del Estado a colaborar con el MIEM en la ejecución del Programa H2U.

La Hoja de Ruta parte de la premisa de que Uruguay tiene muy buenas condiciones para el desarrollo del hidrógeno verde y derivados, como combustibles sintéticos, materias primas y fertilizantes, tanto para su uso a nivel local como para la exportación.

Como parte del trabajo de este grupo interinstitucional de hidrógeno verde y derivados, coordinado por el MIEM, se formuló la Hoja de Ruta del hidrógeno verde y derivados en Uruguay (MIEM, 2023), documento que estuvo en consulta con el sector privado, la sociedad civil y la academia durante 2021 e inicios de 2023 y cuya versión final fue publicada en agosto de 2024. Se trata de un instrumento estratégico y programático con horizonte a 2040, que establece las metas y sectores que permitirán impulsar la economía del hidrógeno, promoviendo el desarrollo sostenible y bajo en carbono.

La Hoja de Ruta parte de la premisa de que Uruguay tiene muy buenas condiciones para el desarrollo del hidrógeno verde y derivados, como combustibles sintéticos, materias primas y fertilizantes, tanto para su uso a nivel local como para la exportación. Como ventajas competitivas, se destacan el potencial y la complementariedad de energías renovables, la matriz eléctrica con muy alta participación de renovables, la disponibilidad de agua y de CO₂ biogénico, la logística e infraestructura local y para exportación, así como su estabilidad institucional y su fuerte democracia.

Sobre la base de esas ventajas competitivas, se proyecta que el mercado doméstico y las exportaciones de hidrógeno verde y productos derivados representan una oportunidad de facturación anual estimada en USD 160 millones por año a 2030 y de USD 1.900 millones a 2040.

Para lograr esta ambición a 2040, se prevé que el desarrollo de este nuevo sector de actividad se realice en tres fases, con los siguientes objetivos (Tabla 16):

TABLA 16:
Fases de la Hoja de Ruta del hidrógeno verde y derivados de Uruguay

Fase 1 (2022–2025)	Objetivos: • impulsar el desarrollo del mercado doméstico, orientado a los sectores de camiones, transporte marítimo y fertilizantes • sentar las bases para los primeros proyectos de exportación, orientados a hidrógeno y combustible de aviación, amoníaco, metanol
Fase 2 (2026–2030)	Objetivos: • escalar el mercado doméstico (demanda y proyectos) • tener en operación los primeros proyectos para exportación (como el e-metanol)
Fase 3 (+2030)	Objetivos: • confirmar la ambición a 2040 • consolidar el mercado doméstico, con un mayor desarrollo de la cadena de valor del hidrógeno y sus derivados • escalar hacia la producción y exportación de productos como el hidrógeno verde y el amoníaco verde

Fuente: elaboración propia

Dentro de cada una de las tres fases, se fijan las siguientes metas de producción, demanda e infraestructura y logística (Figura 76):

FIGURA 76:
Metas de la Hoja de Ruta del hidrógeno verde y derivados de Uruguay

Fases hoja de ruta.	 Fase 1 (2022 - 2025): Desarrollar regulación; desarrollar primeros proyectos piloto; atraer los primeros proyectos a escala de exportación.	 Fase 2 (2026 - 2030): Expansión nacional; inicio de los primeros proyectos a escala de exportación.	 Fase 3 (+2030): Mercado nacional a gran escala; crecimiento acelerado de exportaciones.
Detalles generales del proyecto.	+1-2 proyectos pequeña escala implementados, proyectos a mediana escala en desarrollo.	+3-4 proyectos de mediana escala (100-200 MW)	+ proyectos a escala mayor.
Producción (producción de energía e hidrógeno).	• 200- 400 MW de capacidad energética de RES en desarrollo. • ~20 MW de capacidad de producción H₂ para pequeña escala y 100-200 MW en desarrollo.	• 1-2 GW de capacidad de alimentación de RES. • Aprox. 1 GW de capacidad de producción H₂.	• ~18 GW de capacidad de RES. • ~9 GW de capacidad de producción de H₂ y derivados.
Demanda (usos finales en movilidad, industria y energía).	• +1-2 proyectos pequeña escala implementados en casos de usos transporte (camiones pesados, buses de larga distancia, vehículos agrícolas). • +1 proyecto en desarrollo combustibles, materias primas o fertilizantes verdes.	• ~1-2 proyectos a mediana escala en desarrollo para combustibles, materias primas o fertilizantes verde • + Proyectos domésticos: fertilizantes, transporte terrestre y marítimo	• ~3-4 proyectos a escala mayor en desarrollo para exportaciones de combustibles, materias primas o fertilizantes verdes, H₂ y NH₃. • + Proyectos para mercado interno (ej. transporte, marítimo, fertilizantes verdes).
Infraestructura y logística (ductos, almacenamiento, puertos).	• Establecer un plan de infraestructura vinculada a aspectos logísticos como ductos, líneas de transporte y puertos, promoviendo sinergias. • Desarrollar solución portuaria para exportación de combustibles, materias primas o fertilizantes verdes en Montevideo.	• Ejecutar el plan de infraestructura. • Adecuación del puerto de Montevideo a necesidades identificadas en la primera fase.	• Continuar la implementación del plan de infraestructura.

Fuente: Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde y Derivados de Uruguay.

Para el logro de estos objetivos y metas de cada fase, se prevé el desarrollo de actividades relacionadas con elementos clave identificados (Figura 77).

FIGURA 77:
Elementos clave y actividades de la Hoja de Ruta del hidrógeno verde y derivados de Uruguay

Fases hoja de ruta.	 Fase 1 (2022 - 2025): Desarrollar regulación; desarrollar primeros proyectos piloto; atraer los primeros proyectos a escala de exportación.	 Fase 2 (2026 - 2030): Expansión nacional; inicio de los primeros proyectos a escala de exportación.	 Fase 3 (+2030): Mercado nacional a gran escala; crecimiento acelerado de exportaciones.
Mecanismos clave necesarios:	1 Desarrollar regulación, así como normas de técnicas de seguridad y calidad. 1 Elaborar guías ambientales y de ordenamiento territorial. 1 Sistematizar procesos de obtención de permisos y licencias. 2 Diseñar estructura de incentivos para las inversiones. Implementar apoyo financiero para los pilotos. 3 Establecer acuerdos internacionales para promover inversiones, generación de conocimiento, la implementación de pilotos y el desarrollo de I+D. 5 Generar conocimiento y divulgar información garantizando el desarrollo local sostenible mediante un proceso participativo. 5 Coordinar y diseñar programas de generación de capacidades para el sector público, privado y académico.	1 Implementar y continuar desarrollando regulaciones vinculadas al hidrógeno verde y derivados. 2 Implementar incentivos enfocados en atracción de inversiones, competitividad de costos y estímulo a la demanda interna. 3 Efectivizar la cooperación internacional a lo largo de la cadena de valor y el desarrollo de proyectos a escala. 4 Crear conciencia nacional del potencial del hidrógeno verde y derivados, teniendo en cuenta aspectos económicos, sociales y ambientales. 5 Implementar programas de desarrollo de capacidades con el sector público, privado y académico.	• Continuar identificando y desarrollando mecanismos necesarios para el desarrollo del hidrógeno verde y derivados en los 5 ejes planteados.

Fuente: Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde y Derivados de Uruguay.

La Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde se apoya en el Programa H2U como herramienta para la construcción de una política de Estado en torno al hidrógeno. El programa H2U propone cinco ejes de trabajo a desarrollar por el grupo interinstitucional de siete ministerios y otras organizaciones estatales, coordinado por el Ministerio de Industria, Energía y Minería, y con la colaboración de los gobiernos locales, organizaciones no gubernamentales, empresas, sector académico y la sociedad civil.

Los componentes de esos ejes de trabajo son los que se especifican en la Hoja de Ruta: generación de capacidades, inversiones, infraestructura, regulación y diálogo ciudadano.

El eje de trabajo de regulación otorga gran relevancia a la gestión sostenible de los recursos y los proyectos, mediante las siguientes actividades:

- Regulaciones de seguridad y calidad
- Guías ambientales, estudios vinculados al uso del agua

- Certificaciones regionales
- Directrices para uso de suelo y servidumbre para gasoductos y transmisión eléctrica
- Acciones que permitan realizar seguimiento de los desarrollos tecnológicos (antena tecnológica).

En el marco del Programa H2U se realizó el informe *Análisis de las necesidades regulatorias para el desarrollo de proyectos de producción de hidrógeno verde y derivados* (MIEM, 2024) que aborda la regulación vigente en Uruguay relacionada con proyectos vinculados a la cadena de valor del hidrógeno verde y sus productos derivados, con especial énfasis en aspectos de seguridad. Además, incluye un análisis comparativo con regulaciones internacionales, la identificación de aspectos a considerar en materia de seguridad y ordenamiento territorial, así como un resumen de la normativa por eslabones de la cadena. Tras una revisión exhaustiva de la normativa internacional, se propone un marco regulatorio para Uruguay alineado con dichos estándares. Por último, se presentan esquemas regulatorios para tres casos de estudio de producción de hidrógeno verde y sus derivados, incluyendo una propuesta normativa para los estándares de calidad del hidrógeno.

● **Venezuela**

Hasta el presente, no existe ninguna iniciativa gubernamental tendiente a la adopción de una política pública o regulación específica para el hidrógeno. El Artículo 6 del Proyecto Ley de Energías Renovables y Alternativas, que se encuentra en trámite legislativo en la Asamblea Nacional, incluye al hidrógeno dentro del ámbito de aplicación. Durante 2023 se llevó a cabo el proceso de consulta nacional sobre su texto. De prosperar su tramitación, significa que el desarrollo del hidrógeno, del mismo modo que las otras energías renovables y alternativas, será declarado de interés público y carácter estratégico para la nación, en cuanto diversifican la matriz energética y garantizan la soberanía nacional.

El órgano rector de su gestión será el Ministerio del Poder Popular con competencia en materia de energía eléctrica y podrá disponer acciones, programas y proyectos para el sistema eléctrico nacional, en concordancia con la normativa ambiental vigente. Se otorga al Ministerio el mandato de diseñar

el Plan Nacional de Energías Renovables y Alternativas y se crea un Registro Nacional, dentro del órgano rector, donde deberán inscribirse los actores del sector para establecer la base de datos e información de los aspectos básicos, capacidad profesional y tecnológica de los proyectos actividades y servicios que se desarrollen en esa área.

Los Ministerios del Poder Popular con competencia en ciencia y tecnología, educación, industrias y energía eléctrica, conjuntamente con los centros de investigación, promoverán la investigación científica y aplicada y el desarrollo e innovación tecnológica relacionada con estas energías.

ACTUACIÓN FRENTE A LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL Y SOCIAL

En el eje de la problemática social y ambiental se destacan las políticas y la habilitación regulatoria para la sostenibilidad general de la industria, en los ámbitos de gestión ambiental de los proyectos y la relación con las comunidades locales, los criterios de sostenibilidad adoptados, la compatibilidad territorial y las consideraciones a la diversidad ambiental, socioeconómica y cultural, entre otras.

Las estrategias y hojas de ruta nacionales para el hidrógeno y sus derivados en general destacan sus beneficios ambientales y socioeconómicos y ponen de relieve la importancia de articular la protección del ambiente, la política climática nacional y las oportunidades socio-económicas en su desarrollo.

Algunas estrategias no sólo enuncian estos principios generales, sino que también contemplan acciones específicas en ese ámbito, con metas y horizontes temporales concretos. Adicionalmente, algunos países están llevando a cabo acciones específicas, como las que se destacan a continuación. Asimismo, se analiza la iniciativa CertHiLAC para la armonización regional de los esquemas de

certificación del hidrógeno y su inserción en los futuros mercados internacionales, con foco en los atributos de sostenibilidad ambiental y social consensuados por los países adherentes.

● Argentina

En marzo de 2023, el Gobierno puso en marcha una Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) para establecer un marco de sostenibilidad al despliegue de la economía del hidrógeno, a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible como autoridad evaluadora. La EAE está prevista en la Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Economía del Hidrógeno (ENH), con los siguientes objetivos:

- proveer una mayor consistencia entre los objetivos productivos y las metas ambientales, en el marco del cumplimiento de la normativa ambiental vigente
- generar condiciones de mayor certidumbre a las potenciales inversiones, estableciendo las bases para las Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA) que deben afrontar los proyectos individualmente
- elaborar propuestas de zonificación potencial para la radicación de polos productivos.

La EAE aplicada al desarrollo de la economía del hidrógeno permite identificar oportunidades y riesgos socioambientales vinculados al desarrollo territorial de la actividad y aportar información a potenciales inversores, gobiernos locales y a la sociedad civil, entre otros actores interesados, generando un horizonte de mayor certidumbre.

Su implementación implica realizar un ejercicio de planificación participativa y federal, que contempla:

- La recopilación y sistematización de información relativa a las variables socioambientales potencialmente afectadas por la producción de hidrógeno de bajas emisiones.
- La implementación de una metodología de comunicación y consulta con actores del territorio.

- La evaluación de los resultados obtenidos en un análisis multicriterio que pondera las oportunidades y los riesgos del despliegue territorial de la actividad.
- La elaboración de un plan de seguimiento para futuras iteraciones de la EAE, que contemple la mejora de la información disponible y de cuenta del avance de proyectos y/o políticas implementadas en relación con la economía del hidrógeno.

La Política Ambiental Estratégica del Hidrógeno deberá estar enmarcada en la Ley N° 25.675, Política Ambiental Nacional (Gobierno de Argentina, 2002), ley general del ambiente como bien jurídico protegido, sancionada el 28 de noviembre de 2002, que establece los principios de política ambiental y los presupuestos mínimos para el logro de una gestión sustentable y adecuada del ambiente, la preservación y protección de la diversidad biológica, y la implementación del desarrollo sustentable.

La implementación de esta herramienta es consistente con la adhesión de Argentina al 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 (CEPAL, 2018) (más conocido como Acuerdo de Escazú).

En noviembre de 2023 se hizo pública la *Síntesis de resultados preliminares de la EAE* (Secretaría de Asuntos Estratégicos, 2023). Los hallazgos más significativos son los siguientes:

- **Participación:** refleja los resultados de las actividades realizadas con el objetivo de recoger las percepciones y prioridades de actores locales clave y de difundir la ENH, sus objetivos y alcances.

Existe entre los actores locales una percepción positiva acerca del desarrollo de la economía del hidrógeno. Especialmente encuentran un valor intrínseco en la contribución del hidrógeno a la mitigación del cambio climático y la descarbonización de actividades productivas. Encuentran un atractivo en la posibilidad de generar exportaciones, contribuir a la diversificación productiva de las provincias y en el potencial desarrollo de infraestructura. Al mismo tiempo, manifiestan preocupaciones en torno a la posibilidad de que esta actividad siga modelos “extractivistas” o de “enclave”, es decir, de apropiación de condiciones naturales sin un anclaje real y efectivo en las realidades socio productivas locales.

Igual preocupación se observa en materia de débiles encadenamientos productivos y baja generación de empleo de calidad. En la medida en que estos objetivos locales no se aseguran, los actores territoriales empiezan a restar apoyo al desarrollo de la actividad. También manifiestan preocupaciones por recursos críticos como el agua y la afectación de ecosistemas y fauna (principalmente aves y murciélagos). Reconociendo estas preocupaciones, la política pública debería enfocarse en mejorar el arraigo territorial de los proyectos, especialmente a partir de los encadenamientos productivos, locales y nacionales.

- **Diagnóstico:** contiene los resultados relativos al relevamiento, sistematización y análisis de información con el objetivo de identificar las variables ambientales, sociales y económicas críticas involucradas por la producción de hidrógeno verde y azul en las provincias de la región patagónica y de la Provincia de Buenos Aires.

Existe una enorme superficie territorial en el país que tiene una aptitud alta o muy alta para el desarrollo de proyectos de hidrógeno de bajas emisiones. Para el caso de hidrógeno verde se cuenta con 402.879 km² y para hidrógeno azul, 382.509 km². A modo de comparación, la superficie de Alemania es de 357.592 km². Aún después de identificar las zonas de exclusión (es decir aquellas zonas que por normativa nacional o provincial no son aptas para el desarrollo de proyectos, ya sea por consideraciones ambientales o por ser zonas urbanas), la extensión territorial es notoria. Esto permite tener margen de maniobra para alentar la radicación de proyectos en áreas de menores riesgos socioambientales, lo que debería ser prioridad de la política pública.

La aptitud de los territorios surge de la aplicación de un modelo de análisis de decisión multicriterio, considerando en forma conjunta un conjunto de dimensiones socioambientales clave. Entre las ambientales destacan la identificación de áreas relevantes para la conservación de la biodiversidad, y el interés sobre la conservación de especies potencialmente afectadas por la actividad como aves migratorias y aves playeras. Del mismo modo, el índice de sequía debe considerarse debido a la fragilidad de estos ecosistemas y la necesidad de adaptarse a los efectos del cambio climático. Entre las dimensiones sociales se identifican como temas de interés la presencia de comunidades originarias y la preservación

de sitios arqueológicos y ancestrales, así como los espacios de interés cultural y turístico. Por último, se reconocen como activos territoriales de valor la presencia de universidades y centros de formación de empleo manufacturero.

En la EAE se incluyen los mapas que muestran el resultado de la zonificación para hidrógeno verde y azul en las mencionadas regiones patagónica y de la Provincia de Buenos Aires.

Producto del proceso de diálogo y de la visión expresada por los diferentes actores involucrados, el país ha formulado los objetivos de la Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Economía del Hidrógeno:

- Desarrollar integralmente el vector productivo del hidrógeno.
- Fomentar los eslabonamientos aguas arriba y aguas abajo de la cadena de valor.
- Desarrollar capacidades industriales en los diferentes segmentos de la cadena y así como en sus trabajadores, a través de la capacitación y la formación técnica y profesional para alcanzar mayores niveles de inclusión social.
- Potenciar los desarrollos científicos y tecnológicos para acompañar la economía del hidrógeno con conocimiento local, logrando objetivos de soberanía tecnológica. Potenciar las ventajas competitivas del país en vistas a exportar hidrógeno de bajas emisiones.
- Promover la creación de un mercado interno del hidrógeno, basado en los usos existentes y en nuevos usos, aportando a la disminución de la huella de carbono de diferentes productos industriales para sostener y ampliar el acceso a los mercados internacionales.
- Generar un ecosistema productivo en torno del hidrógeno de bajas emisiones integrado con los espacios federales en concordancia con los objetivos de desarrollo territorial armónico y sostenible.
- Potenciar el desarrollo de la economía del hidrógeno en un marco de sostenibilidad, en consideración por los equilibrios ambientales y los objetivos del desarrollo sostenible.

Estos objetivos nacionales deben ser internalizados como propios por cada proyecto de inversión.

Dentro de las tareas pendientes a realizar en el marco de la EAE están el desarrollo de un proceso de participación y consulta con comunidades originarias que debe ser prioritario, en concordancia con los compromisos asumidos internacionalmente por el país en el Acuerdo de Escazú. Del mismo modo resulta necesaria ampliar la participación a una mayor cantidad de actores interesados, tales como referentes de comunidades rurales, biólogos especialistas en fauna voladora (aves y murciélagos) y referentes de otras localidades, entre otros.

Finalmente, se propone un listado de acciones a realizar que, lejos de ser exhaustivo, tiene como objetivo la mejora continua de la EAE y la implementación de la ENH mediante el establecimiento de un marco de sostenibilidad para el desarrollo de la actividad.

• Brasil

El Plan de Trabajo Trienal (2023-2025) (Comité Gestor PNH2, 2023), elaborado por el Comité Gestor del PNH2, contiene propuestas de acciones ordenadas en distintos componentes según los ámbitos de los cinco Ejes Estratégicos del PNH2.

Bajo el Componente 4 del Eje Estratégico 3, “Planificación Energética”, se incluye la Acción 4.1, “Impactos socioambientales y de recursos hídricos derivados de la producción, transporte, almacenamiento, conversión y uso del hidrógeno y sus derivados”, con los siguientes elementos:

- las externalidades socioambientales previstas en la producción, transporte, uso, conversión y consumo de hidrógeno y sus derivados (consumo de recursos hídricos para la producción de hidrógeno, demanda de minerales estratégicos para el desarrollo de la economía del hidrógeno, contaminantes atmosféricos y otras externalidades)
- el potencial para reducir las emisiones de CO₂eq en las diferentes aplicaciones del hidrógeno

Para esta acción, se designa como actores a los Miembros de la Cámara Técnica de Planificación Energética del PNH2 e instituciones invitadas. Como resultado,

se producirán tres estudios entre 2023 y 2025. En julio de 2024, el MME realizó una serie de webinars técnicos en el ámbito del Programa Nacional de Hidrógeno (PNH2), donde se presentaron los primeros estudios técnicos con aspectos socioambientales, entre otros.

Chile

La sostenibilidad es un ángulo clave en el desarrollo de la economía del hidrógeno de Chile. El Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030, ya mencionado, brinda el marco estratégico para fortalecer sus múltiples aspectos y designa a los organismos responsables en cada caso.

Las dos líneas de acción principales son la Línea de Acción 4: Gestión Ambiental, dedicada a reforzar el manejo ambiental relacionado con el desarrollo de proyectos y la Línea de Acción 5: Sustentabilidad de la Industria, dedicada a contar con estándares de sostenibilidad adecuados y consistentes. Estas acciones se desarrollarán en una serie de hitos hasta 2030:

- **Línea de Acción 4: Gestión Ambiental (Acciones 21 a 23). Plazo: 2023-2027.** En esta línea el Estado trabaja en distintos frentes para entregar certezas respecto a la evaluación de los impactos ambientales de proyectos.

- 1. Acción 21: Elaborar líneas de base públicas ambientales y propuestas de monitoreo en regiones priorizadas. Plazo: 2023-2026.** La acción implica el diseño de una plataforma tecnológica de línea de base que sea parte de la arquitectura del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SINEA) y que también integre datos del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) para centralizar la información ambiental. Quedará alojada en los servidores del Ministerio del Medio Ambiente y contará con los protocolos de accesibilidad necesarios para la operación por parte de diferentes servicios públicos, privados y población en general.
- 2. Acción 22: Consolidar información en el SEIA. Plazo: 2024-2028.** Implica generar un sistema de información de líneas de base de las diversas componentes ambientales relevantes que surjan en el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) de un proyecto que esté sometido al SEIA.

3. Acción 23: Adoptar norma/estándar de referencia internacional en ausencia de local para evaluación ambiental de proyectos.

Plazo: 2025-2027. Esta acción implica la selección de normativa que se considere relevante en el proceso de construcción y operación de la industria y su gestión sustentable y aplicarla hasta que sea reemplazada por normativa nacional. En el país hay ámbitos que se encuentran normados, pero hay otros que no, y es necesario establecer ciertos criterios mínimos para poder avanzar definiendo estándares o el uso de normativa de referencia.

- **Línea de Acción 5: Sustentabilidad en la Industria (Acciones 24 a 27).**
Plazo: 2024-2030. Esta línea identifica una serie de acciones para contar con estándares de sostenibilidad en la industria. En relación con este atributo, se destacan las Acciones 24 y 27.
- 4. Acción 24: Identificar y analizar impactos a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno y derivados. Plazo: 2024-2027.** Como hitos se prevé contar con un estudio publicado sobre identificación de impactos socioeconómicos derivados de proyectos de hidrógeno renovable en Chile (segundo semestre de 2024) y un estudio público de análisis de ciclo de vida de la industria del hidrógeno y derivados y su cadena de valor (a fines de 2026).
 - 5. Acción 27: Promover participación temprana en los territorios. Plazo: desde 2024.** La Acción busca la adopción de altos estándares socioambientales por parte de las empresas, facilitando el diálogo, generando relaciones constructivas de largo plazo y promoviendo la participación y el respeto de los derechos humanos. Implica el involucramiento temprano de las comunidades potencialmente afectadas con el proyecto, proveyendo soporte metodológico y acompañamiento en un proceso de diálogo multiactor. También tiene el objetivo de generar relaciones armónicas constructivas de largo plazo entre empresas, comunidades locales y otros actores que permitan minimizar impactos, evitar y resolver conflictos, entregar información sobre potenciales impactos ambientales y dar legitimidad a las decisiones adoptadas.

Adicionalmente, otras líneas de acción también tienen actuaciones previstas para el ámbito medioambiental, como las siguientes:

- **Línea de Acción 7: Sistema de Permisos.** La Acción 33 prevé la elaboración y generación de criterios técnicos para la evaluación ambiental de diferentes tipos de proyectos relacionados a la cadena de valor del hidrógeno y sus derivados, que irán acompañadas por la Acción 34 para el fortalecimiento del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), en un periodo que se extiende hasta 2030.
- **Línea de Acción 6: Habilitación Regulatoria.** La Acción 29 está dedicada a impulsar regulación específica y habilitante para la desalinización del agua de mar. Plazo: 2024-2025. La acción busca establecer un marco normativo y procedimientos claros y unificados, habilitando al Ministerio de Obras Públicas (MOP) para promover y concesionar de forma planificada ese recurso hídrico. Esta regulación estará basada en los estudios disponibles, incluidos los relacionados a la salmuera, infraestructura multipropósito, que incluya el uso industrial y compartido por parte de los proyectos. Con esta medida se plantea promover el uso de agua desalada y/o re-uso del agua para actividades industriales, priorizando las fuentes de agua para consumo humano.
- **Línea de Acción 8: Compatibilidad e Inserción territorial para Proyectos (Acciones 35 a 38).** Plazo: 2023-2030. Esta línea de acción busca dar certeza regulatoria en materia de emplazamiento, abordando los usos de suelo aplicables a los proyectos y su cadena de valor. Se plantea trabajar en el desarrollo de instrumentos de planificación territorial intercomunal y comunal, todo ello sometido al procedimiento de Evaluación Ambiental Estratégica¹⁰, que considere los requerimientos de la industria y los instrumentos medioambientales alineados con el art. 43 de la Ley Marco de Cambio Climático.

¹⁰. El Artículo 7° bis de la Ley 19.300 establece la aplicación de la EAE en dos niveles: uno facultativo, respecto de aquellas políticas y planes de carácter normativo general que la o el Presidente de la República decida, a proposición del Consejo de Ministros para la Sostenibilidad; y otro obligatorio, correspondiente a Instrumentos de Planificación y Ordenamiento Territorial, tales como Planes Reguladores Intercomunales, Planes Reguladores Comunes y Planes Seccionales, y Zonificaciones del Borde Costero, del territorio marítimo y el Manejo Integrado de Cuencas.

Colombia

La Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia (Ministerio de Energía y Minas, 2021) se cimienta en cinco pilares que buscan el desarrollo social, medioambiental y económico del país. El primer pilar es la reducción de emisiones, siendo el hidrógeno y sus derivados una pieza clave para alcanzar la neutralidad de carbono, a la que Colombia se ha comprometido para 2050. Además, se lo ve como un elemento que ayudará al despliegue e integración de mayor capacidad de generación renovable, favoreciendo una economía sostenible, facilitando la gestión del sistema y habilitando el transporte y el almacenamiento de energía.

En el mapa de acciones relativas al **Eje de actuación 1. Habilitadores jurídicos y regulatorios** se incluyen las siguientes acciones:

- **Acción 2. Establecer los conceptos de hidrógeno verde y azul acorde al marco jurídico nacional.** Consolidar las definiciones y taxonomía de hidrógeno verde y azul teniendo en cuenta las emisiones de CO₂ asociadas. Puesto que la Ley 2099 de 2021 incluyó al hidrógeno verde y azul como FNCER y FNCE, respectivamente, esta inclusión permite aplicar a los proyectos de hidrógeno verde y azul los beneficios e incentivos correspondientes a esas categorías de energía. El hidrógeno verde es considerado FNCER, pudiendo ser producido a partir de fuentes renovables tales como la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar o la mareomotriz. No obstante, todavía se requiere una definición más precisa para definir la categoría del hidrógeno producido mediante otras fuentes de energía renovables, como la hidroeléctrica con capacidad superior a 10 MW. De este modo, todo el enorme potencial hidroeléctrico de Colombia podrá estar a disposición de la producción de hidrógeno verde.
- **Acción 3. Diseñar un sistema de garantías de origen y certificaciones para el hidrógeno. Desarrollar una herramienta de monitoreo del sistema de garantías de origen y certificaciones.** Se considera esencial diseñar un sistema de garantías de origen o seriación que, además de tener en cuenta la ruta de producción, considere el máximo de emisiones u otros factores ambientales para la comercialización del hidrógeno como verde o azul. Es necesario definir el procedimiento, los requisitos, así como el organismo responsable, para la emisión de garantías de origen. Este sistema

proporcionará las señales de precio adecuadas a los consumidores finales y será la base para establecer futuros mecanismos de apoyo. Además, se deberá desarrollar un sistema que garantice un correcto monitoreo, reporte y verificación, que deberá estar coordinado con los sistemas de Monitoreo, Reporte y Verificación ya existentes para evaluar la reducción de emisiones de CO₂. El Decreto 1476¹¹, reglamentario de la Ley 2099 de 2021, prevé la creación de un sistema de Certificación de Origen del Hidrógeno. El Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible quedan facultados para adoptar un mecanismo público de certificación de origen del hidrógeno producido en el país, que permita asegurar la unicidad y trazabilidad de los insumos utilizados para la producción y su intensidad de emisiones asociadas, así como cualquier otro atributo que se considere relevante monitorear. Sin embargo, se establece que estas certificaciones de origen no serán un requisito para la obtención de los beneficios tributarios bajo la Ley 2099 de 2021. Para cumplir con ese mandato legal, el Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible constituyeron el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE).

- **Acción 8. Simplificar y adaptar trámites administrativos. Revisar los permisos y procedimientos para la ejecución de proyectos de hidrógeno incluyendo aspectos ambientales y usos de suelo.** Dentro de esta Acción 8 se llevará a cabo una revisión de los permisos y trámites necesarios para la puesta en marcha y operación de proyectos, a fin de facilitar su desarrollo. En materia ambiental, puesto que el hidrógeno verde y azul son catalogados como FNCER y FNCE respectivamente, les es aplicable el régimen especial establecido en la Ley 1715 (Congreso de Colombia, 2014), en el que la Autoridad Ambiental Nacional (ANLA) y Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) están llamadas a establecer un ciclo de evaluación rápida para proyectos de FNCE. Se recomienda que estas autoridades ambientales realicen estudios para cuantificar los impactos ambientales de estos proyectos, analizar los trámites ambientales que requerirán y eliminar los trámites innecesarios para agilizar la obtención

11. Decreto 1476 de 2022 para la promoción, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno.

de permisos y licencias ambientales. Para lograr una simplificación y ejecución efectiva de los trámites se fortalecerá la capacidad técnica de los funcionarios de las autoridades ambientales a través de procesos de formación. Asimismo, se recomienda que los municipios incluyan dentro de los Esquemas de Ordenamiento Territorial los lugares dentro de su territorio donde se pueden establecer proyectos de hidrógeno. La Ley 1715 de 2014 declara las actividades de producción y utilización de FNCE como de utilidad pública e interés social, por lo que tiene primacía en lo referente a ordenamiento territorial. Se recomienda que las entidades territoriales analicen las normas básicas de edificación y usos de suelo de una manera que favorezcan el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde y azul en su territorio.

- **Adicionalmente, en el mapa de acciones relativas al Eje de actuación 4. Apoyo al despliegue de infraestructuras de la Hoja de Ruta se incluye la Acción 17. Evaluación del estrés hídrico en Colombia y fomento del desarrollo e implementación de tecnologías de desalinización.**

En colaboración con universidades, laboratorios y entidades públicas, se llevarán a cabo estudios regionales de estrés hídrico que pudiesen condicionar la producción de hidrógeno verde a gran escala. Se impulsará la investigación ya iniciada por universidades y grupos de investigación de todo el país que promueven el uso y desarrollo de tecnologías de desalinización. Estas tecnologías permitirán por un lado acabar con la escasez de agua para el consumo de las comunidades locales y, por otro lado, disponer del agua necesaria para la producción de hidrógeno mediante electrólisis.

• Costa Rica

Durante décadas, Costa Rica se ha posicionado como un país líder en cuidado del medio ambiente a nivel global, y en 2020 ratificó ese compromiso mediante la actualización de su Contribución Determinada a nivel Nacional, con la ambición de lograr su carbono neutralidad en 2050. La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Costa Rica 2022–2050 (Ministerio de Ambiente y Energía, 2022), subraya la imagen internacional de Costa Rica como un país verde y ambientalmente responsable, destacando que esa marca país verde le da visibilidad para atraer

inversión extranjera y establecer alianzas claves para impulsar el hidrógeno verde en el país.

En ese ámbito, se tiene en cuenta que Costa Rica cuenta con la marca “esencial Costa Rica” (Esencial Costa Rica, s.f.), con dos ejes estratégicos:

- **Posicionamiento país:** enfocado a destacar las características que describen a los ciudadanos costarricenses: especializados, talentosos, carismáticos, “pura vida”.
- **Competitividad país:** enfocado a garantizar que las empresas y productos con el sello “esencial Costa Rica” representan los valores de excelencia, sostenibilidad, innovación, progreso social y vinculación costarricenses.

La Estrategia prevé el establecimiento de sinergias entre el hidrógeno verde y la marca “esencial Costa Rica”. Por un lado, el hidrógeno es una tecnología alineada al eje estratégico Competitividad país, que podría fortalecer a la nación en su posicionamiento como país sostenible e innovador, y por el otro lado, el hidrógeno es un producto que podría aspirar al sello “esencial Costa Rica” y hallar un lugar en el comercio internacional tanto de hidrógeno como de sus derivados (amoníaco, metanol, entre otros).

Trinidad y Tobago

La Hoja de Ruta para una economía de hidrógeno verde en Trinidad y Tobago (Ministerio de Energía e Industrias Energéticas, 2022) no aborda de manera específica los aspectos ambientales y sociales relacionados con el desarrollo del nuevo sector del hidrógeno. Tampoco existe normativa derivada ni procedimientos para permisos y autorizaciones que se hayan desarrollado de manera específica para los proyectos de hidrógeno.

Se entiende que los criterios de sostenibilidad de la industria, la gestión sostenible de los proyectos y la relación con las comunidades son guiados por las políticas públicas y la regulación nacional general en materia ambiental.

El instrumento que proporciona el marco general para la gestión ambiental es la Política Nacional de Medio Ambiente (NEP) publicado por el Gobierno en 2018 (Gobierno de Trinidad y Tobago, 2018). Las políticas nacionales y sectorial para el hidrógeno que se dicten y que guarden relación con la ordenación del medio

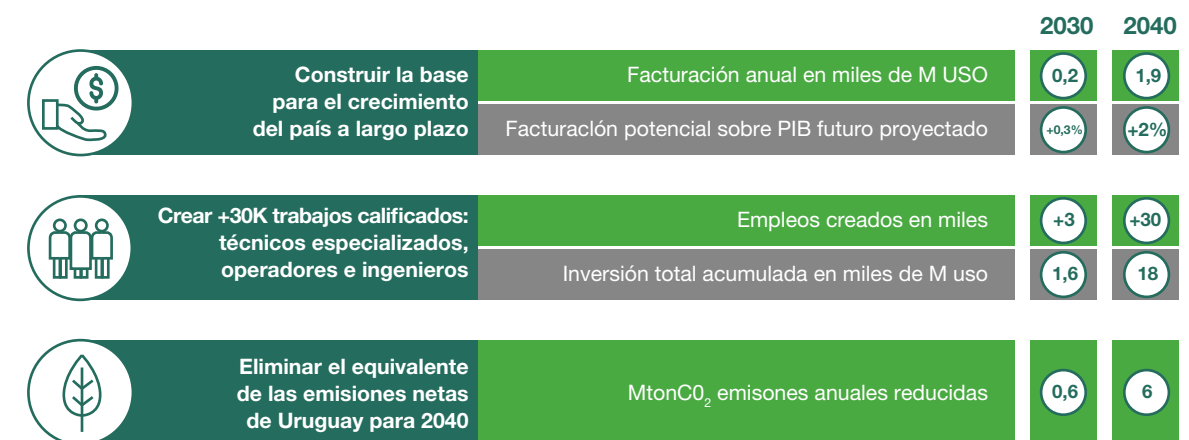
ambiente o de los recursos naturales; los procedimientos detallados sobre la gestión ambiental; y las acciones concretas para lograr la sostenibilidad de los proyectos se basarán, por lo tanto, en los principios y enfoques más amplios incorporados en la NEP.

La responsabilidad de monitorear la implementación y efectividad de la NEP recae en la Autoridad de Gestión Ambiental (EMA).

Uruguay

La Hoja de Ruta del hidrógeno verde y derivados en Uruguay estima que el mercado doméstico y las exportaciones de hidrógeno verde y productos derivados representan una oportunidad de facturación anual de USD 160 millones a 2030 y de USD 1.900 millones a 2040. A partir de esa estimación, se evalúan los impactos ambientales y socioeconómicos relevantes para Uruguay que la concreción de la oportunidad de USD 1.900 millones por año implica. La facturación anual de esta industria podrá ser del orden de la exportación de los principales productos agroindustriales del país, generar más de 30.000 empleos directos y evitar 6 Mt CO₂ de emisiones a 2040 (Figura 78).

FIGURA 78:
Impactos socioeconómicos y ambientales del desarrollo del sector hidrógeno verde en Uruguay



Fuente: Hoja de Ruta del hidrógeno verde y derivados en Uruguay

Se entiende que el país, a partir de la experiencia generada en el proceso de incorporación de energías renovables y otros proyectos de gran porte, cuenta hoy con las capacidades y mecanismos vinculados a los procesos de solicitud de permisos y autorizaciones ambientales requeridas para el desarrollo de proyectos relativos al hidrógeno verde y sus derivados. En el componente de Regulación se prevé trabajar en reforzar y potenciar estas capacidades en los aspectos específicos vinculados al hidrógeno, como, por ejemplo, la formulación de Guías ambientales y estudios vinculados al uso del agua.

Como herramienta para la implementación de la Hoja de Ruta, el Programa H2U ejecuta numerosas acciones tendientes a fortalecer el conocimiento y las capacidades nacionales en cuestiones ambientales y sociales. Se pueden mencionar las siguientes actividades ya realizadas o en curso de ejecución:

- **Evaluación ambiental asociada al desarrollo de la cadena de valor del hidrógeno verde y sus derivados en Uruguay** (GIZ, 2023). El objetivo del estudio es contar con información relevante sobre los principales impactos ambientales y los criterios para evaluarlos, asociados a la cadena de valor del hidrógeno verde y sus derivados en Uruguay, que aporte a la toma de decisiones estratégicas en el desarrollo de este sector respecto a la gestión ambiental y los criterios ambientales para la localización, y sea un insumo para la evaluación ambiental en el marco de las autorizaciones ambientales de los proyectos a implementarse. El resultado consistirá en un proposición de criterios y metodología para la evaluación ambiental y evaluación del riesgo respecto a la seguridad de los proyectos de hidrógeno verde y sus derivados, incluyendo lineamientos para el ordenamiento territorial, que sirvan de insumo para la elaboración de una Guía Ambiental y de Seguridad para este sector.
- **Análisis de la disponibilidad de CO₂ para la producción de derivados del hidrógeno verde en Uruguay** (GIZ, 2023). El estudio analiza la disponibilidad, respecto a cantidad y calidad, de CO₂ provenientes de fuentes fijas para abastecer la producción de derivados del hidrógeno verde en Uruguay. Se caracterizan las fuentes de CO₂ biogénico y no biogénico, discriminando este último entre evitable e inevitable, con impacto en la certificación de sostenibilidad. Se incluyen recomendaciones y conclusiones generales, que aportan insumos para una estrategia e instrumentos de promoción de la producción de derivados del hidrógeno

verde en Uruguay, identificando y analizando los requerimientos y barreras para el desarrollo de las alternativas planteadas.

- **Elaboración de estudios prospectivos de mercado laboral en la cadena de hidrógeno verde y derivados** (Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, 2024). El proyecto tiene como propósito realizar un diagnóstico estratégico y una investigación prospectiva para anticipar necesidades de empleo y formación, de modo de brindar herramientas para la planificación de la formación profesional en la cadena de valor del hidrógeno verde y derivados que sirva como insumo para la elaboración de políticas públicas de empleo y formación. Como resultado principal, se obtendrán recomendaciones de políticas activas de empleo.

• CertHiLAC

En el ámbito regional, la iniciativa CertHiLAC (BID, 2023) propone un sistema de certificación de sostenibilidad del hidrógeno común para los países adherentes de ALC. El 8 de noviembre de 2023, durante la Semana de la Energía de OLADE en Montevideo¹², 14 países de la región suscribieron la Declaración Conjunta para la Implementación del Hidrógeno Limpio y/o Sistema de Certificación de Bajas Emisiones en América Latina y el Caribe (Declaración CertHiLAC) para la implementación de un sistema regional de certificación de hidrógeno y sus derivados que cumpla con estándares internacionales y a la vez considere las características propias de ALC.

La propuesta pretende ser un sistema de armonización de los esquemas nacionales. El sistema es voluntario y está diseñado con una estructura flexible que incorpora representantes del sector público en su gobernanza.

Dentro del sistema, se propone dos categorías de certificación, cada una diseñada para cumplir con los requisitos o atributos específicos del mercado de destino:

- **Certificación de hidrógeno para ALC:** atiende a los mercados locales y regionales, así como a aquellos distintos a la UE.

¹². Los países suscriptores de la declaración son Argentina, Bolivia, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, Panamá, Paraguay, República Dominicana y Trinidad y Tobago.

- **Certificación de hidrógeno para el mercado europeo:** se basa en los requisitos de la primera e incluye también estándares o regulaciones adicionales que exige la UE.

En un escenario ideal, la gobernanza del sistema implicaría un único emisor de certificados, una base de datos y un operador del sistema a nivel regional, lo cual eliminaría la necesidad de entidades a nivel nacional. El representante del sistema sería una entidad supranacional con funciones de una autoridad responsable, encargada de delinear las reglas y requisitos que rigen la certificación, así como sus reglas de operación, con facultades para la toma de decisiones y ejecutor de cualquier cambio en el sistema. Su alcance se extendería a la selección y aprobación de los certificadores. Sin embargo, lograr una completa coordinación regional entre diversos países plantea importantes desafíos.

Por esa razón, CertHiLAC propone la existencia de diferentes entidades emisoras por país y una base de datos unificada y consolidada de registro regional, que agregaría datos de los diferentes organismos nacionales, siguiendo reglas estandarizadas. Según esta visión, este repositorio central garantizaría que las bases de datos nacionales sigan siendo consistentes y puedan integrarse, evitando discrepancias.

CertHiLAC aún está en fases iniciales y definiendo sus primeros pasos. Mientras tanto, implementar un sistema de certificación con un registro nacional es la llave que puede habilitar a cada país, no sólo para exportar sus productos al mundo, sino también para formar parte del Sistema de Certificación CertHiLAC, cuando finalmente se consolide en la región. Por el momento, esta alianza puede verse como un esfuerzo de los países de la región hacia la necesaria armonización de los distintos esquemas, en aras de facilitar el comercio internacional del hidrógeno.

En el esquema CertHiLAC se incluyen tres atributos básicos, comunes a otros sistemas de certificación, más otros que se consideran relevantes para la región, que se comparan en la siguiente tabla.

TABLA 17:
Sistema de Certificación de CertHiLAC

Atributo	Justificación	Categoría
• Información sobre fuentes de energía primaria y plantas de producción de energía • Información de la planta de producción de hidrógeno • Intensidad y alcance de la medición de GEI	Común a los sistemas	Sistema de certificación de hidrógeno regional en ALC (CertHiLAC)
• Impacto social positivo en las comunidades aledañas/ pueblos indígenas • Fuentes y uso sostenible del agua / tratamiento de aguas residuales (salmuera) • Medidas para minimizar el impacto ambiental • Cumplimiento de las normas laborales internacionales • Ubicación y uso sostenible de la tierra (excluir conflictos)	Altamente relevante para ALC	
• Tiempo de producción de hidrógeno respecto a energía eléctrica	Correlación temporal	
		Requerido por mercado europeo (Certificación de hidrógeno exportable)

Fuente: elaboración propia, a partir de BID

REGLAS ECONÓMICAS PARA SU DESARROLLO (FINANCIAMIENTO, FACILITACIÓN DE CREACIÓN DE MERCADOS, Y OTROS PUNTOS)

En general, las estrategias, hojas de ruta y planes de acción analizados presentan los lineamientos de las reglas económicas, sistemas de financiamiento y otras actuaciones y medidas, como facilitar el acceso al conocimiento tecnológico, que tienen por objetivo la creación de un mercado local para el hidrógeno y sus derivados, a través del estímulo a la producción, la demanda y/o los proveedores de bienes y servicios para una futura cadena de valor. Todas ellas están dirigidas a mejorar la competitividad frente a los combustibles fósiles, iniciar el funcionamiento de un mercado y reducir diversos incertidumbres y riesgos.

Argentina

La propuesta de Planes de Acción mencionada organiza una agenda de trabajo para alcanzar las metas a 2030-2050 establecidas en la ENH. Entre las acciones identificadas, se incluyen las varias herramientas para facilitar la creación de mercados, referidas a desarrollo de proveedores y promoción de la demanda:

Desarrollo de proveedores:

1. Crear un registro de proveedores que contemple la demanda de cada eslabón de la cadena de valor y la oferta actual y potencial de los proveedores locales, generando así un mapeo integral de las necesidades del sector incluyendo los requerimientos de materiales y homologaciones necesarias.
2. Impulsar un esquema de capacitación y sensibilización junto con cámaras empresariales, sectoriales y regionales para dar a conocer las necesidades de la cadena de valor a los potenciales proveedores.

3. Generar incentivos para promover el desarrollo de proveedores y proyectos de I+D+i, haciendo foco en electrolizadores, equipos auxiliares y recipientes a presión.

Promover la demanda:

1. Sensibilizar e informar sobre mercados de carbono, ajuste de carbono en frontera, bonos, financiamiento climático y otros instrumentos financieros que se están construyendo a nivel global y la relación potencial con el desarrollo de la economía del hidrógeno.
2. Articular con áreas gubernamentales de turismo, defensa, transporte a nivel provincial y nacional para incentivar la carga de combustibles limpios en barcos y aviones, en particular los de turismo (cruceros) en puertos argentinos, como el turismo antártico.
3. Promocionar la descarbonización de la actividad minera a través de la utilización de hidrógeno de bajas emisiones.
4. Difundir las ventajas competitivas de Argentina para la economía del hidrógeno en ferias, misiones internacionales y otros espacios para generar acuerdos con países potencialmente demandantes de hidrógeno de bajas emisiones.

Brasil

El Programa Nacional de Hidrógeno PNH2 (Ministerio de Minas y Energía, 2021) tiene como objetivo fortalecer el mercado y la industria del hidrógeno como vector energético en Brasil. En cumplimiento de ese mandato, el Comité Gestor del PNH2 elaboró el Plan de Trabajo Trienal (2023-2025) con acciones orientadas a posicionar a Brasil como el mayor y más competitivo productor de hidrógeno de bajas emisiones de carbono de ALC hasta 2035.

Dentro del PNH2, es la Cámara Temática de Neo Industrialización, Mercado y Competitividad, coordinada por el Ministerio de Fomento, Industria, Comercio y Servicios (MDIC), la que actúa para desarrollar y consolidar el mercado del hidrógeno en Brasil y la inserción internacional del país sobre una base económicamente competitiva. En esta Cámara Temática se definieron los siguientes componentes:

- **Componente 1:** Cadena de valor del hidrógeno en Brasil: mapeo, potencialidades regionales e inserción del país en la cadena de valor internacional considerando la competitividad, en las diferentes rutas, en comparación con otros países.
- **Componente 2:** Rápida difusión de las demandas para la aplicación del hidrógeno y agregación de la demanda para la viabilidad de proyectos y tecnologías, reduciendo los costos de transacción.
- **Componente 3:** Aspectos e incentivos fiscales existentes, política de tributación internacional de las importaciones y necesidades y condiciones de financiación.
- **Componente 4:** Impactos de la fijación del precio del carbono y evaluación del efecto inductivo de las inversiones, incluidos los mecanismos de ajuste en frontera del carbono.
- **Componente 5:** Infraestructura existente para el transporte y almacenamiento de hidrógeno, incluso en mezcla con gas natural.

De las acciones previstas en el Plan Trienal asociadas a esta Cámara Temática se destacan las siguientes:

- **Estudio sobre el mapeo de la cadena productiva del hidrógeno en Brasil** (IPEA, 2022). Resultado de una Cooperación técnica del MDIC con el Banco Mundial para estudios sobre la cadena de valor del hidrógeno en Brasil, este estudio mapea las inversiones en el sector del hidrógeno, así como identifica las principales rutas de producción de hidrógeno en el país con un enfoque en el hidrógeno sostenible, obtenido a partir de fuentes de energía renovables o utilizando el proceso de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) para neutralizar las emisiones. Los resultados identificados indican que Brasil ya está recibiendo un gran volumen de inversión en proyectos de producción de hidrógeno, con énfasis en clústeres industriales costeros, que pueden apoyar la adaptación del uso de CCUS a las plantas de hidrógeno existentes y tienen una ubicación estratégica para la exportación.
- **Propuesta de ajustes al texto del Decreto 8.874/2016** (Presidencia de la República, 2016), presentada por el Ministerio de Minas y Energía al Ministerio de Hacienda. Regula las condiciones para la aprobación

de proyectos de inversión considerados prioritarios en materia de infraestructura o producción económica intensiva en investigación, desarrollo e innovación.

- **Aprobación de la propuesta del Plan de Inversiones de Brasil** (CIF, 2023) para el Programa de Integración de Energías Renovables de los Fondos de Inversión en el Clima (CIF-REI), basado en la iniciativa del Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Hacienda, permitiendo el acceso a recursos concesionales del orden de USD 35 millones para la instalación del *hub* de hidrógeno verde en el Puerto de Pecém, ubicado en Ceará.

Chile

De las 18 líneas de acción del Plan de Acción Hidrógeno Verde 2023-2030 (Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay, 2024a), la línea de acción 3 está dedicada a los mecanismos económicos y financieros de impulso a la industria. En ella se presentan las acciones e hitos conducentes a apoyar económica y financieramente a la industria del hidrógeno verde y sus derivados, en toda su cadena de valor, entre las que se destacan las siguientes:

- **Potenciar instrumentos de fomento de CORFO con foco en hidrógeno verde.** Se trata de enfocar algunos de los instrumentos ofrecidos por la Corporación de Fomento de la Producción CORFO para abordar los diversos desafíos de desarrollo tecnológico del hidrógeno verde en toda la cadena de valor. Se enumeran algunos de los numerosos instrumentos ya existentes, como los Programas Tecnológicos Estratégicos (PTEC), el Instrumento Capital Humano para la Innovación, el Instrumento Crea y Valida, el Instrumento Innova Alta Tecnología y el Instrumento Escalamiento, entre otros. Adicionalmente, se proyecta que CORFO realizará una convocatoria para entregar subsidio directo a iniciativas asociadas a la demanda de hidrógeno verde en Chile, con un componente de I+D en los proyectos.
- **Actualizar el instrumento Crédito Verde de CORFO a intermediarios financieros bancarios y no bancarios, para que permita financiar proyectos de hidrógeno verde.** El instrumento Crédito Verde entrega financiamiento a operaciones otorgadas por instituciones financieras

bancarias y no bancarias a empresas (mediante créditos o *leasing*), para inversiones destinadas a la construcción, operación y puesta en servicio de proyectos, iniciativas o medidas en el ámbito de la sustentabilidad. Actualmente, a través de este instrumento es posible financiar proyectos de energías renovables, electromovilidad, eficiencia energética, cambio climático, almacenamiento y economía circular. Este crédito estará disponible para financiar, adicionalmente, proyectos de hidrógeno verde y derivados.

- **Implementar una facilidad de financiamiento (Facility) de proyectos de hidrógeno verde y su cadena de valor, con respaldo estatal y apoyo de bancos multilaterales.** A través de CORFO se habilitará una *Facility* que permita catalizar inversión privada principalmente mediante el respaldo del Estado para la disminución y mitigación de riesgos financieros de los proyectos que postulen y cumplan con ciertos requisitos técnicos, económicos, medioambientales y sociales. Este instrumento permitirá financiar proyectos en distintas etapas de desarrollo, con foco en la producción de hidrógeno verde (incluyendo la generación eléctrica renovable y producción de derivados), en la demanda por hidrógeno verde y en la adquisición de “partes y piezas” para hidrógeno verde (como, por ejemplo, aspas y torres eólicas, paneles solares, electrolizadores, etc.). La *Facility* tendrá un tamaño inicial de alrededor de USD 1.000 millones, en gran parte financiado por bancos de desarrollo internacionales (BID, Banco Mundial, KfW y BEI, CAF, entre otros), además de recursos propios de CORFO. La preparación de esta plataforma se encuentra en desarrollo, incluyendo la definición de estándares exigibles a los proyectos postulantes. Su lanzamiento fue anunciado por el Gobierno (CORFO, 2023) en junio de 2023 y se espera que se encuentre operativa a partir del segundo semestre de 2024 para el financiamiento a partir de 2025.
- **Medidas tributarias.** Se prevé una serie de medidas de impulso a través de nuevas herramientas fiscales o modificación de las existentes:
 1. Crear un fondo para créditos tributarios para inversiones con elevado efecto multiplicador, incluyendo la dimensión “verde”. Se creará un incentivo tributario al que podrán optar empresas que desarrollen proyectos de inversión productiva que promuevan la transferencia y desarrollo de las nuevas tecnologías y/o la descarbonización de la

matriz productiva, como electromovilidad, desarrollo de la industria de energías renovables e hidrógeno verde.

2. Implementar una tasa de desarrollo para la inversión, para que las empresas puedan reducir el impuesto a la renta mediante inversiones que incrementen la productividad de las empresas. Se prevé reducir el impuesto a la renta al 25% y establecer un impuesto de 2% a las empresas en el régimen general de tributación, que podrá deducirse mediante inversiones que incrementen la productividad de las empresas, como adquisición de equipamiento de alta tecnología.
3. Crear un Incentivo tributario a la Investigación y Desarrollo, a través de un fortalecimiento de la Ley 20.241 (Congreso Nacional, 2008) (Ley I+D), que establece un incentivo tributario a la inversión privada en investigación y desarrollo. Consiste en un crédito tributario hasta un máximo de 35% contra el impuesto a la renta sobre monto invertido en I+D. Se fortalecerá la ley de I+D, elevando a 50% el monto de crédito para ciertos proyectos coherentes con un desarrollo sostenible, como los de hidrógeno verde y sus derivados.

Colombia

Uno de los Ejes de Actuación de la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia está dedicado a instrumentos de desarrollo de mercado. Se los define como mecanismos y herramientas destinados a incentivar la transición desde las soluciones convencionales basadas en combustibles fósiles a las tecnologías limpias de hidrógeno, fomentando tanto la producción como el consumo de hidrógeno de bajas emisiones. En el mapa de actuación, se destacan las siguientes líneas de acción relacionadas con la financiación y la creación de mercados:

- **Línea de acción 13: Establecer mecanismos de financiación para proyectos de hidrógeno de bajas emisiones.**
 1. **Diseñar nuevos instrumentos de financiación público-privada.** Se considera esencial desarrollar nuevos mecanismos de financiación que aceleren el despliegue de las tecnologías del hidrógeno y que se ajusten en cada momento a los avances que ocurran en los próximos

años con el hidrógeno a nivel técnico, social, económico y ambiental, entre otros. Además de los fondos del FENOGE y los incentivos tributarios vigentes, se evaluarán otros instrumentos como préstamos de bajo interés, emisión de bonos verdes por parte de las empresas nacionales o rondas de financiamiento público exclusivo para proyectos de hidrógeno de bajas emisiones. Este financiamiento buscará apoyar a empresas y consorcios nacionales e internacionales para el desarrollo de proyectos en el país. Además de los mecanismos existentes, la Ley 2099 autoriza al Gobierno Nacional a financiar, con aportes del Presupuesto General de la Nación y el Sistema General de Regalías, la participación de las entidades territoriales en los proyectos de generación, distribución y comercialización de FNCER, entre las cuales se incluye el hidrógeno verde.

2. Atraer financiación internacional. La cooperación internacional es considerada una herramienta fundamental para incentivar la inversión en proyectos de hidrógeno en Colombia. Por este motivo, se promoverá la creación de consorcios formados por empresas nacionales y extranjeras. Se aprovecharán las oportunidades otorgadas por instituciones y programas multilaterales e internacionales. Se considera crucial apalancarse en estas instituciones e iniciativas para poder desarrollar los estudios y proyectos piloto de hidrógeno que se requieren a nivel nacional. La cooperación internacional se apoyará en instituciones nacionales como el Ministerio de Relaciones Exteriores, la Agencia Presidencial de Cooperación Internacional de Colombia y ProColombia, para poner en valor la red de acuerdos comerciales de Colombia y establecer colaboraciones con embajadas y gobiernos en otros países.

• **Línea de Acción 14: Impulsar el consumo de hidrógeno de bajas emisiones y sus derivados en los sectores industrial, transporte y edificios.**

1. Fomentar el consumo de hidrógeno de bajas emisiones y sus derivados mediante la realización de planes de penetración en la industria. Se espera que el mercado del hidrógeno se dirigirá fundamentalmente hacia aquellos sectores donde no existan otras alternativas para la descarbonización. Con foco en estos sectores, se

La cooperación internacional es considerada una herramienta fundamental para incentivar la inversión en proyectos de hidrógeno en Colombia. Por este motivo, se promoverá la creación de consorcios formados por empresas nacionales y extranjeras.

llevarán a cabo mesas técnicas con asociaciones, representantes del sector privado y ministerios, especialmente el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo y el Ministerio de Transporte, a fin de evaluar el establecimiento de objetivos de penetración de hidrógeno de bajas emisiones en algunos sectores industriales. Estas metas de uso de hidrógeno de bajas emisiones irán acompañadas de mecanismos de apoyo que faciliten la inversión privada, protegiendo en todo momento la competitividad industrial del país.

2. Realizar planes de penetración de hidrógeno de bajas emisiones y sus derivados en el transporte terrestre, marítimo y aéreo.

En lo relativo al transporte terrestre, el hidrógeno contribuirá a la Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible de Colombia. Se prevé la participación de los gobiernos locales que, a través de la renovación de las flotas de transporte público, pueden impulsar la adopción del hidrógeno y el despliegue de la necesaria infraestructura de recarga. Además, se evaluará la incorporación de otros incentivos a la demanda de hidrógeno en el transporte como una disminución en las tasas impositivas o subvenciones en la adquisición de vehículos de hidrógeno. En el transporte aéreo, fluvial y marítimo se plantea una posible coordinación con entidades y reguladores internacionales como la Organización Marítima Internacional (IMO) o la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) para realizar un plan de descarbonización de estos sectores a nivel nacional.

Costa Rica

La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Costa Rica 2022–2050 propone líneas de acción prioritarias para alcanzar los objetivos de cada uno de los tres Ejes estratégicos y las condiciones habilitantes que son los pilares de la Estrategia. Varias de esas líneas de acción están expresamente orientadas al financiamiento y a la creación de mercado, según se describe a continuación:

- **Eje Estratégico 1: Descarbonización del sector transporte e industria.**
Línea de Acción 1.1. Financiamiento e inversión extranjera. Contempla las siguientes acciones concretas, a ser desarrolladas a lo largo de las tres fases de implementación previstas:
 1. Crear instrumentos que permitan a la banca nacional el financiamiento de proyectos de hidrógeno verde. El Sistema Financiero Nacional no considera al hidrógeno dentro de su portafolio de proyectos sujetos de financiación. Con esta acción se busca habilitar a esta tecnología como susceptible de financiamiento público, a través de mecanismos preferentes que permitan a los desarrolladores tener menores costos de financiamiento, a la vez que permitan a la banca pública tener certeza y bajos riesgos sobre las inversiones.
 2. Solicitar acceso a fondos climáticos que permitan establecer líneas de crédito con condiciones atractivas para el hidrógeno en el país. Aunque Costa Rica no sujetó el cumplimiento de sus CDN a la aprobación de financiamiento climático internacional, se reconoce que el apoyo es de vital importancia. Siendo el hidrógeno un potencial vector de descarbonización, esta iniciativa plantea acceder al financiamiento internacional para desarrollar proyectos de hidrógeno en el país, incluidas las etapas tempranas, como los estudios de factibilidad.
 3. Crear mecanismos de inversión extranjera en Costa Rica específicos para proyectos de la cadena de valor del hidrógeno verde. Esta acción está relacionada con las iniciativas de vinculación con actores internacionales del hidrógeno. Su objetivo es atraer inversión extranjera a Costa Rica, tanto para el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde, como para asentar compañías dedicadas a la fabricación de equipos en la cadena de valor.

4. Promover tasas de interés preferenciales y mayores plazos de financiamiento para el desarrollo de proyectos de hidrógeno. El objetivo de esta acción es lograr bajos costos de financiamiento a través de tasas de interés preferenciales y periodos de pago mayores que permitan al desarrollador de proyectos pagar el crédito de manera más fácil. Los actores relevantes en esta acción son los bancos públicos y privados, así como otras entidades financieras, como las responsables de emitir fianzas y seguros. Para que estos entes puedan emitir crédito de bajo costo, el gobierno, a través de sus ministerios, construirá un ecosistema de certidumbre y confianza para el hidrógeno verde en el país.
 5. Agilizar la gestión de créditos y eliminación de burocracia en el proceso. Esta acción tiene como objetivo la reducción de plazos para la obtención de créditos y financiamiento para proyectos de hidrógeno verde. Esto contribuye a la reducción de tiempos de ejecución del proyecto en general y permite que el hidrógeno esté disponible en un menor plazo como energético y materia prima renovable en el país. Serán los bancos públicos, bancos privados e instituciones reguladoras del sistema bancario en Costa Rica quienes desarrollen mejoras a los mecanismos actuales de gestión de créditos, o incluso nuevos mecanismos.
- **Condiciones habilitantes: Línea de acción H2. Incentivos.** Los incentivos están previstos como una herramienta de corto plazo para activar el mercado del hidrógeno, a través de las siguientes acciones:
 1. Desarrollar un estudio de identificación y evaluación de posibles incentivos fiscales para el desarrollo de proyectos a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno.
 2. Los paquetes de incentivos fiscales deben contar con estudios suficientes para determinar si con ellos se logra la efectiva promoción de la actividad. Esta valoración puede realizarse vía análisis de impacto normativo y de costo–beneficio que permitan justificar la aplicación de los mismos para el apoyo a la introducción del hidrógeno verde en el país.
 3. Promover un marco jurídico para desarrollar nuevos esquemas de generación y aprovechamiento de la electricidad en Costa Rica, para lograr precios competitivos de energía renovable para la producción de hidrógeno y otros usos. Se hace indispensable proveer mecanismos que apoyen el despliegue de proyectos de generación eléctrica

- renovable dedicados a la producción de hidrógeno. Se ha identificado que la promoción a las fuentes de energía renovable demandará cambios en el marco jurídico del sector energético y eléctrico del país. Estos cambios deberán promover nuevos esquemas de generación de electricidad, así como mecanismos de consumo flexibles que permitan complementar las capacidades de la red eléctrica con la capacidad de las nuevas plantas, proveyendo reglas claras para promover precios de energía competitivos.
4. Apoyar la reducción o eliminación de subsidios a los combustibles fósiles. En Costa Rica se tiene aún una alta dependencia de los hidrocarburos y los subsidios son un estímulo para el desarrollo de actividades industriales y residenciales, por lo que su supresión no podría ser una acción inmediata, ya que impactaría a sectores clave de la población. El proceso de eliminación de subsidios debe responder a una gestión articulada industria–gobierno que permita su sustitución paulatina, hasta que los nuevos energéticos sean un sustituto económicamente viable. En esta línea, se deben realizar los estudios correspondientes que permitan trazar la ruta hacia una eliminación de los subsidios en un plazo razonable, así como analizar las opciones para hacer frente a los impactos negativos que pudieran producirse por la reducción de subsidios a los combustibles fósiles.
5. Habilitar estímulos fiscales y no fiscales para el uso del hidrógeno, especialmente, en el transporte pesado. Debe establecerse una serie inicial de incentivos fiscales y no fiscales a la cadena de valor de hidrógeno verde, incluido el uso final en actividades como el transporte. En esta misma línea, la Ley de Incentivos y promoción para el transporte eléctrico N° 9518 del 25 de enero del 2018 también incorpora incentivos para el transporte cero emisiones. Ahora bien, conforme avance la implementación del hidrógeno verde, cabe el replanteamiento de nuevos incentivos o facilidades por medio del Plan Nacional de Transporte Eléctrico, de manera que se apliquen nuevos estímulos al proceso de conversión en materia de transporte.

En la Tabla 18, se resumen estas acciones descritas y se identifican a los actores responsables, tanto en el Eje Estratégico 1 como en las condiciones habilitantes referidas a incentivos.

TABLA 18:
Acciones para el financiamiento y la creación de mercados en la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Costa Rica

1.1 Línea de acción: Financiamiento e inversión extranjera

Acción No.	Descripción	Responsable(s)	Otros actores involucrados
1.1.1	Crear instrumentos que permitan a la banca nacional el financiamiento de proyectos de hidrógeno verde.	Bancos públicos de Costa Rica	Ministerio de Hacienda MINAE
1.1.2	Solicitar acceso a fondos climáticos que permitan establecer líneas de crédito con condiciones atractivas para el hidrógeno en Costa Rica	MINAE	Otros ministerios del Gobierno de Costa Rica
1.1.3	Fomentar programas de inversión en hidrógeno y desarrollar programas o talleres de apoyo a la elaboración de proyectos que sean bancables.	MINAE	PROCOMER
1.1.4	Crear mecanismos de inversión extranjera en Costa Rica específicos para proyectos vinculados a la cadena de valor del hidrógeno verde	PROCOMER CINDE	MINAE

H.2 Línea de acción: Incentivos

Acción No.	Descripción	Responsable(s)	Otros actores involucrados
H.2.1	Desarrollar un estudio de identificación y evaluación de posibles incentivos fiscales para el desarrollo de proyectos a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno.	MINAE Ministerio de Hacienda	---
H.2.2	Promover un Marco jurídico para desarrollar nuevos esquemas de generación y aprovechamiento de la electricidad en Costa Rica para lograr precios competitivos de energía renovable para la producción de hidrógeno y otros usos carbonizantes.	MINAE	---
H.2.3	Apoyar la estrategia del Plan de Energía para la reducción o eliminación de subsidios a los combustibles fósiles.	MINAE Ministerio de Hacienda	---
H.2.4	Habilitar estímulo fiscales y no fiscales para el uso del hidrógeno, especialmente en el transporte pesado.	MINAE (DE) Ministerio de Hacienda	MOPT

Fuente: Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Costa Rica

Trinidad y Tobago

La Hoja de Ruta para una Economía de Hidrógeno Verde en Trinidad y Tobago identifica como un facilitador clave las políticas de incentivo a la inversión en energía renovable e hidrógeno verde. Se trata de construir el entorno empresarial adecuado en Trinidad y Tobago a través de políticas y de un marco regulatorio que construya, facilite y promueva un entorno atractivo para la inversión extranjera a través de incentivos fiscales, subsidios, períodos de moratoria fiscal, subvenciones gubernamentales y menores impuestos sobre los beneficios (facilidad para hacer negocios). Esto también incluye la creación de mecanismos de financiamiento para promover el desarrollo de proyectos de energías renovables e hidrógeno verde y facilitar el acceso a fondos internacionales.

En la propuesta de esta Hoja de Ruta, los próximos pasos inmediatos consisten en un enfoque de dos vías que están estrechamente interrelacionadas: asegurar la financiación y lanzar proyectos de demostración en el país. Para eso, se explorarán fuentes de financiación como la financiación climática, los mercados de carbono, el sector privado y la financiación nacional mediante la creación de mecanismos de financiación que promuevan los proyectos de energía renovable e hidrógeno verde. Se planificarán e implementarán proyectos de demostración en los que se pruebe el uso final del hidrógeno verde en la industria petroquímica existente a través de la producción de amoníaco verde y metanol, en el sector del transporte a través del transporte público y en la fabricación de cemento.

Se considera que el sector privado tiene un papel importante que desempeñar a través de asociaciones con el Gobierno de Trinidad y Tobago para ejecutar estos proyectos de demostración. Se prevé que se pondrá en marcha un proceso competitivo para seleccionar potenciales socios del sector privado para los proyectos de demostración.

Uruguay

La Hoja de Ruta del hidrógeno verde y derivados en Uruguay se apoya en el Programa H2U, como herramienta para la construcción de una política de Estado en torno al hidrógeno. En su eje de trabajo sobre la atracción de inversiones se evalúa que los proyectos de hidrógeno verde y derivados generarán inversiones e innovación que podrán ser motor del desarrollo local en todo el territorio.

Se tendrán en cuenta temas claves para el desarrollo del hidrógeno verde y derivados, tanto para consumo local como con destino a la exportación, en particular aquellos vinculados con la creación de incentivos y otros mecanismos que promuevan el agregado de valor local.

En este eje estratégico de inversiones también se considera que el impulso del hidrógeno y derivados, tanto para el mercado local como para exportación, requiere de la mayor articulación y cooperación entre países. Por lo tanto, las alianzas con países con perfil importador de hidrógeno y derivados permitirán contar con apoyo para el abordaje de los aspectos regulatorios y la generación de talento, así como en facilitar inversiones.

Por otra parte, se considera de relevancia buscar cooperación regional que impulse sinergias entre países y armonice los requisitos que surjan a nivel internacional. Algunos países ya han presentado sus hojas de ruta, como Chile, Colombia, Costa Rica, Brasil y Argentina. Tomará especial relevancia coordinar regionalmente los aspectos de certificación, de forma de armonizar los sistemas según las posibilidades de cada uno de los países como de los mercados de exportación.

ESQUEMAS DE APOYO AL DESARROLLO DE LA INDUSTRIA Y LA INNOVACIÓN

A continuación, se describen una serie de mecanismos existentes o propuestos en distintos países de la región para abordar y mitigar las barreras de acceso a recursos financieros por parte de proyectos, con especial énfasis en la innovación, tales como subvenciones o exenciones fiscales, otros incentivos a la inversión u operación de proyectos, instrumentos de fomento a I+D, líneas de financiamiento o asesorías de apoyo a los proyectos. Los mecanismos pueden ser muy diferentes, como las convocatorias para financiar I+D+i, el apoyo a proveedores locales, el desarrollo de proyectos piloto y demostrativos, el logro de economías de escala o la mitigación de riesgos.

● Argentina

A través de los artículos 164 a 228 del Título VII –Régimen de Incentivo para Grandes Inversiones (RIGI)- de la Ley N° 27.742 (Senado y Cámara de Diputados de la Nación Argentina, 2024), del 27 de junio de 2024, se creó un régimen promocional por el que se establecen ciertos incentivos, estabilidad, seguridad jurídica y un sistema eficiente de protección de derechos adquiridos para los titulares de un único proyecto que cumplan con ciertos requisitos previstos. El 23 de agosto se publicó el Decreto 749/2024 (Presidencia de la Nación, 2024), que aprueba la reglamentación del RIGI.

El objetivo del RIGI es atraer inversiones a sectores estratégicos de la economía argentina, considerados fundamentales para el crecimiento a largo plazo y la competitividad internacional. Los proyectos de producción de hidrógeno quedan comprendidos en su ámbito, como producción de energía baja en carbono.

Para ser elegibles dentro del régimen, las inversiones propuestas deben alcanzar un monto mínimo de inversión en activos, que varía según el sector. En el sector de la energía, el monto mínimo es USD 200 millones.

El RIGI ofrece incentivos fiscales, como la reducción del Impuesto a las Ganancias al 25%, la amortización acelerada de los bienes muebles e infraestructura que se adquieran para el proyecto, la devolución de saldos a favor del Impuesto al Valor Agregado (IVA) en un plazo máximo de tres meses y la opción de computar el 100% del Impuesto sobre Débitos y Créditos Bancarios como crédito en el impuesto a las ganancias. También existen beneficios aduaneros, ya que las empresas adheridas al RIGI estarán exentas del pago de derechos de importación por bienes de capital, repuestos, partes e insumos necesarios para el proyecto.

El régimen también contempla incentivos cambiarios, como la exención parcial de la obligación de liquidar las divisas generadas por exportaciones en el mercado de cambios que rige en Argentina. Durante los primeros dos años de iniciada la inversión, las empresas sólo estarán obligadas a liquidar el 20% de las divisas. Este porcentaje aumentará al 40% en el tercer año y llegará al 100% en el cuarto año.

Para acceder y mantenerse en el régimen, el inversor debe cumplir con ciertos requisitos. En primer lugar, asume el compromiso de que se contratará a proveedores locales para la provisión de bienes y obras en un porcentaje

El régimen también contempla incentivos cambiarios, como la exención parcial de la obligación de liquidar las divisas generadas por exportaciones en el mercado de cambios que rige en Argentina. Durante los primeros dos años de iniciada la inversión, las empresas sólo estarán obligadas a liquidar el 20% de las divisas. Este porcentaje aumentará al 40% en el tercer año y llegará al 100% en el cuarto año.

equivalente, como mínimo, al 20% de la totalidad del monto de inversión destinado al pago de proveedores de bienes y obras correspondientes al proyecto, siempre y cuando haya oferta disponible de proveedores locales. Asimismo, deberá completar al menos el 40% del monto mínimo de inversión en activos dentro de los dos primeros años desde la aprobación de su solicitud de adhesión al régimen, cumpliendo con los cronogramas de inversión establecidos en su plan original. El incumplimiento de estos requisitos lleva al cese de los beneficios, pero sin efectos retroactivos, lo que significa que las empresas no tendrán que devolver los incentivos ya recibidos.

Por otra parte, en mayo de 2023 el Poder Ejecutivo Nacional elevó al Congreso de la Nación el proyecto de ley de Promoción del Hidrógeno de Bajas Emisiones de Carbono y Otros Gases de Efecto Invernadero, que está en trámite legislativo. El proyecto incentiva la producción de hidrógeno verde, azul y rosa, planteando la necesidad de que el sector sea transversal al resto de la economía, complementario al desarrollo del Gas Natural Licuado (GNL) y al sector minero y promotor de la industria nacional.

El texto propone un régimen de promoción fiscal y de exportación diferencial que premia al hidrógeno verde. Para acceder al régimen, los proyectos de producción deberán cumplir con el 35% de contenido nacional, incluyendo electrolizadores

y parques de generación de electricidad de fuentes renovables, a partir de la entrada en vigor de la ley y hasta el quinto año inclusive. Se creará un Fondo Nacional de Desarrollo Productivo (FONDEP) para financiar a proveedores de bienes y servicios de alto contenido tecnológico que integran la cadena de valor del hidrógeno. Este fondo específico estará constituido por un aporte equivalente al 0,5% del monto de la inversión declarada por las empresas al inscribirse al régimen de promoción fiscal que brinda la ley.

Las Secretarías de Energía y de Industria y Desarrollo Productivo, la Agencia Nacional de Hidrógeno y el Consejo Federal del Hidrógeno serían autoridades con competencia para regir los temas que se encuentran bajo el ámbito de aplicación de la ley.

● Brasil

Entre los instrumentos de la Política Nacional de Hidrógeno Bajo en Carbono, establecidos por la Ley 14.948, se incluyen los siguientes instrumentos clave.

Régimen Especial de Incentivos a la Producción de Hidrógeno Bajo en Emisiones de Carbono (Rehidro). La finalidad de Rehidro es fomentar el desarrollo tecnológico e industrial, la competitividad y la agregación de valor en las cadenas productivas nacionales a través de beneficios fiscales. Instituido de manera general en la ley 14.948, se encomienda al Poder Ejecutivo la reglamentación de detalle, que deberá establecer las metas y objetivos a alcanzar mediante el otorgamiento de los incentivos de Rehidro y designar un órgano de administración encargado de supervisar y evaluar el beneficio tributario en relación con el logro de las metas y objetivos establecidos. Los requisitos mínimos para la calificación a los beneficios de Rehidro son contar con un porcentaje mínimo de utilización de bienes y servicios de origen nacional en el proceso productivo y realizar inversión mínima en investigación, desarrollo e innovación. Los incentivos fiscales para los beneficiarios de Rehidro tendrán una vigencia de cinco años, contados a partir del 1 de enero de 2025. Podrán ser beneficiarios las personas jurídicas que realicen actividades de producción, almacenamiento, transporte, distribución o comercialización de hidrógeno bajo en carbono, generación de energía eléctrica renovable para la producción de

hidrógeno bajo en carbono o producción de biocombustibles (etanol, biogás o biometano) para la producción de hidrógeno bajo en carbono.

Programa de Desarrollo de Hidrógeno Bajo en Emisiones de Carbono

(PHBC). La Ley 14.990 (Presidencia de la República, 2024), publicada el 30 de septiembre de 2024, oficializa el Programa de Desarrollo de Hidrógeno Bajo en Emisiones de Carbono (PHBC), creado con el fin de constituir una fuente de recursos para la transición energética desde el uso del hidrógeno bajo en carbono. Bajo el PHBE, se aplican incentivos para el uso de hidrógeno bajo en carbono en sectores industriales difíciles de descarbonizar, como fertilizantes, acero, cemento, productos químicos y petroquímicos. El programa también tiene como objetivo promover el uso de hidrógeno bajo en carbono en el transporte pesado. El PHBC prevé el otorgamiento de créditos fiscales en la comercialización de hidrógeno bajo en carbono y sus derivados producidos en el territorio nacional. Son elegibles los proyectos que cumplan con al menos uno de los siguientes requisitos: contribución al desarrollo regional, contribución a las medidas de mitigación y adaptación al cambio climático, estímulo del desarrollo tecnológico y de la difusión o contribución a la diversificación del parque industrial brasileño. Entre 2028 y 2032, los créditos fiscales se limitarán a ciertos montos globales para cada año calendario. En 2028, será de R\$ 1,7 mil millones y, a partir de entonces, los recursos se modificarán al alza cada año, hasta llegar a R\$ 5 mil millones en 2032. Para el ámbito específico de apoyo a la innovación, dentro del Programa Nacional del Hidrógeno (PNH2) se establece la Cámara Temática de Fortalecimiento de las Bases Científico-Tecnológicas, coordinada por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MCTI), que tiene como objetivo apoyar la investigación, el desarrollo tecnológico, la innovación y el emprendimiento en la producción, almacenamiento, transporte, seguridad, uso y aplicaciones del hidrógeno. Los objetivos específicos de esta Cámara Temática son:

1. Consolidar la Iniciativa Brasileña del Hidrógeno (IBH2) como módulo de desarrollo científico-tecnológico del Programa Nacional de Hidrógeno (PNH2) para 2025.
2. Estructurar el Sistema Brasileño de Laboratorios de Hidrógeno (SisH2-MCTI) para 2024.
3. Consolidar un Foro Nacional de Discusión sobre ciencia, tecnología e innovación (CT&I) en hidrógeno para 2025.

En esta Cámara Temática se definieron los siguientes componentes:

- **Componente 1:** Investigación, desarrollo e innovación.
- **Componente 2:** Fortalecimiento de la infraestructura para la investigación, el desarrollo y la innovación.
- **Componente 3:** Incentivo al emprendimiento.
- **Componente 4:** Proyectos de cooperación y redes de investigación, desarrollo e innovación.
- **Componente 5:** Estudios, diagnósticos y difusión científico-tecnológica.

En la ejecución de las acciones previstas dentro del Plan de Trabajo Trienal (2023-2025), esta Cámara Temática llevó a cabo actividades como las siguientes:

- Apertura de la convocatoria pública de I+D+i en apoyo al Programa Combustible del Futuro y la Iniciativa Brasileña de Hidrógeno (IBH2 MCTI) (Ministerio de ciencia, tecnología e innovación, 2022): 23 propuestas aprobadas en la Línea 4 Hidrógeno Sostenible, por un total de R\$ 15,8 millones.
- Apertura de la selección pública de la FINEP MCTI Combustible del Futuro e Hidrógeno: dos propuestas aprobadas en la Línea Temática III Desarrollo de tecnologías nacionales para la producción, almacenamiento y uso de hidrógeno sostenible en el sector del transporte, por un total de R\$ 14,9 millones.
- Estructuración de la convocatoria pública de apoyo al Sistema Brasileño de Laboratorios de Hidrógeno (SisH2-MCTI): 13 proyectos seleccionados, por un total de R\$ 33 millones.
- Promoción de startups y el proceso de innovación abierta en hidrógeno en el ámbito del Programa de Innovación en Hidrógeno Verde (AEVO, 2024).

Como propuesta de mecanismo de apoyo que está en trámite legislativo, se puede mencionar el Proyecto de Ley N° 725/2022 (Senado Federal, 2022), que incluye el hidrógeno como fuente de energía en la matriz brasileña y establece metas de inserción en los gasoductos nacionales. Según esta propuesta, la adición de hidrógeno en el punto de entrega o punto de salida en los gasoductos de transporte seguirá porcentajes mínimos obligatorios en volumen, en una progresión de 5%, a partir del 1 de enero de 2032 y 10%, a partir del 1 de enero

de 2050. Ese volumen deberá contener una proporción obligatoria de hidrógeno sostenible de al menos el 60% en el primer caso y de al menos el 80%, en el segundo caso.

Chile

La línea de acción 17 del citado Plan de Acción Hidrógeno Verde 2023-2030 está dedicada al impulso de investigación, desarrollo e innovación, presentando las acciones e hitos de apoyo a I+D+i para la industria del hidrógeno verde y derivados, en toda su cadena de valor. Se destacan las siguientes:

- **Análisis de desafíos de I+D en proyectos de hidrógeno verde para complementar la Ley 20.241 (Ley I+D) y otros instrumentos asociados.** El objetivo es identificar las principales brechas y oportunidades de investigación y desarrollo científico-tecnológico del hidrógeno verde en Chile a través de la formación de una mesa de trabajo entre el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, CORFO, el Ministerio de Energía, el Ministerio de Economía, Fomento y Turismo y la academia, con la participación del sector privado. Esta iniciativa conducirá a elaboración de hojas de ruta y guías de líneas de trabajo que orienten y fomenten la I+D+i en las áreas de mayor impacto o necesidad para la industria del hidrógeno verde.
- **Desarrollo de concursos de I+D+i por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) respecto de aplicaciones de producción, transporte, almacenamiento y consumo de hidrógeno verde y derivados.** El objetivo es apoyar financieramente la ejecución de proyectos de investigación aplicada científica y tecnológica, con potencial impacto económico y social, especialmente con énfasis en hidrógeno verde, para lo cual se dispone de los concursos del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF).
- **Impulso del desarrollo tecnológico especializado a través de Centros de Desarrollo Tecnológico de Hidrógeno Verde.** Se busca fortalecer la capacidad de desarrollar y gestionar la innovación tecnológica de hidrógeno verde, orientada a la generación de información técnica y económica local, a la transferencia de conocimiento y tecnología a niveles interinstitucionales

y en el ecosistema nacional e internacional. Se prevé la implementación de dos centros de desarrollo tecnológico, ya en curso de ejecución:

4. Centro de Desarrollo Tecnológico y Coordinación Interinstitucional de Hidrógeno Verde para la Industria Marítima y Naval (Armada de Chile, 2024), llevado a cabo por la Armada de Chile para el desarrollo tecnológico de la Industria Naval y Marítima.
5. Centro de Desarrollo Tecnológico de Magallanes (CORFO, 2024), correspondiente a una de las iniciativas priorizadas levantadas a partir del trabajo realizado por el programa Transforma Magallanes, que lleva adelante CORFO.

Colombia

Los principales instrumentos de apoyo y promoción al hidrógeno verde surgen de la aplicación de la citada Ley 1715 de 2014, que regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. En ella, se definen las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) como aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente.

En la redacción original de la norma, se consideran como FNCER la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la energía eólica, la geotérmica, la energía solar y las fuentes energéticas provenientes de los mares. Las FNCER pueden acceder a beneficios tributarios como deducción hasta 50% de impuesto sobre la renta, exclusión de bienes y servicios del IVA, exenciones arancelarias y depreciación acelerada.

La también citada Ley 2099 de 2021 adicionó los numerales 23 y 24 al artículo 5 de la Ley 1715 de 2014, con el fin de integrar los conceptos de hidrógeno verde e hidrógeno azul al marco normativo de las FNCER.

El Artículo 10 de la Ley 1715, con las modificaciones de la ley 2099, crea el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOG), como un patrimonio autónomo que será administrado a través de un contrato de fiducia mercantil que deberá ser celebrado por el Ministerio de Minas y Energía.

El objeto del FENOG será promover, ejecutar y financiar planes, programas y proyectos de FNCE, principalmente aquellas de carácter renovable, y Gestión Eficiente de la Energía.

Por Resolución N° 40045 (Ministerio de Energía y Minas, 2022), el Ministerio de Minas y Energía expidió el Manual Operativo del FENOG, en el cual se reglamentan su estructura organizacional y sus funciones.

Se autoriza al Gobierno Nacional a financiar con aportes del Presupuesto General de la Nación y el Sistema General de Regalías la participación de las entidades territoriales en los proyectos de generación, distribución, comercialización y autogeneración a pequeña escala y generación distribuida con las siguientes FNCER: la biomasa, los aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar, el hidrógeno verde, los mares y el aprovechamiento energético de residuos, además de otras fuentes que podrán ser consideradas.

El FENOG puede financiar y ejecutar proyectos de producción, almacenamiento, acondicionamiento, distribución, re-electrificación y uso de hidrógeno verde, con sus recursos o a través de recursos otorgados por el Ministerio de Minas y Energía o cualquier otra entidad pública, privada o mixta, así como por organismos de carácter multilateral e internacional. Para el efecto, el FENOG puede celebrar en forma directa convenios con las entidades estatales de cualquier orden, para ejecutar los planes, programas y proyectos, así como los recursos destinados a la promoción y desarrollo de FNCE, hidrógeno y Gestión Eficiente de la Energía.

El artículo 21 de la Ley dispone la “promoción a la producción y uso del hidrógeno”, estipulando que el Gobierno nacional definirá los mecanismos, condiciones e incentivos para promover la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso de hidrógeno destinado a la prestación del servicio público de energía eléctrica, almacenamiento de energía, y descarbonización de sectores como el transporte, industria, hidrocarburos, entre otros.

Se dispone que serán aplicables al hidrógeno verde y azul las disposiciones de la Ley 1715 de 2014 y todos sus beneficios e incentivos tributarios, bajo los mismos requisitos y procedimientos. Así, las inversiones, los bienes, equipos y maquinaria destinados a la producción, almacenamiento, acondicionamiento, distribución,

re-electrificación, investigación y uso final del hidrógeno verde y azul gozan de los beneficios de deducción en el impuesto de renta, exclusión de IVA, exención de aranceles y depreciación acelerada establecidos en la Ley 1715 de 2014, para lo cual se debe solicitar certificación de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) dentro del Ministerio de Minas y Energía, como requisito previo.

La UPME elaboró la Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014 (UPME, s.f.), donde explica de manera detallada los alcances y los procedimientos para la solicitud y obtención de los beneficios que otorga la ley a los proyectos dentro de su ámbito de aplicación.

El artículo 23 dispone el “apoyo a la investigación, desarrollo e innovación”. Dentro de los seis meses siguientes a la entrada en vigor de la ley, el Gobierno nacional debe diseñar una política pública para promover la investigación y desarrollo local de tecnologías para la producción, almacenamiento, acondicionamiento, distribución, re-electrificación, usos energéticos y no energéticos del hidrógeno y otras tecnologías de bajas emisiones.

● Costa Rica

En Costa Rica, existe una propuesta de Ley para la promoción e implementación de una economía de hidrógeno verde en Costa Rica (Asamblea Legislativa, 2022), actualmente en trámite legislativo.

El propósito del proyecto es eliminar barreras y brindar los incentivos necesarios para desarrollar la industria del hidrógeno verde en el país, así también como las herramientas financieras de diferentes tipos como créditos en condiciones blandas, bonos verdes y cualquier otro instrumento que se ajuste a esos fines.

Se otorgarán incentivos para las actividades de producción y transformación, investigación, almacenamiento, transporte y uso final de hidrógeno verde, consistentes en una exoneración del impuesto sobre el valor agregado, el impuesto selectivo de consumo, el impuesto sobre el valor aduanero a las mercancías importadas, los derechos arancelarios a la importación. Estas exoneraciones serán aplicables sobre la importación y compra local de los bienes, equipos y maquinaria necesarios y vinculados en el desarrollo de las actividades de producción y transformación del hidrógeno verde. En el caso de

Se otorgarán incentivos para las actividades de producción y transformación, investigación, almacenamiento, transporte y uso final de hidrógeno verde, consistentes en una exoneración del impuesto sobre el valor agregado, el impuesto selectivo de consumo, el impuesto sobre el valor aduanero a las mercancías importadas, los derechos arancelarios a la importación.

las actividades de producción y transformación, las empresas gozarán, además, de una exoneración del impuesto sobre las utilidades según la Ley de Impuesto sobre la Renta.

Los incentivos serán aplicados por un periodo de 15 años a partir de la entrada en vigor de la ley y según porcentajes en una escala decreciente. Así, los que inicien las actividades en los primeros cinco años desde la entrada en vigor, gozarán de los incentivos con 100% por el plazo restante, los que inicien las actividades a partir del sexto año y hasta el décimo año gozarán de los incentivos con 75% por el plazo restante y, finalmente, los que inicien las actividades a partir del décimo primer año y hasta el décimo quinto, gozarán de los incentivos con 50% por el plazo restante.

● Perú

Desde el 23 de marzo de 2024, Perú cuenta con la Ley 31992 Ley de Fomento del Hidrógeno Verde (Presidencia de la República, 2024), que tiene por objeto fomentar la investigación, el desarrollo, la producción, la transformación, el almacenamiento, el acondicionamiento, el transporte, la distribución, la comercialización, la exportación y el uso del hidrógeno verde como combustible y

como vector energético, en sus diferentes aplicaciones, para el aprovechamiento y utilización en la matriz energética nacional.

A tal fin, se prevé que el Ministerio de Energía y Minas formule las políticas y los planes energéticos sectoriales para el desarrollo de la cadena de valor del hidrógeno verde, desde su producción hasta su uso final. Se incluye la facultad de otorgar beneficios económicos y tributarios para la investigación, la producción, la transformación, el transporte, la comercialización, la exportación y el uso del hidrógeno verde como combustible y como vector energético en sus diferentes aplicaciones.

En el ámbito de la investigación científica y tecnológica, el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (Concytec), a través del Programa Nacional de Investigación Científica y Estudios Avanzados (Prociencia), desarrollará acciones para fomentar la investigación científica y tecnológica destinada a generar los conocimientos necesarios para el aprovechamiento de los recursos energéticos renovables, enfatizando en el desarrollo, la producción, la transformación y la industrialización del hidrógeno verde como combustible y como vector energético en sus diferentes aplicaciones, y como insumo en procesos industriales, ya sea como hidrógeno o subproductos, tales como fertilizantes, líquidos orgánicos, metanol y otros. Se deberá fomentar el desarrollo de la ciencia y la tecnología en materia de energía del hidrógeno verde y la formación de recursos humanos altamente especializados para la investigación científica y tecnológica en los recursos energéticos renovables, enfatizando en el desarrollo, la producción, la transformación y la industrialización del hidrógeno verde, con la participación de las universidades.

En su ámbito de aplicación se incluye el hidrógeno verde, inicialmente definido como un vector energético producido con tecnologías de baja emisión de gases de efecto invernadero. Posteriormente, el 21 de agosto de 2024, esa definición fue modificada por el Decreto Legislativo N° 1629, de modo que el hidrógeno verde quedó definido como aquel obtenido del agua mediante procesos que utilizan como fuente de energía a los recursos renovables. En los considerandos se señala que se hace esta modificación con la finalidad de promover la inversión en la industria del hidrógeno verde generado a partir de recursos energéticos renovables.

Trinidad y Tobago

La Hoja de Ruta para una Economía de Hidrógeno Verde en Trinidad y Tobago identifica tres facilitadores clave de la economía del hidrógeno: las cadenas de suministro locales, el marco regulatorio y la infraestructura existente. Dentro del marco regulatorio, se hace hincapié en la necesidad de contar con políticas y normativa que construyan, faciliten y promuevan un entorno atractivo para la inversión extranjera a través de incentivos fiscales, subsidios, períodos de exenciones fiscales, subvenciones gubernamentales e impuestos a las ganancias más bajos, así como facilitando el camino de nuevos desarrolladores e inversionistas, aumentando la facilidad para hacer negocios. Esto también incluye la creación de mecanismos de financiación para impulsar el desarrollo de proyectos de energías renovables e hidrógeno verde y facilitar el acceso a fondos internacionales.

La Hoja de Ruta menciona que se están explorando los posibles programas y fuentes de financiación disponibles para apoyar la ejecución de los proyectos de demostración a ser llevados a cabo durante el Horizonte 1: mercados internacionales de carbono, fuentes que se centran en medidas de acción, inversión del sector privado y financiación nacional, como los fondos proporcionados por el Gobierno de Trinidad y Tobago.

Uruguay

En 2022, el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) y el Laboratorio Tecnológico Uruguayo (LATU) crearon el Fondo Sectorial de Hidrógeno Verde, con el objetivo de financiar proyectos de investigación, innovación y formación en esta temática.

En este marco, ese mismo año el Gobierno de Uruguay, a través de ANII, realizó un llamado abierto para desarrollar los primeros proyectos piloto de hidrógeno verde y derivados (Agencia nacional de investigación e innovación, 2022). Mediante esta convocatoria, se ofrece financiamiento y apoyo a la producción y uso de hidrógeno verde y sus derivados, incluyendo proyectos de transporte de carga pesada o buses, e-metanol, e-kerosene, fertilizantes verdes y mezcla con gas natural. El llamado estaba abierto a distintas posibilidades en cuanto a

fuentes de energía renovable, escala y localización, con una capacidad mínima de 1,5 MW de potencia en el electrolizador, lo que puede ser considerada la fase inicial de un proyecto escalable en una siguiente etapa. En mayo de 2023, resultó adjudicatario el proyecto H24U, de la empresa Consorcio H2 4U, por un monto total de aporte de USD 10 millones no reembolsables. El hidrógeno verde producido se suministrará como combustible a camiones con celdas de combustible, para el transporte de carga forestal.

La Hoja de Ruta del Hidrógeno de Uruguay menciona la posibilidad de implementar incentivos específicos en el marco de la Ley N.º 16906 (Presidencia de la Nación, 1998) de Inversiones y Promoción Industrial. Se trata de una ley de interés nacional para la promoción y protección de las inversiones industriales o agropecuarias realizadas en todo el territorio nacional, que se aplica con iguales garantías tanto a inversores extranjeros como nacionales. Se otorgan exenciones bajo el Impuesto a las Rentas de las Actividades Económicas, Impuesto al Patrimonio, Impuesto al Valor Agregado y derechos aduaneros para las inversiones en activos fijos o intangibles que cumplan con ciertas condiciones:

- incorporen progreso técnico que permita mejorar la competitividad
- faciliten el aumento y la diversificación de las exportaciones, especialmente aquellas que incorporen mayor valor agregado nacional
- generen empleo productivo directa o indirectamente
- permitan la integración productiva incorporando valor agregado nacional en los distintos eslabones de la cadena productiva
- fomenten las actividades de las micro, las pequeñas y las medianas empresas, por su capacidad efectiva de innovación tecnológica y de generación de empleo productivo
- contribuyan a la descentralización geográfica y se orienten a actividades industriales, agroindustriales y de servicios, con una utilización significativa de mano de obra e insumos locales

6

**PROPUESTAS PARA
EL H₂V DENTRO
DEL PROCESO
DE TRANSICIÓN
ENERGÉTICA JUSTA**

TRANSICIÓN ENERGÉTICA JUSTA: CONTEXTO INTERNACIONAL

El concepto de transición energética justa tiene sus raíces en el Acuerdo de París (Naciones Unidas, 2015), que reconoce que la implementación de las políticas debería tener en cuenta “los imperativos de una transición justa en el mundo del trabajo y la creación de trabajo decente y empleo de calidad, de conformidad con las prioridades de desarrollo definidas a nivel nacional”.

Si bien el concepto de transición justa se utiliza ampliamente para abogar por la justicia social y la equidad en la acción climática, no existe una definición universalmente aceptada y la percepción varía según los países y las regiones.

En general, la ampliación de oportunidades de empleo y formación de negocios bajos en carbono se encuentra en la base del consenso internacional sobre lo que se entiende por transición energética justa. Dentro de ese enfoque, tiene amplia aceptación la noción de la Organización Internacional del Trabajo (OIT), que define la transición justa como la vía de ecologizar la economía de la manera más justa e inclusiva posible para todos los interesados, creando oportunidades de trabajo decente y sin dejar a nadie atrás. En 2016 la OIT elaboró sus *Directrices de política para una transición justa hacia economías y sociedades ambientalmente sostenibles para todos*, con orientaciones prácticas para gobiernos e interlocutores políticos.

Sin embargo, la transición energética, para ser realmente justa, además de los aspectos laborales también debe incluir otros ejes o vectores en los ámbitos ambientales, sociales y económicos, como se verá en la sección *Propuestas y recomendaciones* de este capítulo.

Las estrategias de transición energética en ALC reflejan ese énfasis en el empleo, ya que, en ellas, promover la cadena de valor del hidrógeno implica ir más allá de la reducción de emisiones, al colocarse en primer plano las oportunidades que se presentan para fortalecer el entramado industrial nacional y generar nuevos empleos de calidad. Los planes de acción y las hojas de ruta se centran en la promoción de la creación de trabajos y el desarrollo de capacidades, como aportes relevantes del sector del hidrógeno para el desarrollo sostenible del país.

A continuación, se describen ciertas herramientas elegidas por distintos países de la región en sus estrategias, hojas de ruta y planes de acción nacionales, destacando el caso de Chile, que también adopta enfoques territoriales y de género como parte de la transición justa.

● Argentina

El Plan Nacional de Transición Energética a 2030, con los lineamientos y escenarios para 2050, contempla que la transición debe ser justa, asequible y sostenible, atendiendo de forma simultánea a los objetivos de descarbonización y de desarrollo productivo con perspectiva federal. Uno de los lineamientos estratégicos para la transición energética justa es el desarrollo del hidrógeno bajo en emisiones.

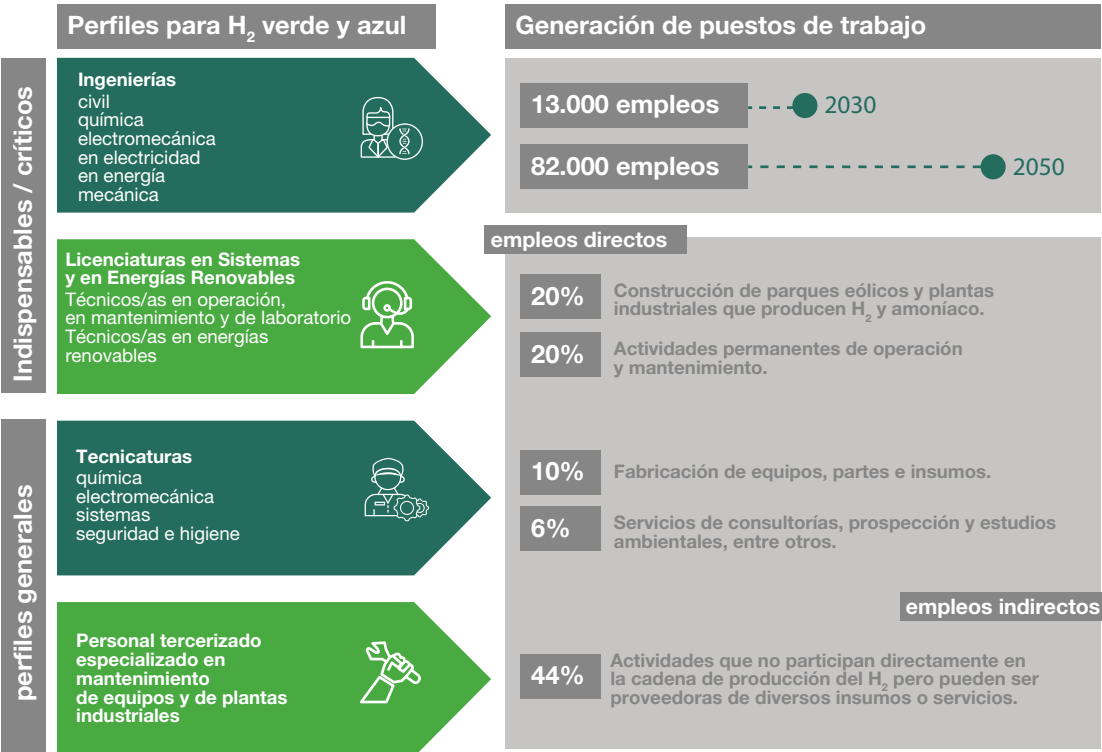
La Estrategia Nacional para el Desarrollo de una Economía del Hidrógeno (ENH) presenta a la cadena de valor del hidrógeno como un eje articulador de la política pública hacia una transición energética justa, con especial énfasis en las oportunidades para la reindustrialización.

La estrategia para esta nueva economía se fundamenta en integrar las ventajas naturales y las ventajas construidas, con base en las capacidades industriales, científicas y tecnológicas y el trabajo argentino. Se articulan acciones para generar nuevos empleos de calidad y fortalecer el entramado industrial, especialmente en lugares con disponibilidad de recursos para la producción de hidrógeno de forma sostenible y competitiva, contribuyendo así al desarrollo territorial armónico.

La economía del hidrógeno abre grandes oportunidades en materia de empleo y puede materializar una transición justa, por su potencial impacto positivo en términos de cantidad de puestos de trabajo, mejora de las condiciones laborales y creación de empleo de calidad. La estrategia quiere aprovechar esas oportunidades en un doble eje: adaptar las ocupaciones existentes a nuevos perfiles laborales y promover la inclusión social mediante el fomento de los mercados de trabajo locales.

En ese sentido se establecieron las metas de empleo directo e indirecto 2030–2050 (Figura 79).

FIGURA 79:
Metas de empleo 2030-2050, ENH de Argentina



Fuente: ENH

Estas metas serán alcanzables a través de una serie de acciones para fortalecer las capacidades laborales y promoción del empleo. A ellas se suman también las acciones específicas para Formación y Empleo que se identifican en los Planes de Acción (Tabla 19).

TABLA 19:
Acciones para fortalecer las capacidades laborales y promoción del empleo en la ENH argentina

ENH	- Fortalecer los programas de formación profesional en zonas cercanas a los polos de producción de hidrógeno - Fortalecer programas de becas en las disciplinas y competencias identificadas como críticas - Fortalecer la coordinación entre la educación media, técnica y superior, así como con el sistema de formación profesional para el desarrollo de trayectos formativos requeridos por la industria - Articular acciones entre áreas de gobierno para la formación técnica y profesional y para capacitación en temáticas vinculadas a la economía del hidrógeno - Potenciar las capacidades laborales y promover el empleo verde
Planes de acción	- Mejorar y potenciar la plataforma del Ministerio de Trabajo como bolsa de trabajo para la cadena de hidrógeno con la colaboración de sindicatos, cámaras, entre otros - Mejorar los datos estadísticos respecto a los niveles técnicos y de competencias certificadas - Articular entre instituciones las capacitaciones existentes para brindar formaciones teórico-prácticas, vinculando los contenidos con las necesidades planteadas por las empresas y generar espacios de prácticas (técnicos, finanzas, directivos) - Desarrollar cursos de corto plazo y para mandos medios, rescatando aprendizajes de experiencias de otros países - Generar un registro de oferta de capacitaciones para la certificación de competencias - Incentivar programas de becas compartidas con empresas operadoras de energía y gremios para perfeccionar el personal de las PYME, con reducciones impositivas

Fuente: elaboración propia

La consecución de las metas establecidas requerirá la articulación entre el sistema de educación técnica y superior argentino, las instituciones laborales del país que cuentan con centros de formación técnica y profesional, los sindicatos y las cámaras empresariales, que pueden contribuir con el proceso de identificación de perfiles laborales y trayectos formativos a lo largo de la vida laboral.

La colaboración institucional para la formación en nuevas capacidades relativas al hidrógeno ya se estaba desarrollando en Argentina desde antes de la promulgación de la ENH. Sirve como ejemplo el convenio de capacitación

profesional entre el Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social de la Nación, la Provincia de Río Negro y la Fundación del sindicato UOCRA (Ministerio de Capital Humano, 2022), en el que se instituye un programa de capacitación y formación profesional, en el marco de la implementación del plan de producción de Hidrógeno Verde en la Provincia de Río Negro. El programa tiene diferentes etapas orientadas a la formación profesional permanente, la especialización y la certificación laboral para las áreas de construcción, metalmecánica, energía eléctrica, energías renovables y producción de hidrógeno verde.

● Brasil

Uno de los objetivos principales de la previamente mencionada Política Nacional de Hidrógeno Bajo en Carbono es promover el desarrollo sostenible y ampliar el mercado laboral de las cadenas productivas de hidrógeno bajo en carbono y sus derivados. Para el cumplimiento de estos objetivos, se cuenta con varias herramientas, como el PNH2.

El PNH2 está elaborado alrededor de seis Ejes temáticos, de los cuales el Eje 2 está dedicado enteramente a la formación de recursos humanos, con los siguientes objetivos general y específicos:

- **Objetivo.** Desarrollar recursos humanos nacionales con habilidades para la planificación, licencias, implementación y operación de proyectos relacionados con la producción, transporte, almacenamiento y uso de hidrógeno, a través de:
 1. Promover la capacitación técnica y profesional en materia de hidrógeno
 2. Fomentar el desarrollo de disciplinas, a nivel de pregrado y posgrado, sobre el hidrógeno
 3. Fomentar la formación de recursos humanos a nivel de posgrado en hidrógeno
 4. Fomentar el desarrollo de patentes, libros y publicaciones técnico-científicas sobre el hidrógeno
 5. Promover el intercambio entre el sector privado y la academia
 6. Promover la capacitación dentro del sector público, para el diseño de políticas públicas relacionadas con el hidrógeno y tecnologías relacionadas

7. Estimular la creación de grupos de investigación que se centren en el uso del hidrógeno en diferentes sectores.

Con base en esos objetivos, el Plan de Trabajo Trienal (2023-2025), elaborado por el Comité Gestor del PNH2, contiene propuestas de acciones para este Eje 2 Formación de Recursos Humanos, que son responsabilidad de la Cámara Temática de Formación de Recursos Humanos, coordinada por el Ministerio de Educación.

Dentro de su ámbito de actuación, el primer objetivo es elaborar un mapa del conocimiento de la cadena de valor del hidrógeno en Brasil, identificando la disponibilidad de formación de nivel técnico y profesional en las instituciones educativas del país, así como las brechas de formación en estos niveles de formación, además de realizar un mapeo para identificar infraestructuras (laboratorios y equipos), número de profesores e instructores, materiales didácticos (libros, cuadernillos y guías) para los procesos de formación profesional. A partir de ese mapeo, corresponderá ampliar el número de laboratorios y equipos en las redes educativas, para apoyar las actividades de formación de recursos humanos en materia de hidrógeno.

También se desarrollará un programa de capacitación sobre hidrógeno bajo en carbono dentro del sector público, en particular módulos para empleados en actividades de autorizaciones y licencias socioambientales que requieren habilidades para la evaluación de proyectos de hidrógeno en las diversas esferas gubernamentales.

Como forma de diseñar los perfiles profesionales e identificar las infraestructuras necesarias para el pleno desarrollo de la cadena del hidrógeno, se prevé promover los intercambios entre los sectores público, privado y la academia.

● Chile

La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde contempla las contribuciones a una transición energética justa como parte fundamental del desarrollo del sector del hidrógeno.

Uno de sus pilares es el uso equilibrado de recursos y territorio, de modo que el desarrollo de la industria del hidrógeno sea coherente con su entorno social

y ambiental, incorporando mejores prácticas y diálogo. La institucionalidad de Chile velará por la seguridad de las personas y el medio ambiente, además de articular con las comunidades locales y resguardar el respeto a los instrumentos de planificación territorial, para lograr una transición energética y económica justa y equilibrada. En especial, se trabajará para que esta nueva industria derive en una mejora a la calidad de vida de la ciudadanía, cuidando siempre el uso responsable del agua y fomentando conceptos de economía circular.

Otro de sus pilares es el hidrógeno verde como motor de desarrollo local. Los proyectos y la industria generarán polos de inversión, innovación y actividad local, a través de la colaboración estrecha de actores públicos y privados. El Estado continuará velando por que la inversión y la innovación desarrolladas produzcan valor en las localidades donde se inserten los proyectos y signifiquen reales oportunidades de formación de capacidades y empleo nacional, respetando las necesidades, anhelos y fortalezas de los territorios. Asimismo, el Estado promoverá las aplicaciones del hidrógeno verde que produzcan co-beneficios locales.

Los principios de transición justa de estos pilares quedan reflejados en el Plan de Acción de la Estrategia, donde se incluyen los siguientes compromisos:

- **Desarrollo social y territorial.** El desarrollo sostenible de la nueva industria debe considerar una adecuada integración en el territorio, tomando en cuenta los intereses, actividades, grupos, imaginarios colectivos, necesidades, anhelos y fortalezas del territorio. El potencial de Chile en hidrógeno verde llevará a un crecimiento orgánico y descentralizado del país, si los proyectos efectivamente se insertan en las comunidades y regiones. Para esto, se considera crucial:

1. **Asegurar la participación temprana y continua de las comunidades cercanas a proyectos.** Se articulará el diálogo entre desarrolladores de proyectos de hidrógeno y las comunidades cercanas, a través de capacitación y fortalecimiento técnico de los actores, además de facilitar acuerdos entre las partes. Se ofrecerá también la posibilidad de explorar mecanismos de asociatividad entre comunidades y desarrolladores para fomentar el desarrollo de proveedores locales, capacidades y mejores prácticas en gestión de los intereses territoriales y comunitarios.

2. **Promover el uso de hidrógeno verde para complementar o reemplazar la generación eléctrica basada en combustibles fósiles en sistemas eléctricos aislados y medianos.** En específico, se reducirán las barreras regulatorias y de mercado a la inclusión de soluciones de hidrógeno verde en la planificación y expansión de sistemas eléctricos medianos.
3. **Evaluar las oportunidades y desafíos del hidrógeno verde en las políticas, ordenamientos y planes territoriales.** Se analizarán las consideraciones de incluir la cadena de valor del hidrógeno verde en los procesos de elaboración de políticas y planes territoriales en diversas regiones, para facilitar una adecuada inserción territorial y un uso racional del suelo y recursos naturales, considerando sinergias e interacciones con otras actividades y requerimientos humanos, como el uso de agua.

- **Formación de capacidades e innovación.** Un cuerpo de especialistas y técnicos locales con conocimiento y capacidades adecuadas fortalecerá el ecosistema local del hidrógeno, lo cual fomentará el desarrollo de emprendimientos, negocios, innovaciones y empleos productivos. Las acciones previstas para impulsarlo son las siguientes:

1. **Convocatoria a los actores de la industria, la academia y los centros de formación, para identificar brechas y formar las capacidades nacionales requeridas por la industria.** Se relevarán junto al sector privado las competencias y habilidades requeridas en las etapas de la cadena de valor del hidrógeno verde, para articular, de forma coordinada, la provisión de dichas capacidades por las instituciones de educación nacionales existentes. Así se mejorarán las perspectivas de un empleo sofisticado, satisfactorio y de calidad.
2. **Elaboración de una hoja de ruta I+D.** En ella se determinan hitos, pilotos y actividades necesarias para desarrollar nuevo conocimiento, en colaboración con el Instituto de Tecnologías Limpias (una plataforma de innovación con financiamiento público de hasta 193 MUS\$), otros actores nacionales de innovación y el sector privado.
3. **Creación de grupo de trabajo con empresas del Estado para acelerar la adopción del hidrógeno verde en ellas y sus**

proveedores. Se determinarán las condiciones y acciones necesarias para incorporar hidrógeno verde en los procesos y aplicaciones donde tenga oportunidades de reducir emisiones de manera costo-efectiva. Esto fortalecerá la competitividad y las capacidades de empresas públicas, como ENAP y Codelco.

El mencionado Plan de Acción Hidrógeno Verde 2023-2030 contiene varias líneas de acción con componentes diseñados para garantizar que el naciente sector del hidrógeno sea una herramienta para la transición energética justa. Entre ellas se destacan:

- **Línea de Acción 15: Fortalecimiento y desarrollo de capital humano (Acciones 60 a 65). Plazo: 2023-2030.** En el aspecto laboral, el Plan de Acción se enfoca en la necesidad de contar con capital humano con capacidades y habilitaciones acordes a las necesidades presentes y futuras de la industria. Esta línea de acción incluye una serie de medidas alineadas con la necesidad de formar cuerpos técnicos y profesionales para la industria del hidrógeno verde, sus derivados y su cadena de valor. Una primera acción prevista es identificar los perfiles ocupacionales que se requerirán en la cadena del hidrógeno verde, proceso que se desarrollará junto al sector privado. A partir de esa identificación, se podrá desarrollar programas de capacitación y entrenamiento en operación, mantenimiento, seguridad y prevención de riesgos (entre otras temáticas asociadas a las instalaciones de producción, transporte, almacenamiento y consumo de hidrógeno verde y derivados), dirigidos a la enseñanza media técnico profesional, para fortalecer el capital humano disponible en las regiones vinculadas a la cadena de valor del hidrógeno verde y derivados. Se desarrollará un programa de pasantías en el extranjero, con foco en trabajadores y trabajadoras con formación técnico-profesional, para contar con especialistas en la producción de hidrógeno verde. En el proceso se considerará enfoque de género, inclusión de pueblos indígenas y de personas afectadas directa o indirectamente por el cierre de centrales a carbón.
- **Línea de Acción 16: Perspectiva de Género en la industria (Acciones 66 a 69). Plazo: 2023 - 2030.** Incluye una serie de acciones e hitos para la inclusión equitativa de la mujer en la industria del hidrógeno. En el

marco del Plan de Acción, se ha trabajado en una mesa interministerial de género y en el desarrollo de una estrategia de transversalización de género en el sector del hidrógeno, donde se elaboraron una serie de criterios e iniciativas focalizadas en la inclusión laboral de las mujeres, en el liderazgo y la participación de mujeres en procesos de toma de decisiones y en la capacitación y educación, para disminuir brechas de género en formación en hidrógeno.

● Colombia

La Hoja de Ruta de Transición Energética Justa de Colombia orienta la transformación social, ecológica, económica y tecnológica que implica el tránsito de sistemas energéticos basados predominantemente en combustibles fósiles hacia aquellos con un mayor protagonismo de las energías renovables, a la vez que se transita hacia una economía reindustrializada y cada vez menos dependiente económica y fiscalmente de las exportaciones de combustibles fósiles.

El hidrógeno es uno de los elementos de la transición energética justa en la oferta de energía que se incluyen en el ejercicio de escenarios del documento. Se hacen recomendaciones específicas para el hidrógeno en las categorías de justicia social y ambiental, reindustrialización, reconversión laboral y productiva y desarrollo de capacidades. En particular, se recomienda fomentar la implementación de acuerdos internacionales orientados a los mercados de exportación, que además velen por modelos de producción basados en los principios de Transición Energética Justa, alejados de los modelos de extractivismo y que no compitan en recursos con las fuentes de energía limpias y de bajo costo para los colombianos.

Por otro lado, la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia incluye los principios de una transición energética justa entre sus Pilares y en los Ejes de actuación previstos, en particular para la Fase 1 (2020-2026).

El Pilar 3 propone al hidrógeno como habilitador de una transición energética justa. El hidrógeno de bajas emisiones es una oportunidad para la transición justa diseñada para mantener el empleo de los sectores impactados por la descarbonización e involucrar a las unidades territoriales, comunidades, ciudades, academia y empresas, a la vez que abre nuevas puertas para la

creación de nuevo tejido industrial que aproveche la competitividad del hidrógeno producido en Colombia.

El despliegue de la industria del hidrógeno de bajas emisiones en zonas mineras y petroleras se beneficiará del aprovechamiento de las infraestructuras y capacidades profesionales existentes permitiendo una transición justa y equilibrada. De igual forma, el hidrógeno verde abre nuevas oportunidades de desarrollo local en nuevas regiones con alto potencial de producción de energías renovables, contribuyendo a un desarrollo económico equilibrado y cohesivo entre territorios.

Además, el Pilar 5 propone al hidrógeno como vía de integración del territorio y herramienta de desarrollo inclusivo. El desarrollo de la economía del hidrógeno pondrá en el centro a las comunidades desde el inicio, teniendo en cuenta su situación actual, necesidades, aspiraciones y capacidades. El Gobierno y autoridades locales pondrán en marcha un plan de socialización que traslade el potencial del hidrógeno para transformar económicamente las comunidades mediante la generación equilibrada de riqueza y empleo, a la vez que se capacita el personal y se protegen los recursos naturales, las personas y el medio ambiente. Se involucrará a las comunidades en el diálogo acerca de las oportunidades para el territorio de las FNCER en general, y el hidrógeno en particular, situándolas en el centro de la planeación territorial y económica. El diálogo involucrará también a los promotores para definir las mejores prácticas para el desarrollo económico local, favoreciendo la creación compartida de valor.

En el mapa de actuación de la Hoja de Ruta pueden identificarse dos líneas de acciones concretas para implementar los principios en los que se basan estos Pilares, a ser ejecutadas en la Fase 1 2020-2026 (Tabla 20).

TABLA 20:
Acciones para una Transición Energética Justa en la Hoja de Ruta del Hidrógeno de Colombia

25. Capacitar personal técnico y profesional a lo largo de toda la cadena de valor del hidrógeno	• Incluir el hidrógeno en los planes de formación existentes. En colaboración con las instituciones educativas nacionales, se impulsará la inclusión de las tecnologías del hidrógeno dentro de los planes educativos y titulaciones existentes, tanto de formación profesional como técnica, que tengan relación temática con el hidrógeno. Para ello, se impulsará el desarrollo de planes de transferencia tecnológica y de conocimiento con universidades y empresas, así como programas de financiación para la formación de profesionales. • Formar y certificar personal local en materia de hidrógeno y sus tecnologías habilitantes. Se elaborarán planes de formación para adaptar profesionales tales como mecánicos de talleres, personal de emergencia o asistentes de carretera al manejo seguro del hidrógeno. El Ministerio de Trabajo, junto al Ministerio de Educación, de Minas y Energía y el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), trabajarán por el desarrollo de programas de formación del personal que se requieren para configurar la industria de hidrógeno. Se elaborará y ejecutará un plan de formación a los funcionarios públicos de los Ministerios cuyos ámbitos de actuación estén relacionados con el hidrógeno. Esto permitirá la mejor toma de decisiones en la materia y servirá como punto de referencia para extender posteriormente la formación a otros ámbitos
26. Impulsar las capacidades industriales locales en tecnologías de hidrógeno	• Evaluar las fortalezas de la industria local en la cadena de valor del hidrógeno. Se promoverá la realización de un estudio de impacto-socioeconómico de las tecnologías del hidrógeno en Colombia. Se impulsará la creación de grupos de trabajo con las instituciones públicas (destacando el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación), asociaciones empresariales y representantes del sector privado, para potenciar la participación de las empresas locales en el desarrollo, fabricación, montaje, instalación o reciclaje de equipos. Esta colaboración permitirá crear las condiciones propicias para la generación de riqueza y la creación de puestos de trabajo cualificados en Colombia, e incluso la valoración de una posible exportación de equipos/tecnología. • Apoyo a la I+D+i nacional mediante financiación e impulso a los grupos de trabajo existentes. Se considera que Colombia podría incentivar también la innovación tecnológica, sobre todo cuando esto permita la creación y el fortalecimiento de empresas e iniciativas locales. Por este motivo, se impulsarán programas de investigación e innovación orientados a la mejora de las capacidades tecnológicas e industriales del país. El Gobierno deberá desempeñar un papel central estableciendo ayudas a la i+D+i, impulsando programas de investigación y fomentando la captación de capital privado mediante colaboraciones público-privadas. Por otro lado, se fomentarán los grupos de trabajo existentes en las universidades del país y en las asociaciones empresariales, encargados en su conjunto de facilitar la transferencia tecnológica desde la investigación al mercado nacional e internacional.

Fuente: elaboración propia.

● Costa Rica

La creación de empleo forma parte de la misión y objetivos estratégicos de la mencionada Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Costa Rica 2022–2050. Como misión, se establecen tres objetivos estratégicos, dos de ellos alineados a aspectos relevantes de la cadena de valor de hidrógeno y un tercer aspecto transversal con componentes económicos y sociales. Ese objetivo estratégico transversal consiste en la creación de un *hub* regional de mercados y empleos alrededor de la cadena de valor del hidrógeno verde, que aprovechen el talento humano nacional para impulsar el crecimiento económico y bienestar social.

La estrategia destaca la relevancia del hidrógeno verde para la generación de empleos y capital humano especializado, como una oportunidad para impulsar el cumplimiento de Objetivos de Desarrollo Sostenible en Costa Rica, en particular el Objetivo 8: “Trabajo decente y crecimiento económico”. El hidrógeno verde, acoplado a la industria de energías renovables, presenta altos factores de empleabilidad que permitirán que nuevos puestos sean creados y que ello tenga un impacto en la economía nacional.

En ese término, la visión 2030 prevé que durante el periodo 2022-2030 será preciso movilizar inversiones potenciales estimadas en USD 1.100 millones y crear entre 12.000 y 18.000 empleos, principalmente en los sectores del transporte y la industria. Esos empleos serían directos e indirectos, incluyendo el desarrollo de energías renovables, y se multiplicarían a un rango entre 180.000 y 220.000 para 2050.

Bajo el Eje 2, “Desarrollo de un hub tecnológico y de innovación en hidrógeno verde”, se agrupan actuaciones encaminadas a convertir al país en un *hub* tecnológico mediante la atracción de socios comerciales y tecnológicos para el desarrollo de emprendimientos, negocios, innovación y empleos asociados al hidrógeno. La línea de acción 2.2 está dedicada a acciones de capacitación y formación, con el Ministerio de Ciencia, Innovación, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT) y el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) como organismos responsables, junto a otros actores involucrados (Figura 80).

FIGURA 80:
Eje 2 - Acciones de Capacitación y Formación

Acción No.	Descripción	Responsable(s)	Otros actores involucrados
2.2.1	Identificar las necesidades de capital humano, (técnico y profesional) para desempeñarse como profesionales en el sector del hidrógeno verde, con perspectiva de equidad de género.	MICTT	MINAE
2.2.2	Fortalecer conocimientos mediante la colaboración con instituciones y empresas de otros países y organismos regionales e internacionales.	MINAE	Instituciones académicas de Costa Rica. Colegio de Ingenieros.
2.2.3	Realizar una campaña de sensibilización hacia tecnologías de H ₂ V para difundir sus ventajas y desventajas.	MINAE	Alianza por el hidrógeno y asociación Costarricense de Hidrógeno.
2.2.4	Articular, programas de capacitación y desarrollo de capacidades a todos los niveles, considerando las buenas prácticas y experiencias internacionales.	MICTT	Instituciones académicas de Costa Rica. Colegio de Ingenieros. Organizaciones no gubernamentales. Sector privado.

Fuente: Estrategia Nacional del Hidrógeno de Costa Rica

El empleo es también uno de los indicadores de seguimiento de la Estrategia. De acuerdo con el Eje 2, “Desarrollo de un *hub* tecnológico y de innovación en hidrógeno verde”, se propone al número de empleos directos como un indicador del impacto. Además de ser directamente comparable con las metas de la Estrategia, es un indicador de bienestar social en el país, que puede incluirse en las métricas del país en cuanto a generación de empleo.

● Trinidad y Tobago

La Hoja de Ruta para una Economía de Hidrógeno Verde en Trinidad y Tobago se basa en un programa de desarrollo de 35 años y se divide en tres horizontes. El Horizonte 1 (2022–2028) se centra en establecer los cimientos para el futuro del hidrógeno en Trinidad y Tobago, con base en el establecimiento de nuevas

políticas, un marco regulatorio, el fortalecimiento de capacidades y el desarrollo del capital humano local. Sin embargo, no propone acciones concretas sobre estos aspectos ni otros específicos para una transición justa.

Cabe destacar que, en paralelo, el Gobierno de Trinidad y Tobago trabaja desde hace varios años en un proceso de desarrollo de una Política de Transición Justa para facilitar una transición efectiva e inclusiva hacia una economía baja en emisiones de carbono mediante la creación de oportunidades para la fuerza laboral. Este proceso ha incluido varias actividades. El Ministerio de Planificación y Desarrollo encargó la elaboración de documentos temáticos para aumentar la concienciación y proporcionar información detallada a las partes interesadas sobre los componentes de una Política Integral de Transición Justa. También se llevó a cabo un proceso de consulta con involucramiento de las partes interesadas. Teniendo en cuenta los aportes recibidos, en 2022 el Gobierno circuló un primer borrador de Política de Transición Justa por un futuro equitativo y bajo en carbono para Trinidad y Tobago (Gobierno de Trinidad y Tobago, 2022).

La propuesta presenta el contexto y describe el análisis situacional de los aspectos de Trinidad y Tobago relacionados con la Transición Justa, con base en los cuales se construye la visión, las metas y los objetivos de Trinidad y Tobago hacia una Transición Justa. Finalmente, establece principios rectores y directrices y estrategias de política como componentes de una hoja de ruta para una implementación exitosa. El documento menciona expresamente al hidrógeno entre las distintas oportunidades para Trinidad y Tobago de diversificar la economía hacia soluciones bajas en carbono, aunque sin proponer herramientas o soluciones específicas para el sector.

● Uruguay

Como ya se ha explicado, el Programa H2U es la principal herramienta para la implementación de la Hoja de Ruta del hidrógeno verde y derivados en Uruguay. El PH2U se estructura en cinco ejes de trabajo a desarrollar junto a los gobiernos locales, organizaciones no gubernamentales, empresas, sector académico y sociedad civil.

Uno de esos ejes de trabajo está dedicado a la generación de capacidades, entendida como un elemento clave para potenciar el desarrollo del hidrógeno

verde y evitar posibles brechas entre oferta y demanda a nivel de personal para las áreas operativas, técnicas y de ingeniería. En sus acciones, se tendrán en cuenta los aspectos de género de forma de brindar igualdad de oportunidades y disminuir posibles brechas existentes.

La formación profesional y la especialización se potenciarán hacia una educación terciaria enfocada en el hidrógeno y sus derivados. En articulación con el Consejo Nacional de Innovación Ciencia y Tecnología (CONICYT), se buscará desarrollar un programa que permita generar las capacidades a nivel científico-técnico.

En términos de financiación de las acciones de este eje de generación de capacidades, además del Fondo Sectorial del Hidrógeno, se prevé que a través del Fondo Sectorial de Energía (Agencia nacional de investigación e innovación, 2024) se apoyen proyectos de investigación vinculados a la economía del hidrógeno y se impulsen otras acciones como la movilidad de investigadores entre países para seguir promoviendo el conocimiento a nivel académico.

Una de las acciones en curso de ejecución en el ámbito de empleo, también mencionada antes, es la convocatoria para la elaboración de estudios prospectivos de mercado laboral en la cadena de hidrógeno verde y derivados, por parte del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. El objetivo es realizar un diagnóstico estratégico e investigación prospectiva para anticipar necesidades de empleo y formación y brindar herramientas para la planificación de la formación profesional en la cadena de valor del hidrógeno verde y derivados que sirva como insumo para la elaboración de políticas públicas de Empleo y Formación. La fecha final para la presentación de ofertas para esta convocatoria fue el 9 de septiembre de 2024 y actualmente está en evaluación para adjudicación.

PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES

Las estrategias, hojas de ruta y planes de acción analizados muestran que, además de los beneficios energéticos y de reducción de emisiones, los países

de ALC ya están considerando el potencial del sector del hidrógeno renovable y bajo en carbono para el desarrollo económico y social, principalmente a través de la generación de empleo, la creación de capacidades, el impulso a la actividad económica y la innovación.

Sin embargo, una implementación efectiva de una transición justa necesariamente se derrama hacia otros ámbitos ambientales, sociales y económicos y requiere la articulación de los objetivos de creación de empleo decente con muchos otros aspectos, condicionados las circunstancias únicas de cada país, como son los aspectos territoriales, sociales, comunitarios y de género. En ese sentido es preciso considerar los siguientes aspectos:

- **Oportunidades de empleo y formación.** Implica adoptar un doble enfoque: minimizar los impactos negativos y optimizar las oportunidades. Por un lado, se trata de asegurar la reconversión o reubicación de trabajadores que pueden verse afectados por el cese de actividades relacionadas con los modelos de producción y uso de energía contaminante, como la minería del carbón o la generación eléctrica de fuentes fósiles. Por otro lado, también implica consolidar el acceso de amplios sectores de la población a los nuevos empleos generados por la descarbonización de la economía, como las energías renovables o la producción de bienes e insumos industriales bajos en carbono.
- **Acceso a la energía limpia y reducción de la pobreza energética.** En los países en vías de desarrollo con un alto porcentaje de pobreza energética, garantizar una transición energética justa puede significar también ampliar el acceso de importantes sectores de la población a energías bajas en carbono, reduciendo la pobreza energética y mejorando los índices de salud.
- **Enfoque territorial.** La estructura económica de un país puede verse afectada por grandes desigualdades territoriales. La transición energética puede representar la oportunidad para un tratamiento equitativo de territorios marginados y en situación de desigualdad.
- **Perspectiva de género.** Teniéndose en cuenta el contexto socioeconómico de cada país, dentro de muchos de los desafíos y de las oportunidades que se presentan con la descarbonización debe considerarse la perspectiva de género y prever medidas concretas en materia de género dentro de las políticas de transición justa, si realmente se quieren lograr resultados equitativos.

El sector del hidrógeno renovable y sus derivados presenta especificidades que pueden potenciar las oportunidades para una transición justa. Se trata de un vector energético flexible en sus modos de producción, ya que puede ser producido por vías tecnológicas muy diferentes, por ejemplo, mediante la electrólisis del agua o a partir de fuentes biológicas, dando impulso a la economía circular. Además, tiene una versatilidad única en sus usos potenciales, que van desde la generación y almacenamiento de la energía eléctrica, hasta el transporte y las industrias de toda escala, beneficiando a la sociedad en su conjunto.

Sin perjuicio de las acciones y medidas que ya están incluidas en los instrumentos reseñados para el hidrógeno, los gobiernos pueden acometer otras actuaciones regulatorias que optimicen las contribuciones del sector del hidrógeno a una transición justa, con una visión transversal que abarque todos ámbitos mencionados, no sólo la creación de empleo sino también la promoción de la actividad económica e industrial con arraigo territorial, el acceso universal a una matriz energética limpia, la priorización regional en función de los impactos socioeconómicos, riesgos, oportunidades y beneficios o la perspectiva de género.

A continuación, se formulan algunas propuestas para una integración transversal del hidrógeno en ciertas políticas públicas e instrumentos regulatorios, de modo que se puedan maximizar las ventajas únicas del hidrógeno y optimizar su contribución a una transición justa:

- **Estrategias de transición energética justa.** Existen indudables sinergias entre las estrategias para el hidrógeno y las estrategias de transición energética justa. Otorgar un papel central al hidrógeno dentro de estas últimas tiene un efecto multiplicador sobre los resultados de los planes de transición justa, fomentando el impulso a las energías renovables en general y a la economía circular, al utilizar en su producción materias primas y energías renovables, y agregando factores de usos y aplicaciones adicionales. Por ejemplo, la Hoja de Ruta de Transición Energética Justa de Colombia fue construida sobre la base de distintos escenarios, uno de los cuales corresponde al hidrógeno.
- **Zonas y Convenios de Transición Justa.** En un proceso de transición energética, los territorios no se encuentran en igualdad de condiciones, sino que algunos resultan más vulnerables que otros a los impactos negativos de los cambios en las actividades económicas. En general,

se trata de regiones dependientes de modelos productivos basados en combustibles fósiles, como la minería del carbón o las plantas térmicas de generación eléctrica, aunque puede tratarse también de localidades desarrolladas alrededor de industrias contaminantes que deben ser reconvertidas, los llamados territorios de sacrificio. Elaborados sobre una gobernanza participativa y articulación público-privada, los convenios de transición justa son un instrumento disponible para proteger a las comunidades que puedan verse afectadas negativamente por el cambio de modelo energético. Estas zonas pueden beneficiarse especialmente de las sinergias entre sus infraestructuras energéticas existentes y las posibles líneas de actuación en el sector del hidrógeno y sus derivados.

Desde 2021, el Gobierno de Chile lleva adelante la Estrategia de Transición Justa en el Sector de Energía (Estrategia de Transición Justa en el Sector Energía, 2021) para descarbonizar la matriz eléctrica, cuya primera fase consiste en el cierre y nuevos usos de las centrales a carbón. La solución concreta de cierre y nuevo uso se adopta caso por caso, en un proceso participativo y negociado, con base en las alternativas tecnológicas, la situación social y económica de cada comuna y las posibilidades de reconversión productiva que apoyen una transición energética justa. Por ejemplo, el Plan de Transición Socio-ecológica Justa de Tocopilla (Plan de Transición Socioecológica Justa de Tocopilla, 2023), acordado en el marco de la Estrategia de Transición Justa, contiene numerosas medidas y acciones priorizadas centradas en el hidrógeno, en todos los ámbitos de la transición justa.

También España representa un modelo de éxito, pionero en la implementación de Convenios de Transición Justa. La Estrategia de Transición Justa (Gobierno de España, 2019) forma parte del Marco Estratégico de Energía y Clima y se basa en las Directivas de la OIT sobre Transición Justa ya mencionadas. Su objetivo es maximizar las ganancias sociales de la transformación ecológica y mitigar los impactos negativos de la transición, con medidas para garantizar un tratamiento equitativo y solidario a trabajadores y territorios.

Los Convenios de Transición Justa son una herramienta fundamental en la implementación de esta Estrategia de Transición Justa. Se suscriben entre el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

El sector del hidrógeno renovable y sus derivados presenta especificidades que pueden potenciar las oportunidades para una transición justa. Se trata de un vector energético flexible en sus modos de producción, ya que puede ser producido por vías tecnológicas muy diferentes, por ejemplo, mediante la electrólisis del agua o a partir de fuentes biológicas, dando impulso a la economía circular.

(MITERD) y otras administraciones públicas, incluyendo a las entidades locales de áreas geográficas vulnerables, con participación de empresas, organizaciones empresariales, organizaciones sindicales, universidades, centros educativos, asociaciones y organizaciones ambientales no gubernamentales y demás entidades interesadas o afectadas. Se contempla expresamente la inserción del hidrógeno renovable como parte de las actuaciones, con producción local para usos industriales en autoconsumo, térmicos, almacenamiento energético y transporte.

- **Otras políticas públicas estratégicas.** La integración del hidrógeno puede ser una alternativa tecnológica prioritaria dentro de las políticas públicas ambientales, sectoriales, territoriales y los planes de desarrollo locales. Al incluir el hidrógeno dentro de los escenarios de impactos económicos y sociales, riesgos, oportunidades y análisis costo-beneficio en esas políticas públicas, se ponen de manifiesto sus beneficios ambientales y socioeconómicos, valorizando sus externalidades positivas. Como ejemplo, puede citarse el Plan de Descarbonización del sistema eléctrico (Ministerio de Energía, 2023) de Chile, dirigido a establecer las condiciones habilitantes de índole regulatoria, tecnológica e institucional para acelerar la descarbonización de la matriz eléctrica y, con ello, de la economía nacional.

Se espera dotar de atributos de flexibilidad y de servicios complementarios al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), a fin de permitir un proceso de descarbonización de la matriz eléctrica costo-eficiente. En la construcción de este Plan se están considerando ampliamente las sinergias posibles entre sus Ejes Temáticos y la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, incluyendo el Eje temático 3: Transición energética justa y comunidades.

Integración de la transición justa en los mecanismos de apoyo al hidrógeno. Los mecanismos financieros de apoyo al hidrógeno pueden establecer criterios de priorización para los proyectos que incorporen y privilegien elementos de transición justa, como programas de recualificación y empleabilidad de los trabajadores del carbón y centrales térmicas, o que faciliten el acceso comunitario a los recursos por parte de las poblaciones e instituciones locales, por ejemplo, a través de la constitución de comunidades energéticas. Se pueden impulsar iniciativas de I+D+i en hidrógeno en territorios designados como afectados por la transición energética, de manera que actúen de palanca tecnológica y socioeconómica en áreas afectadas por los cierres. En la experiencia internacional, pueden mencionarse las Convocatorias PERTE ERHA dentro del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR) de España. Estas convocatorias de apoyo al hidrógeno verde priorizan los proyectos que propongan un plan de acción territorial integral basado en los objetivos y criterios de la estrategia de transición justa, como en el caso de la convocatoria. En la Segunda Edición de H2 Pioneros (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023) dentro del PERTE ERHA, un 84% de las ayudas corresponden a iniciativas en áreas de transición justa y reto demográfico.

7

BIBLIOGRAFÍA

- AEVO (2024). *Programa de Inovação em Hidrogênio Verde*. Obtenido de <https://aevo.com.br/connect/ih2-brasil/>
- Agencia nacional de investigación e innovación (2022). *Convocatoria a proyectos de hidrógeno verde*. Obtenido de <https://www.anii.org.uy/apoyos/innovacion/303/convocatoria-a-proyectos-de-hidrogeno-verde/>
- Agencia nacional de investigación e innovación (2024). *Fondo sectorial de energía*. Obtenido de <https://anii.org.uy/apoyos/innovacion/396/fondo-sectorial-de-energia/>
- Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (2024). *Implementación del Marco Regulatorio del Hidrógeno Verde Bajo en Carbono*. Obtenido de <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/relatorios/arquivos/implementacaomarcoregulatoriohidrogenio.pdf>
- Anglo American (2021). *Proyecto H₂V Las Tórtolas: Innovación para alcanzar la neutralidad climática en 2030*. Obtenido de <https://chile.angloamerican.com/medios/press-releases/pr-2021/2021-08-23.aspx#:~:text=Anglo%20American%20marc%C3%B3%B3%20un%20hito%20clave%20para%20el,neutralidad%20en%20sus%20operaciones%20en%20Chile%20a%202023>
- Armada de Chile (2024). *Armada de Chile ejecuta innovador proyecto apuntando a la transición energética*. Obtenido de <https://www.armada.cl/armada-de-chile-ejecuta-innovador-proyecto-apuntando-a-la-transicion>
- Asamblea legislativa (2022). *Ley para la promoción e implementación de una economía de hidrógeno verde*. Obtenido de https://d1qqtien6gys07.cloudfront.net/wp-content/uploads/2022/08/Dictamen_22392REDACCION-FINAL.pdf
- Asamblea Nacional (2024). *Proyecto de ley de energías renovables y alternativas*. Obtenido de <https://www.asambleanacional.gob.ve/sec/ley-sobre-energias-renovables-y-alternativas>
- Asociación Chilena del Hidrógeno (s.f.). *Mapa de Proyectos de Hidrógeno Verde en Chile*. Obtenido de <https://h2chile.cl/wp-content/uploads/2024/09/2024-08-Slide-Proyectos-1.pdf>
- Asociación Hidrógeno Colombia (2023). *Colombia: Un país estratégico para el futuro del hidrógeno - Reporte de proyectos*. Obtenido de <https://h2lac.org/wp-content/uploads/2024/04/H2Col-Reporte-de-proyectos.pdf>
- Asociación peruana de hidrógeno (2022). *Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde en el Perú al 2050*. Obtenido de <https://h2.pe/uploads/Li%CC%81nea-de-tiempo.jpg>
- Banco Central de Chile (2024). *Hidrógeno Verde en Chile: perspectivas de demanda e inversión*. Obtenido de <https://www.bcentral.cl/web/banco-central/w/hidrogeno-verde-chile>
- Barbados Investment and Development Corporation (s.f.). *Sitio Web Oficial*. Obtenido de <https://exportbarbados.org/>
- Barbados Investment and Development Corporation y Seabased Group (2024). *Memorando de entendimiento*. Obtenido de <https://seabased.com/news-insights/barbados-and-seabased-sign-mou-for-wave-park>
- BID (2023). *Guide for the Implementation of a Hydrogen Certification System in Latin America and the Caribbean*. Obtenido de <https://publications.iadb.org/en/guide-implementation-hydrogen-certification-system-latin-america-and-caribbean>
- BID (2023). *Unlocking Green and Just Hydrogen in Latin America and the Caribbean*. Obtenido de <https://publications.iadb.org/en/unlocking-green-and-just-hydrogen-latin-america-and-caribbean>

- BNAmericas (2024). *Proyecto Ammonia-Green Fertilizers en Costa Rica*. Obtenido de <https://www.bnamericas.com/pt/noticias/grupo-purdy-apresenta-proposta-de-hidrogenio-verde-na-costa-rica-aos-legisladores>
- BNDES (2022). *BNDES lança programa para fomento ao hidrogênio verde*. Obtenido de <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-lanca-programa-para-fomento-ao-hidrogenio-verde>
- BNEF (2021). *New Energy Outlook 2021*. Obtenido de <https://www.nordicenergy.org/wordpress/wp-content/uploads/2021/11/2021-11-08-BNEF-Cheung-New-Energy-Outlook-v2.pdf>
- BNEF (2024). *Hydrogen Supply Outlook 2024: A Reality Check*. Obtenido de <https://about.bnef.com/blog/hydrogen-supply-outlook-2024-a-reality-check/>
- BNEF (2024). *New Energy Outlook 2024*. Obtenido de https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/847353_NEO24_ExecSum.pdf
- CAF (2023). *El desarrollo de la industria del hidrógeno verde en América Latina*. Obtenido de Corporación Andina de Fomento: <https://www.caf.com/es/blog/el-desarrollo-de-la-industria-del-hidrogeno-verde-en-america-latina/>
- Cámara de Comercialización de Energía Eléctrica (2022). *Manual para certificación de hidrógeno*. Obtenido de <https://www.ccee.org.br/documents/80415/919444/Manual%20para%20a%20Certifica%C3%A7%C3%A3ode%20de%20Hidrog%C3%AAnio%20REV1.0-1.pdf/89258f1f-8159-4732-770e-59392b2bfad7>
- Cámara de Diputados de Argentina (2021). *Proyecto de Ley. Expediente 3601-D-2021*. Obtenido de <https://www.diputados.gob.ar/comisiones/permanentes/ceycombust/proyecto.html?exp=3601-D-2021>
- Cámara de Diputados de Argentina (2021). *Proyecto de Ley. Expediente 4574-D-2021*. Obtenido de <https://www.hcdn.gov.ar/diputados/mmaquieyra/proyecto.html?exp=4574-D-2021>
- CAMMESA (2024). *Datos de Generación Eléctrica*. Obtenido de (datos de enero a diciembre de 2023): <https://cammesaweb.cammesa.com/informe-sintesis-mensual/>
- Canal Energía (2022). *White Martins produce H2 verde certificado en Brasil*. Obtenido de <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53232008/white-martins-produz-h2-verde-certificado-no-brasil>
- Cebri y EPE (2023). *Carbon Neutrality 2050: Scenarios for an Efficient Transition in Brazil - Final Report of the Technical Cooperation*. Obtenido de https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-726/PTE_RelatorioFinal_EN_5JUN.pdf
- CELA (2024). *Índice LCOH Brasil: Costo Nivelado de Hidrógeno Verde y de Amoníaco en Brasil*. Obtenido de <https://cela.com.br/lcox/>
- CEN (2024). *Datos de Generación Eléctrica*. Obtenido de datos de enero a diciembre de 2023: <https://www.coordinador.cl/operacion/graficos/operacion-real/generacion-real/>
- CEN (2024). *Gráficos del SEN*. Obtenido de datos 1 de diciembre a 12 de diciembre de 2024: <https://www.coordinador.cl/graficos-del-sen/>
- Center on Global Energy Policy (2024). *National Hydrogen Strategies and Roadmap Tracker*. Obtenido de Columbia University: <https://www.energypolicy.columbia.edu/publications/national-hydrogen-strategies-and-roadmap-tracker/>
- CEPAL (2018). *Acuerdo regional sobre el acceso a la información, la participación pública y el acceso a la justicia*. Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/entities/publication/624ca75e-7b4e-4f1b-b314-1f9d27ee3245>

Ciclo del Carbono (s.f.). *Costos de la captura y almacenamiento de carbono*. Obtenido de https://www.ciclodelcarbono.com/costos_de_la_captura_y_almacenamiento_de_carbono

CIF (2023). *Programa de integración de energías renovables*. Obtenido de https://d2qx68gt0006nn.cloudfront.net/sites/cif_enc/files/2024-02/gcap_sc_4_06_brazil_rei_ip.pdf

CNCE (2024). *Informe Generación Renovable 2023*. Obtenido de https://apps.grupoice.com/CenceWeb/documentos/3/3008/20/INFORME_GENERACION_RENOVABLE_2023.pdf

Comité Gestor PNH2 (2023). *Plan de trabajo trienal 2023-2025*. Obtenido de <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/PlanodeTrabalhoTrienalPNH2.pdf>

Congreso de Colombia (2014). *Ley 1715*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=5735>

Congreso Nacional (2008). *Ley 20.241*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=268637&idVersion=2018-08-13&idParte=9240566>

Congreso Nacional de Chile (2021). *Ley 21.305 sobre eficiencia energética*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1155887>

Consejo de Gabinete (2020). *Resolución N° 93*. Obtenido de https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/29163_B/81944.pdf

Consejo Económico y Social - CES (2021). *Hacia una estrategia nacional de hidrógeno 2030*. Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/noticias/hacia-una-estrategia-nacional-de-hidrogeno-2030-un-documento-clave-para-el-desarrollo>

Consejo Nacional de Energía (2020). *Política Energética Nacional 2020-2050*. Obtenido de https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/foreplen_sesion4_elsalvador_0.pdf

Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca (2022). *El Puerto de Bahía Blanca avanza en la renovación de infraestructura*. Obtenido de <https://puertobahia blanca.com/novedades/el-puerto-de-bahia-blanca-avanza-en-la-renovacion-de-infraestructura.html>

Consorcio H2ar (s.f.). Obtenido de Más información del Consorcio H2ar: <https://consorcioh2ar.com.ar/>

CORFO (2023). *Gobierno presenta Fondo por US\$ 1.000 millones para el desarrollo del Hidrógeno Verde en Chile*. Obtenido de https://www.corfo.cl/sites/cpp/sala_de_prensa/nacional/19_06_2023_fondo_hidrogeno_verde

CORFO (19 de junio de 2023). *Gobierno presenta Fondo por USD 1.000 millones para el desarrollo del Hidrógeno Verde en Chile*. Obtenido de https://corfo.cl/sites/cpp/sala_de_prensa/nacional/19_06_2023_fondo_hidrogeno_verde

CORFO (11 de diciembre de 2024). *Alianza público-privada presenta el primer bus a hidrógeno hecho en Chile*. Obtenido de https://www.corfo.cl/sites/cpp/sala_de_prensa/nacional/11-12_2024_bus_hidrogeno_verde

CORFO (2024). *Centro Tecnológico para la Innovación en Hidrógeno Verde*. Obtenido de Armada de Chile ejecuta innovador proyecto apuntando a la transición energética

Diario El Salvador (2023). *Noticia sobre incursión en hidrógeno verde*. Obtenido de <https://diarioelsalvador.com/el-salvador-es-el-primer-pais-de-la-region-en-incursionar-en-el-hidrogeno-verde/321226/>

Ecopetrol (2021). *Producción de hidrógeno verde en Colombia*. Obtenido de <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/Noticias+2021/el-grupo-ecopetrol-inici-la-produccion-de-hidrogeno-verde-en-colombia>

EDP Brasil (19 de enero de 2023). *EDP presenta planta de hidrógeno verde en Ceará*. Obtenido de <https://brasil.edp.com/pt-br/news/2023/01/19/edp-apresenta-planta-de-hidrogenio-verde-no-ceara>

EIA. (2023). *Datos de Generación Eléctrica de Trinidad y Tobago en 2023*. Obtenido de <https://www.eia.gov/international/data/country/TTO/electricity/electricity-generation?pd=2&p=0000000000000000000000000000fuu000000000000000000000000000000u&u=0&f=A&v=mapbubble&a=-&i=None&o=value&t=C&g=None&l=249--228&s=315532800000&e=1672531200000>

ENAP (2024). *Enap expone avances en Hidrógeno verde al Presidente Boric*. Obtenido de <https://www.enap.cl/sala-de-prensa/enap-presents-progress-in-green-hydrogen-to-president-boric>

Enel Chile (2017). *Proyecto Cerro Pabellón Microgrid: Primer sistema plug-and-play alimentado por hidrógeno en Chile*. Obtenido de <https://www.enel.cl/en/meet-enel/media/news/d201705-enel-operates-worlds-first-plugin-and-play-micro-grid-powered-by-solar-pv-and-hydrogen-based-storage-in-chile.html>

Energía Estratégica (3 de noviembre de 2021). *Con 60 proyectos, Chile apuesta a exportar más hidrógeno que cobre*. Obtenido de <https://www.energiaestrategica.com/con-60-proyectos-chile-apuesta-a-exportar-mas-hidrogeno-que-cobre/>

Energía Estratégica (2024). *Proyecto JASEC: Hidrógeno Verde en Costa Rica*. Obtenido de <https://www.energiaestrategica.com/exclusiva-jasec-avanza-en-un-proyecto-de-hidrogeno-verde-pionero-en-costa-rica/>

ENGIE Chile (10 de agosto de 2023). *ENGIE junto a Walmart inauguran primera planta industrial de hidrógeno verde de Latinoamérica*. Obtenido de <https://www.engie.cl/engie-junto-a-walmart-inauguran-primera-planta-industrial-de-hidrogeno-verde-de-latinoamerica/>

EPE (2020). *Plan Nacional de Energía*. Obtenido de <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>

Esencial Costa Rica (s.f.). Obtenido de <https://www.esencialcostarica.com/>

Estas Sucediendo (2023). *A través del ecosistema científico SÉNECA, Uniguajira y Uniantioquia presentan resultados tangibles para incluir en la descarbonización del planeta*. Obtenido de <https://www.estasucediendo.com/a-traves-del-ecosistema-cientifico-seneca-uniguajira-y-uniantioquia-presentan-resultados-tangibles-para-incidir-en-la-descarbonizacion-del-planeta/>

Estrategia de Transición Justa en el Sector Energía (2021). *Ministerio de Energía*. Obtenido de https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/estrategia_transicion_justa_2021.pdf

Exame (2023). *Projeto é piloto, mas produção é recorde: Furnas alcança 1,5 tonelada de hidrogênio verde*. Obtenido de <https://exame.com/insight/projeto-e-piloto-mas-producao-e-recorde-furnas-alcanca-15-tonelada-de-hidrogenio-verde/p>

FURNAS (2023). *Planta de generación de hidrógeno verde es inaugurada por FURNAS en Itumbiara (MG)*. Obtenido de <https://www.furnas.com.br/noticia/103/noticias/1759>

Garip, P. (2024). *Por qué los EE. UU. y China están de ojo en el puerto más remoto de Chile*. Obtenido de Americas Quarterly: <https://americasquarterly.org/article/por-que-os-eua-e-a-china-estao-de-olho-no-porto-mais-remoto-do-chile/>

GIZ (2022). *Guía para la adopción de garantías de origen para el hidrógeno verde*. Obtenido de https://h2mex.org/wp-content/uploads/Guia_para_la_adopcion_de_garantias_de_origen_para_el_hidrogeno_verde_en_Mexico.pdf

- GlZ (2023). *Análisis de la disponibilidad de CO2 para la producción de derivados de hidrógeno verd.* Obtenido de <https://h2lac.org/wp-content/uploads/2024/03/Analisis-de-la-disponibilidad-de-CO2-H2V-Uruguay.pdf>
- GlZ (2023). *Evaluación ambiental asociada al desarrollo de la cadena de valor de hidrógeno verde.* Obtenido de <https://h2lac.org/wp-content/uploads/2023/06/1.-TORs-aspectos-ambientales.pdf>
- GlZ. (2024). *Hacia una estrategia de hidrógeno renovable para la República Dominicana.* Obtenido de <https://h2lac.org/wp-content/uploads/2024/02/Hacia-Estrategia-Nacional-H2V-repdom.pdf>
- Gobierno de Argentina (2002). *Ley 25.675.* Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-25675-79980/texto>
- Gobierno de Chile (2020). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde.* Obtenido de https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf
- Gobierno de Costa Rica (2019). *Plan Nacional de Descarbonización.* Obtenido de <https://cambioclimatico.minae.go.cr/plan-nacional-de-descarbonizacion/#:~:text=PLAN%20NACIONAL%20DE%20DESCARBONIZACI%C3%93N%20Costa%20Rica%20lanz%C3%B3%20su,estos%2010%20ejes%20claves%20y%20estas%20estrategias%20transversales>
- Gobierno de España (2019). *Estrategia de transición justa.* Obtenido de https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/ministerio/planes-estrategias/transicion-justa/Estrategia_Transicion_Justa_Def.PDF
- Gobierno de Trinidad y Tobago (2018). *Política Nacional de Medio Ambiente.* Obtenido de <https://www.planning.gov.tt/sites/default/files/National%20Environmental%20Policy%20%28NEP%29%20T%26T%202018.pdf>
- Gobierno de Trinidad y Tobago (2022). *Just Transition Draft Policy for an Equitable Low Carbon Future.* Obtenido de <https://justtransitionforall.com/wp-content/uploads/2022/03/Trinidad-Tobago-Govt-Draft-Just-Transition-Policy.pdf>
- Gobierno del Estado de Ceará (2023). *Lanzada en Ceará la primera molécula de hidrógeno verde producida en Brasil.* Obtenido de <https://www.ceara.gov.br/2023/01/19/primeira-molecula-de-hidrogenio-verde-produzida-no-brasil-e-lancada-no-ceara/>
- Gobierno del Estado de Ceará (2024). *Con precontrato firmado, FRV proyecta cerca de R\$ 27 mil millones en inversión para producción de hidrógeno verde en Ceará.* Obtenido de <https://www.ceara.gov.br/2024/06/12/com-pre-contrato-assinado-frv-projeta-cerca-de-r-27-bilhoes-em-investimento-para-producao-de-hidrogenio-verde-no-ceara/>
- Gobierno Nacional de Panamá (2023). *Resolución de Gabinete N° 70.* Obtenido de https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/29823_A/GacetaNo_29823a_20230712.pdf
- Henríquez, M. (2024). *Milei se frota las manos: el pelotazo que prepara la UE para la energía del futuro.* Obtenido de HuffPost España: <https://www.huffingtonpost.es/global/milei-frota-manos-pelotazo-prepara-ue-energia-futuro.html>
- HIF Global (s.f.). *Proyecto Haru Oni, fase 1: Innovación en combustibles sintéticos.* Obtenido de <https://es.hifglobal.com/haru-oni>
- Hinico (2021). *Deliverable: Study on the Possibilities to Produce, Use, and Export "Green" Hydrogen in Costa Rica.* Obtenido de https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2021/06/HINICIO_H2-production-use-and-export-in-Costa-Rica_study.pdf

- Hinico (2024). *Results of the 4th H2LAC Index: Official Results.* Obtenido de https://hinico.com/wp-content/uploads/2024/06/Hinico_H2LAC-Index-2024_Official-Results.pdf
- Hinico y New Energy (2024). *Índice H2LAC: Evaluación del desarrollo del mercado del hidrógeno en América Latina y el Caribe.* Obtenido de <https://h2lacindex.com/es/>
- Hinico y Newenergy (2024). *Índice de hidrógeno para América Latina y El Caribe.* Obtenido de <https://h2lacindex.com/es/#about>
- Honorable Congreso de la Nación Argentina (2006). *Ley 26.123 de Promoción del Hidrógeno.* Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-26123-119162>
- Hychico S.A. (s.f.). *Planta de Hidrógeno.* Obtenido de <https://hychico.com.ar/planta-de-hidrogeno/>
- Hydrogen Council (2021). *Hydrogen Insights 2021: A Perspective on Hydrogen Investment, Deployment and Cost Competitiveness.* Obtenido de <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-for-Net-Zero.pdf>
- Hydrogen Council (2023). *Hydrogen Insights 2023.* Obtenido de <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/12/Hydrogen-Insights-Dec-2023-Update.pdf>
- Iberdrola (s.f.). *Diferencia entre hidrógeno verde y azul.* Obtenido de <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde/diferencia-hidrogeno-verde-azul>
- ICCT (2024). *The Price of Green Hydrogen: How and Why We Estimate Future Production Costs.* Obtenido de <https://theicct.org/the-price-of-green-hydrogen-estimate-future-production-costs-may24/#:~:text=The%20ICCT's%20central%20estimates%20of,the%20range%20in%20the%20literature>
- IEA (2021). *Global Hydrogen Review 2021.* Obtenido de https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf
- IEA (2023a). *Global Hydrogen Review 2023.* Obtenido de https://iea.blob.core.windows.net/assets/9a698da4-4002-4e53-8ef3-631d8971bf84/NetZeroRoadmap_AGlobalPathwaytoKeepthe1.5CGoalinReach-2023Update.pdf
- IEA (2023b). *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1,5°C Goal in Reach.* Obtenido de https://iea.blob.core.windows.net/assets/9a698da4-4002-4e53-8ef3-631d8971bf84/NetZeroRoadmap_AGlobalPathwaytoKeepthe1.5CGoalinReach-2023Update.pdf
- IEA (2024). *World Energy Outlook 2024.* Obtenido de <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- IEA (2024a). *Global Hydrogen Review 2024.* Obtenido de <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>
- IEA (2024b). *Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database (última corrección en octubre de 2024).* Obtenido de <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database#schedule>
- IEA (2024c). *Datos de Generación Eléctrica.* Obtenido de datos de enero a diciembre de 2023: <https://www.iea.org/data-and-statistics>
- IPEA (2022). *Panorama de hidrógeno en Brasil.* Obtenido de https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf
- IRENA (2021). *World Energy Transitions Outlook: 1,5°C Pathway.* Obtenido de https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2021.pdf

- IRENA (2024a). *World Energy Transitions Outlook 2024*. Obtenido de <https://www.irena.org/Publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024>
- IRENA (2024b). *Shaping Sustainable International Hydrogen Value Chain*. Obtenido de https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Shaping_sustainable_hydrogen_value_chains_2024.pdf
- Jefatura de Gabinete de Ministros (2020). *Segunda Contribución Determinada a Nivel Nacional - Actualizada*. Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/cambio-climatico/contribucion-nacional#:~:text=Las%20Contribuciones%20Determinadas%20a%20Nivel%20Nacional%20%28NDC%2C%20por,impactos%20producidos%20por%20ese%20fen%C3%B3meno%20%28acciones%20de%20adaptaci%C3%B3n%29>
- La República (27 de julio de 2022). *Hevolución desarrollará planta para producir 1.000 kg de hidrógeno a partir de 2023*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/empresas/hevolucion-desarrollara-planta-para-producir-1-000-kg-de-hidrogeno-a-partir-de-2023-3404792#:~:text=La%20primera%20estar%C3%A1%20en%20funcionamiento,clientes%20corporativos%20con%20fines%20industriales>
- La República (2023). *Estimaciones de la demanda interna del hidrógeno en Colombia entre 2030 y 2050*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/especiales/avance-en-el-hidrogeno-verde/epm-supera-seis-meses-con-piloto-de-produccion-de-hidrogeno-3955040>
- La República (2023). *Informe de reservas de petróleo y gas de Colombia en 2023*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/economia/informe-de-reservas-de-petroleo-y-gas-de-colombia-en-2023-3867469>
- LAC Clean Hydrogen Action (2024). *Renewable Hydrogen in Latin America and the Caribbean: Opportunities, Challenges, and Pathways*. Obtenido de <https://alianzaporelhidrogeno.cr/wp-content/uploads/2023/08/2023-Renewable-Hydrogen-in-Latin-America-and-The-Caribbean-Opportunities-Challenges-and-Pathways.pdf>
- McKinsey & Company (2024). *Global Energy Perspective 2024*. Obtenido de <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-hydrogen-outlook>
- MDIC (2024). *Aprovado o maior projeto de produção de hidrogênio verde em larga escala do país*. Obtenido de <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/outubro/aprovado-o-maior-projeto-de-producao-de-hidrogenio-verde-em-larga-escala-do-pais>
- MIEM (2022). *Resolución 294/2022*. Obtenido de <https://www.impo.com.uy/bases/resoluciones/294-2022>
- MIEM (2023). *Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde y Derivados*. Obtenido de https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/noticias/Hoja%20de%20ruta%20H2%20Uruguay_final.pdf
- MIEM (2024). *Análisis de las necesidades regulatorias para el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde y derivados*. Obtenido de <https://h2lac.org/wp-content/uploads/2024/03/Proyectos-h2v-y-derivados-UY.pdf>
- Ministerio de ambiente (2021). *Estrategia climática de largo plazo*. Obtenido de <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/estrategia-climatica-largo-plazo-uruguay>
- Ministerio de Ambiente de Uruguay (2023). *Hidrógeno Verde: Informe Adjunto 1*. Obtenido de https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/2023-11/Adjunto_1_Hidrogeno_Verde_Gonz%C3%A1lez_MIEM_0.pdf

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2022). *Estrategia de Desarrollo Resiliente con Bajas Emisiones a Largo Plazo a 2050*. Obtenido de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/estrategia_de_desarrollo_resiliente_con_bajas_emisiones_a_largo_plazo_2050.pdf
- Ministerio de Ambiente y Energía (2022). *Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde 2022-2050*. Obtenido de <https://h2lac.org/wp-content/uploads/2023/08/Estrategia-Nacional-de-H2-Verde-Costa-Rica.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica (2023). *Demanda de Hidrógeno Verde: Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Costa Rica*. Obtenido de <https://h2lac.org/wp-content/uploads/2023/08/Estrategia-Nacional-de-H2-Verde-Costa-Rica.pdf>
- Ministerio de Capital Humano (2022). *Cursos de Formación Profesional para la obtención de hidrógeno verde en Río Negro*. Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/noticias/cursos-de-formacion-profesional-para-la-obtencion-de-hidrogeno-verde-en-rio-negro>
- Ministerio de Ciencia, Energía, Telecomunicaciones y Transporte (2023). *Plan Integrado de Recursos de Jamaica*. Obtenido de <https://www.mset.gov.jm/wp-content/uploads/2024/11/2022-Jamaica-Integrated-Resource-Plan.pdf>
- Ministerio de ciencia, tecnología e innovación (2022). *Iniciativa Brasileira de Hidrogênio (IBH2)*. Obtenido de <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2022/07/iniciativa-brasileira-de-hidrogenio-ibh2-e-publicada-pelo-mcti>
- Ministerio de Energía (2023). *Plan de Descarbonización*. Obtenido de <https://energia.gob.cl/panel/plan-de-descarbonizacion>
- Ministerio de Energía de Chile (2020). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde*. Obtenido de https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf
- Ministerio de Energía de Chile (18 de agosto de 2022). *Seremi de Energía resalta primera planta del país que inyecta hidrógeno verde en redes de gas natural de la Serena y Coquimbo*. Obtenido de <https://energia.gob.cl/noticias/coquimbo/seremi-de-energia-resalta-primera-planta-del-pais-que-inyecta-hidrogeno-verde-en-redes-de-gas-natural-de-la-serena-y-coquimbo>
- Ministerio de Energía de Chile (2024). *Plan de Acción de Hidrógeno Verde*. Obtenido de https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/plan_de_accion_hidrogeno_verde_2023-2030.pdf
- Ministerio de Energía e Industrias Energéticas (2022). *Hoja de ruta para una economía de hidrógeno verde en Trinidad y Tobago*. Obtenido de <https://publications.iadb.org/en/publications/english/viewer/The-roadmap-for-a-green-hydrogen-economy-in-Trinidad-and-Tobago.pdf>
- Ministerio de Energía e Industrias Energéticas de Trinidad y Tobago (2021). *Hoja de Ruta del Hidrógeno de Trinidad y Tobago: La hoja de ruta para una economía de hidrógeno verde en Trinidad y Tobago*. Obtenido de <https://publications.iadb.org/en/roadmap-green-hydrogen-economy-trinidad-and-tobago>
- Ministerio de Energía y Minas (2009). *Política Nacional de Energías Renovables*. Obtenido de https://www.mset.gov.jm/wp-content/uploads/2019/07/National-Energy-Policy_0.pdf
- Ministerio de Energía y Minas (2021). *Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia*. Obtenido de https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf

- Ministerio de Energía y Minas (2021). *Resolución N° 6 de 20 de abril de 2021*. Obtenido de https://www.gov.br/mme/pt-br/resoluescnpe6_2021.pdf
- Ministerio de Energía y Minas (2022). *Resolución 40.045*. Obtenido de <https://fenoge.gov.co/wp-content/uploads/2022/02/Manual-operativo-40045-de-2022.pdf>
- Ministerio de Energía y Minas (2023). *Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde*. Obtenido de <https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/Hoja-de-Ruta-del-Hidrogeno-Verde-en-Ecuador.pdf>
- Ministerio de Energía y Minas (2023). *Plan de Trabajo Trienal*. Obtenido de <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/PlanodeTrabalhoTrienalPNH2.pdf>
- Ministerio de Industria, Energía y Minería (2024). *Hoja de ruta del hidrógeno verde y derivados*. Obtenido de <https://www.impo.com.uy/bases/resoluciones/294-2022>
- Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay (2024a). *Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde y Derivados en Uruguay*. Obtenido de https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/noticias/Hoja%20de%20ruta%20H2%20Uruguay_final.pdf
- Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay (2024b). *Actualización de la Agenda de Desarrollo del H2 Verde y Derivados en Uruguay*. Obtenido de <https://h2lac.org/wp-content/uploads/2023/12/Hoja-de-Ruta-UR-2023.pdf>
- Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay (16 de septiembre de 2024c). *Proyectos de hidrógeno verde y derivados en Uruguay*. Obtenido de <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/politicas-y-gestion/proyectos-hidrogeno-verde-derivados-uruguay>
- Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay (s.f.). *Programa H2U: Hidrógeno Verde y su Desarrollo*. Obtenido de <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/politicas-y-gestion/programa-h2u>
- Ministerio de Minas y Energía (2021). *Programa Nacional de Hidrógeno. Propuesta de Directrices*. Obtenido de <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrognoRelatriodiretrizes.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía (2022). *Resolución N° 6 de 2022*. Obtenido de https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2022/res_cnpe-6-2022.pdf
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2021). *Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia*. Obtenido de https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja_Ruta_Hidrogeno_Colombia_2810.pdf
- Ministerio de Minas y Energía (s.f.). *Programa Nacional de Hidrógeno - PNH2*. Obtenido de <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1>
- Ministerio de obras públicas y comunicaciones (2016). *Decreto 6092/2016*. Obtenido de <https://informacionpublica.paraguay.gov.py/public/2216570-DecretoN6092pdf-DecretoN6092.pdf>
- Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (2024). *Llamado para la elaboración de estudios prospectivos de mercado laboral en la cadena de hidrógeno verde y derivados*. Obtenido de <https://www.gub.uy/ministerio-trabajo-seguridad-social/comunicacion/convocatorias/llamado-para-elaboracion-estudios-prospectivos-mercado-laboral-cadena>

- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023). *Segunda Edición de H2 Pioneros*. Obtenido de <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2023/11/miteco-adjudica-150-millones-segunda-edicion-h2-pioneros-12-nuevos-proyectos-hidrogeno-renovable.html>
- Ministry of Energy and Water Resources (2019). *Política Energética Nacional de Barbados 2019-2030*. Obtenido de <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00883.pdf>
- MME (2024). *Alexandre Silveira anuncia R\$ 6 bilhões em investimentos para descarbonização da indústria por meio de hubs de hidrogênio*. Obtenido de <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/alexandre-silveira-anuncia-r-6-bilhoes-em-investimentos-para-descarbonizacao-da-industria-por-meio-de-hubs-de-hidrogenio>
- Movimento Econômico (29 de octubre de 2024). *Grupo noruego quiere implantar planta de H₂V de R\$ 9 mil millones en la ZPE de Pecém*. Obtenido de <https://movimientoeconomico.com.br/economia/energia/2024/10/29/grupo-noruegues-quer-implantar-usina-de-h2v-de-r-9-bi-na-zpe-de-pecem/>
- Naciones Unidas (2015). *Acuerdo de París*. Obtenido de https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf
- NewGen Energy Ltd. (s.f.). *The Project NewGen*. Obtenido de <https://newgenenergyltd.com/the-project/>
- OLADE (2022). *Panorama Energético de América Latina y el Caribe 2022*. Obtenido de <https://www.olade.org/wp-content/uploads/2023/01/Panorama-ALC-13-12-2022.pdf>
- Oliveira, R. (2022). *Panorama do hidrogênio no Brasil*. Obtenido de Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA - Texto para Discussão 2787: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf
- ON. (2023). *Generación de Energía Eléctrica*. Obtenido de datos de enero a diciembre de 2023: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao-energia.aspx>
- Organización Internacional del Trabajo (2016). *Directrices de política para una transición justa*. Obtenido de https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/%40ed_emp/%40emp_ent/documents/publication/wcms_432865.pdf
- Paracelsius (s.f.). *Atacama Hidrógeno Hub*. Obtenido de <https://atacamahydrogenhub.com/#process>
- Periódico La Patria (2023). *Presentación del proyecto de Ley N0. 170-23*. Obtenido de <https://lapatria.bo/2024/05/22/propuesta-de-ley-promueve-desarrollo-del-hidrogeno-verde-en-bolivia/>
- Petrobras (3 de octubre de 2024). *Petrobras informa sobre el descubrimiento de gas en Colombia*. Obtenido de Agencia Petrobras: <https://agencia.petrobras.com.br/w/negocio/petrobras-informa-sobre-descoberta-de-gas-na-colombia-1#:~:text=A%20Petrobras%2C%20em%20continuidade%20aos,%C3%A9%20de%20cerca%20de%206>
- Plan de Transición Socioecológica Justa de Tocopilla (2023). *Ministerio de Energía*. Obtenido de https://energia.gob.cl/sites/default/files/mini-sitio/plan-tocopilla-final_01052024.pdf
- Plataforma H2 Argentina (2020). *Plataforma H2 Argentina*. Obtenido de <https://www.plataformah2.org/plataforma/>
- Plataforma H2LAC (2024). *Atlas H2LAC: Plataforma para el Desarrollo del Hidrógeno Verde en Latinoamérica y el Caribe*. Obtenido de <https://h2lac.org/atlas-h2lac-old/>

- Plataforma H2LAC (s.f.). *Memorando de Entendimiento: Corredor de Hidrógeno Verde entre Colombia y el Puerto de Rotterdam*. Obtenido de <https://h2lac.org/noticias/colombia-y-puerto-de-rotterdam-firman-memorando-para-un-corredor-de-hidrogeno-verde/>
- PNUD (2023). *Potencial industrial de México en las cadenas de valor del hidrógeno verde*. Obtenido de <https://h2mex.org/wp-content/uploads/PNUD-Potencial-inustrial-de-Mexico-en-las-cadenas-de-valor-del-H2-Verde.pdf>
- Porto do Açu (2022). *Shell Brasil y Porto do Açu anuncian proyecto inédito en hidrógeno verde*. Obtenido de <https://portodoacu.com.br/shell-brasil-e-porto-do-acu-anunciam-projeto-inedito-em-hidrogenio-verde/>
- Porto do Açu (2024). *Prumo y Fuella AS anuncian el primer contrato de reserva de área para el hub de hidrógeno en el Puerto de Açu*. Obtenido de <https://portodoacu.com.br/prumo-e-fuella-as-anunciam-primeiro-contrato-de-reserva-de-area-para-hub-de-hidrogenio-no-porto-do-acu/>
- Presidencia de la Nación (1998). *Ley N° 16906 de inversiones y promoción industrial*. Obtenido de <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/16906-1998>
- Presidencia de la Nación (2021). *Fortescue invertirá USD8.400 millones en el país para la producción de hidrógeno verde*. Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/noticias/fortescue-invertira-usd8400-millones-en-el-pais-para-la-produccion-de-hidrogeno-verde>
- Presidencia de la Nación (2021). *Ley de transición energética*. Obtenido de <https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY%202099%20DEL%2010%20DE%20JULIO%20DE%202021.pdf>
- Presidencia de la Nación (2024). *Decreto 749/2024*. Obtenido de <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/312707/20240823>
- Presidencia de la República (2016). *Decreto 8.874/2016*. Obtenido de <https://www.gov.br/transportes/pt-br/pt-br/centrais-de-conteudo/decreto-n-8-874-de-11out2016-pdf>
- Presidencia de la República (2024). *Decreto 2553*. Obtenido de <https://www.vouga.com.py/wp-content/uploads/2024/09/DECRETO2553.pdf>
- Presidencia de la República (2024). *Ley 14.990*. Obtenido de <https://www.in.gov.br/web/dou/-/lei-n-14.990-de-27-de-setembro-de-2024-587295494>
- Presidencia de la República (2024). *Ley 31.992 de fomento del hidrógeno verde*. Obtenido de <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/archivos/public/docs/Ley%2031992%20-%20hidrogeno%20verde.PDF>
- Presidencia de la República (2024). *Ley N° 14.948*. Obtenido de https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2023-2026/2024/lei/L14948.htm
- Presidencia de la República Oriental del Uruguay (2023). *Estado uruguayo afrontó el mayor déficit hídrico de los últimos 74 años*. Obtenido de <https://www.gub.uy/presidencia/comunicacion/noticias/estado-uruguayo-afronto-mayor-deficit-hidrico-ultimos-74-anos>
- Presidente de la República y Ministra de Ambiente y Energía (2022). *Decreto N° 43.366*. Obtenido de <https://vlex.co.cr/vid/presidente-republica-ministra-ambiente-879649488>
- Promigas (2022). *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/](https://nатурgas.com.co/con-planta-piloto-en-cartagena-promigas-produce-15-toneladas-de-hidrogeno-verde/)
- Review Energy (2023). *Cuáles son los principales lugares para el desarrollo del hidrógeno verde en Chile?* Obtenido de <https://www.review-energy.com/hidrogeno/-cuales-son-los-principales-lugares-para-el-desarrollo-del-hidrogeno-verde-en-chile>

- Saraiva, M. (2024). *Setor do Hidrogênio verde no Brasil e desenvolvimento do mercado*. Obtenido de <https://h2lac.org/wp-content/uploads/2024/07/Apresentacao-Women-in-Green-Hydrogen-03.07.24-Monica-Saraiva.pdf>
- Secretaría de Asuntos Estratégicos (2023). *Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Economía del Hidrógeno. Planes de Acción*. Obtenido de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2023/07/enh_planesdeaccion2023.pdf
- Secretaría de Asuntos Estratégicos (2023). *Estrategia Nacional para el Desarrollo de una Economía del Hidrógeno*. Obtenido de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2023/07/estrategia_nacional_de_hidrogeno_-_sae.pdf
- Secretaría de Asuntos Estratégicos de Argentina (2023). *Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Economía del Hidrógeno*. Obtenido de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2023/07/estrategia_nacional_de_hidrogeno_-_sae.pdf
- Secretaría de Asuntos Estratégicos (2023). *Evaluación ambiental estratégica de la economía del hidrógeno*. Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2023/09/resultadospreliminarseae2023.pdf>
- Secretaría de Energía (2023). *Resolución 517/2023. Plan Nacional de Transición Energética a 2030*. Obtenido de <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/289826/20230707#:~:text=Que%20en%20consecuencia%2C%20se%20elabor%C3%B3%20el%20E2%80%9CPlan%20Nacional,de%20las%20Naciones%20Unidas%20contra%20el%20Cambio%20Clim%C3%A1tico>
- Secretaría de Energía (2024). *Lineamientos en materia de hidrógeno*. Obtenido de <https://www.gob.mx/sener/articulos/lineamientos-en-materia-de-hidrogeno>
- Secretaría Nacional de Energía (2022). *Resolución N° MIPRE-222-002354*. Obtenido de https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/29461_A/89680.pdf
- Senado Federal (2022). *Disciplina a inserção do hidrogênio como fonte de energia no Brasil*. Obtenido de <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=9096609&ts=1730189236903&disposition=inline>
- Senado y Cámara de Diputados de la Nación Argentina (2024). *Ley 27742*. Obtenido de <https://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/400000-404999/401266/norma.htm>
- Thunder Said Energy (s.f.). *Global Hydrogen Supply & Demand by Region, by Use, Over Time 2021*. Obtenido de <https://thundersaidenergy.com/downloads/global-hydrogen-supply-demand-by-region-by-use-over-time/>
- Toyota Chile (s.f.). *Proyecto H₂V Toyota Chile: Primera planta de producción y suministro de hidrógeno en Chile*. Obtenido de <https://www.toyota.com.ar/descubri/newsroom/noticias-de-argentina/toyota-inauguro-la-primera-planta-de-produccion-y-suministro-de-hidrogeno-de-chile>
- UPME (s.f.). *Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014*. Obtenido de https://www1.upme.gov.co/Documents/Cartilla_IGE_Incentivos_Tributarios_Ley1715.pdf
- UTE (2024). *Datos de Generación Eléctrica*. Obtenido de datos de enero a octubre de 2024: https://apps.ute.com.uy/sge/portal/nucleo/paginas/portal_utei.aspx?c=GerEyM_HistoricoCompEner
- Viceministerio de Minas y Energía (2021). *Hacia la ruta del hidrógeno verde en Paraguay*. Obtenido de <https://minasyenergia.mopc.gov.py/>

INTRODUCCIÓN

- CAP/01
- CAP/02
- CAP/03
- CAP/04
- CAP/05
- CAP/06
- CAP/07
- CAP/08

Viceministerio de Minas y Energía (2021). *Hacia la ruta del hidrógeno verde en Paraguay. Marco conceptual*. Obtenido de https://minasyenergia.mopc.gov.py/index.php?option=com_content&view=article&id=2064&Itemid=580

Viceministerio de Minas y Energía (2021). *Hacia la ruta del hidrógeno verde en Paraguay. Propuesta de innovación*. Obtenido de https://minasyenergia.mopc.gov.py/index.php?option=com_content&view=article&id=2064&Itemid=580

WEF (2024). *Accelerating the Clean Hydrogen Economy in Latin America*. Obtenido de https://www3.weforum.org/docs/WEF_Accelerating_the_Clean_Hydrogen_Economy_in_Latin_America_2024.pdf

World Hydrogen Latin America (2023). *Hdrogen Market Updates from Across Latin America*. Obtenido de <https://drive.google.com/file/d/1J1CAFkPSdvgjm14WcvlldNlcvTf5Q0xG/view>

XM (2024). *Datos de Capacidad Efectiva*. Obtenido de <https://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>



GLOSARIO

BaU (Business-as-Usual): escenario basado en la continuidad de las políticas y tendencias actuales, sin grandes cambios en los esfuerzos de descarbonización. Se caracteriza por metas alcanzadas con retraso y la adopción limitada de tecnologías limpias.

CCUS (Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono): tecnología para capturar, almacenar o reutilizar CO₂ emitido durante procesos industriales o energéticos.

Combustibles derivados de hidrógeno: productos obtenidos a partir de hidrógeno, como amoníaco, metanol y combustibles sostenibles para la aviación (SAF).

Demanda de hidrógeno limpio: sectores principales que consumen hidrógeno, como refinación de petróleo, fertilizantes, acero y transporte.

Economía del hidrógeno: conjunto de actividades económicas e infraestructuras relacionadas con la producción, distribución y uso del hidrógeno como fuente energética limpia.

Electrolizador: equipo que realiza la electrólisis, separando agua en hidrógeno y oxígeno.

Electrolizador ALK (Alcalino): usa una solución alcalina como electrolito, común en instalaciones grandes.

Electrolizador PEM (Proton Exchange Membrane): utiliza membranas de intercambio de protones para mayor flexibilidad.

Energías renovables: fuentes sostenibles como solar, eólica e hidráulica utilizadas para la producción de hidrógeno verde.

GEI (Gases de Efecto Invernadero): compuestos como CO₂, CH₄ y N₂O que retienen calor en la atmósfera y contribuyen al calentamiento global.

Hidrógeno azul: producido con captura de carbono.

Hidrógeno de bajas emisiones: hidrógeno producido con tecnologías que reducen significativamente las emisiones de GEI, incluyendo variantes como: hidrógeno verde, hidrógeno azul, hidrógeno turquesa, hidrógeno rosa.

Hidrógeno rosa: utiliza energía nuclear en su proceso de producción.

Hidrógeno turquesa: resultante de la pirólisis del metano, generando carbono sólido.

Hidrógeno verde: obtenido mediante electrólisis usando electricidad renovable.

Hubs de hidrógeno: centros estratégicos para la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno, optimizando costos y operaciones.

LCOH (Levelized Cost of Hydrogen): costo nivelado de producción del hidrógeno, considerando todos los gastos a lo largo de la vida útil del proyecto.

Metanol verde: combustible limpio producido a partir de hidrógeno verde y CO₂ capturado.

Neutralidad de carbono: estado en el que las emisiones de carbono se compensan por completo mediante reducciones o capturas, logrando emisiones netas cero.

NZE (Escenario de Emisiones Netas Cero): escenario que busca limitar el calentamiento global a 1,5 °C mediante una transición energética ambiciosa, con casi toda la demanda energética cubierta por fuentes bajas en carbono para 2050.

SAF (Sustainable Aviation Fuel): combustible sostenible para la aviación, derivado del hidrógeno verde.

STEPS (Escenario de Políticas Declaradas): escenario que refleja políticas y compromisos vigentes, con un ritmo moderado de transición energética y crecimiento limitado de tecnologías limpias.

TE (Escenario de Transición Energética): escenario que proyecta esfuerzos acelerados para alcanzar metas globales de descarbonización, incluyendo la adopción intensiva de tecnologías limpias y la integración de energías renovables.

MRC Consultants and Transaction Advisers

Paseo de la Castellana 123, ESC DCH 5B, Madrid, España

seureca.veolia.com

PSR Energy Consulting and Analytics

Praia de Botafogo, 370 - sl 101 - Botafogo, Rio de Janeiro - RJ, 22250-040, Brasil

psr-inc.com

