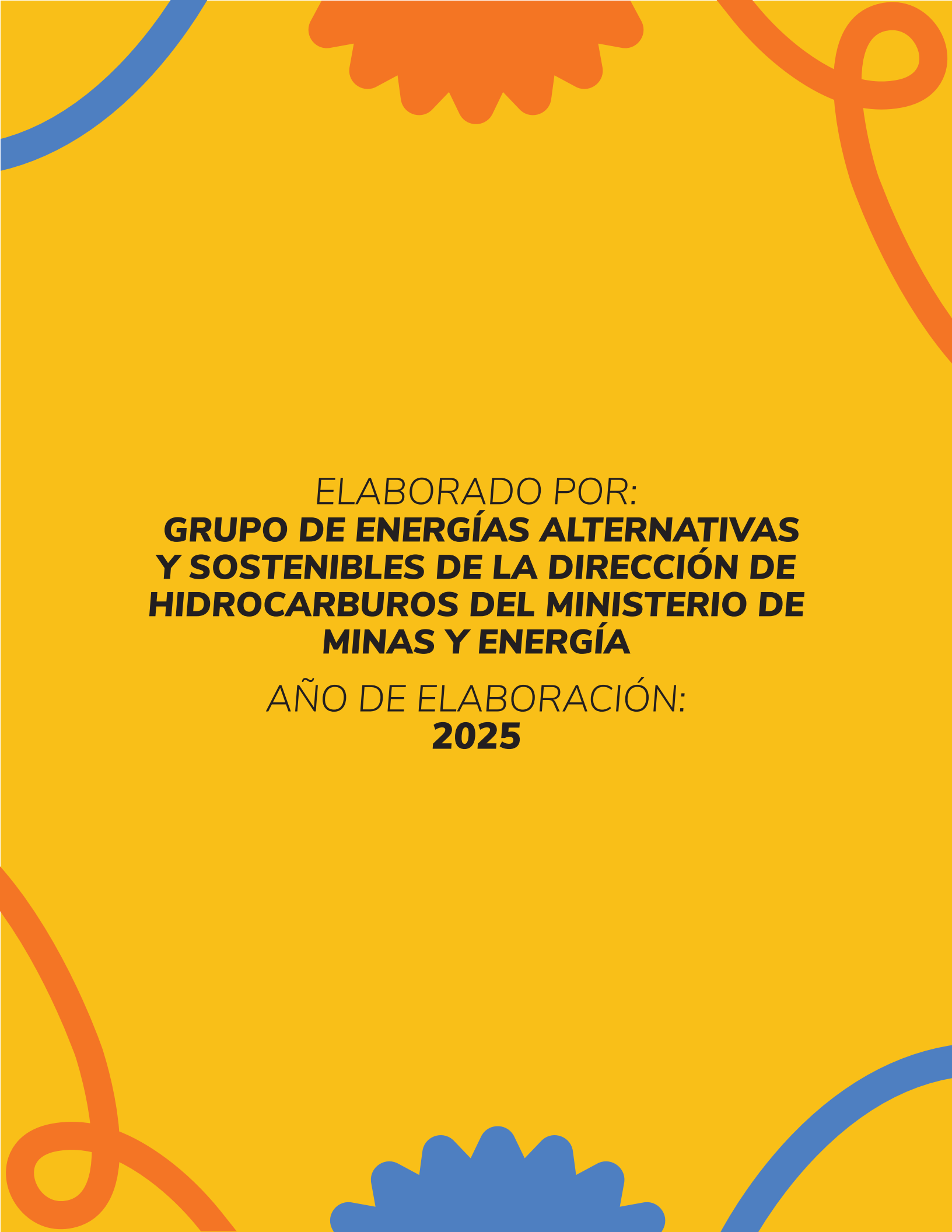




ENERGÍA QUE IMPULSA:

LA ERA DEL HIDRÓGENO
EN COLOMBIA

H₂



ELABORADO POR:
**GRUPO DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS
Y SOSTENIBLES DE LA DIRECCIÓN DE
HIDROCARBUROS DEL MINISTERIO DE
MINAS Y ENERGÍA**

AÑO DE ELABORACIÓN:
2025

TABLA DE CONTENIDO

COLOMBIA ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO	3
NUESTRA ENERGÍA HOY: ¿EFICIENTE Y LIMPIA?.....	6
TRANSICIÓN ENERGÉTICA: EL CAMINO YA EMPEZÓ	10
EL HIDRÓGENO EN LA TEJ: UNA NUEVA ERA PARA COLOMBIA	12
HIDRÓGENO DE BAJAS EMISIONES: MOTOR DEL CAMBIO.....	17
HIDRÓGENO Y COSTOS: ¿CUÁNTO VALE EL FUTURO?	19
HIDRÓGENO GEOLÓGICO: ENERGÍA DESDE LAS PROFUNDIDADES.....	21
¿PARA QUÉ SIRVE EL HIDRÓGENO? USOS EN LA VIDA REAL	25
FERTILIZANTES VERDES: SEMBRANDO AUTOSUFICIENCIA	28
CIELOS LIMPIOS-AVIACIÓN PARA LA VIDA	32
PUERTOS DEL CARIBE: MOTORES DE DESCARBONIZACIÓN	34
AVANCES CONCRETOS: DEL PLAN A LA ACCIÓN	36
RETOS Y PERSPECTIVAS	41
NUESTRO PRIMER PASO: AMONÍACO VERDE	42
OTRO HITO: ECOPETROL Y LA CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE HIDRÓGENO CON TECNOLOGÍA DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO	
PROTÓNICO (PEM) MÁS GRANDE DE AMÉRICA LATINA.....	43
PILOTOS QUE ABREN CAMINO	45
ECOSISTEMA H2 COLOMBIA: LA PLATAFORMA DE TODOS	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

ENERGÍA QUE IMPULSA: **LA ERA DEL HIDRÓGENO EN COLOMBIA**

“ Colombia está viviendo la mayor transformación energética de su historia. Como ministro de Minas y Energía, los invito a descubrir en estas páginas por qué el hidrógeno se ha convertido en un vector energético clave para nuestra Transición Energética Justa y cómo cada colombiana y colombiano puede ser parte de este cambio. ”

Ministro Edwin Palma Egea

El ecosistema de hidrógeno en Colombia está integrado por el conjunto de actores públicos y privados, marcos normativos, instrumentos de política pública, capacidades tecnológicas, proyectos, mecanismos de financiamiento, así como actividades de investigación e innovación que abarcan toda la cadena de valor del hidrógeno. Este ecosistema busca establecer las condiciones habilitantes para el desarrollo de un mercado nacional de hidrógeno, en coherencia con las metas definidas en las Hojas de Ruta del Hidrógeno y los objetivos de la Transición Energética Justa.

La Hoja de Ruta del Hidrógeno (2021) y la Hoja de Ruta de la Transición Energética Justa (2025) comparten el propósito de transformar la matriz energética nacional, promoviendo la descarbonización, la reindustrialización y la equidad territorial. La primera planteó metas para el horizonte 2030, como el desarrollo de capacidad de electrólisis, la atracción de inversiones, la reducción de emisiones y la generación de empleo; mientras que la segunda busca articular estos esfuerzos dentro de una transición energética inclusiva y sostenible, aprovechando el potencial hídrico, solar y eólico de clase mundial con el que cuenta Colombia.

Hoy, gracias al trabajo conjunto con universidades, empresas, gremios y otras entidades públicas, el ecosistema registra cerca de 40 proyectos en diferentes fases de desarrollo y una inversión proyectada cercana a US\$ 40 mil millones. Entre los hitos destacan el proyecto Coral de Ecopetrol, con capacidad para 800 t/año de hidrógeno de bajas emisiones; y el proyecto Protium, de Hevolución en Antioquia, que genera cerca de 1 tonelada diaria de hidrógeno, que se transformará en amoníaco y fertilizantes de bajas emisiones, siendo la planta de amoníaco de bajas emisiones en operación más grande de Latinoamérica. Estos proyectos demuestran que el hidrógeno colombiano ya trasciende la fase piloto y crea cadenas de valor industriales y agrícolas.

Esta cartilla resume, de manera ágil y cercana, qué es el hidrógeno, cómo se produce, dónde ya se usa y por qué es decisivo para un futuro limpio, competitivo e incluyente. Te invitamos a leerla, compartirla y sumarte a esta nueva etapa energética que estamos construyendo juntos. Seguiremos trabajando para que el hidrógeno no sea solo una promesa, sino una realidad que transforme vidas.

COLOMBIA ANTE **EL CAMBIO CLIMÁTICO**

“Reducir emisiones de gases de efecto invernadero es
nuestro compromiso con el planeta”

El cambio climático es uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad. Sus efectos ya se sienten en todo el mundo: temperaturas más extremas, pérdida de biodiversidad, escasez de agua y eventos climáticos cada vez más intensos. Colombia no es ajena a esta realidad, y por eso ha asumido un compromiso firme para hacer parte de la solución.

En el marco del Acuerdo de París y durante la Cumbre del Clima COP26 del 2021, el país estableció una meta clara: reducir el 51% de sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para el año 2030, frente al escenario de referencia que proyectaba lo que se emitiría si no se tomaban medidas adicionales. Este objetivo forma parte de una apuesta más amplia por una transición energética justa, que genere bienestar para la ciudadanía, proteja los ecosistemas y abra nuevas oportunidades para la economía y el empleo.

¿DE DÓNDE VIENEN LAS EMISIONES DE GASES EFECTO INVERNADERO DE COLOMBIA?



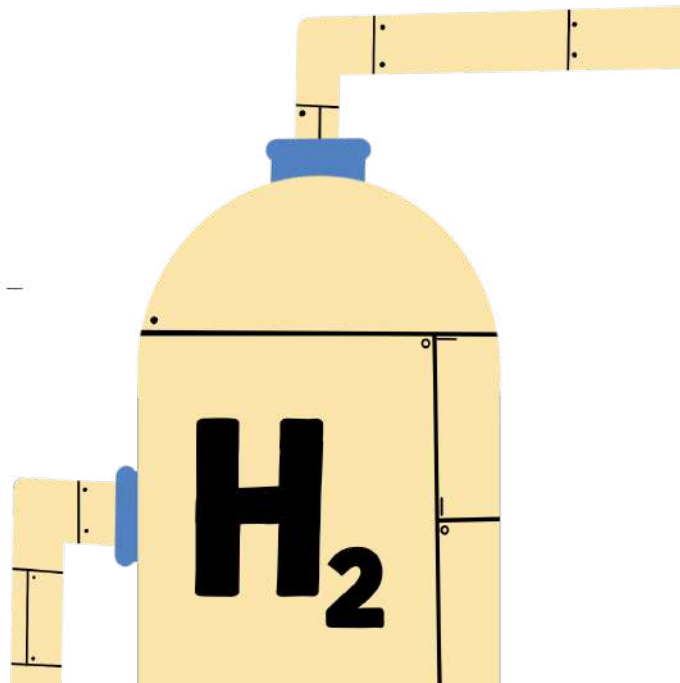
Actualmente, las emisiones de GEI en el país provienen principalmente de¹:

- **Uso del suelo (59%):** asociado a actividades como la deforestación y el cambio de uso del territorio.
- **Energía (31%):** incluyendo generación eléctrica, combustibles para el transporte y procesos industriales.
- **Residuos (7%)** y procesos industriales (4%).

En particular, el sector transporte representa una pieza clave del rompecabezas: consume el 42%² de toda la energía del país y genera el 12,5% de las emisiones totales. Aquí es donde nuevas soluciones, como el hidrógeno de bajas emisiones, pueden marcar una gran diferencia.

¿Y QUÉ PAPEL JUEGA EL HIDRÓGENO?

El hidrógeno de bajas emisiones se perfila como el puente esencial para la descarbonización de los segmentos “difíciles de electrificar”: transporte pesado de carga y pasajeros, aviación regional e internacional, procesos industriales de alta temperatura (acero, cemento, refinación), así como la producción de derivados en los que actúa como materia prima, entre ellos el amoníaco, metanol y combustibles sintéticos. Su alta densidad energética másica y su versatilidad como materia prima lo convierten en un complemento estratégico de la electrificación con energías renovables, capaz de abatir miles de toneladas de CO₂³ que hoy carecen de alternativas de mitigación competitivas.



1 IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. 2021. Tercer Informe Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FNAU. Bogotá D.C., Colombia.

2 Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2022). Balance Energético Colombiano 2021.

3 Ministerio de Minas y Energía. 2021. Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia.

Consciente de este potencial, Colombia avanza en la construcción de un ecosistema nacional del hidrógeno que ya cuenta con más de 30 proyectos en diferentes etapas de desarrollo, una inversión proyectada de USD 40.000 millones y metas de instalar alrededor de 18 GW de electrólisis antes de 2040⁴ que equivale al total de la capacidad instalada del país a la fecha. Un paquete normativo progresivo —Ley 2099 de 2021; Decretos 1476 de 2022, 2235 de 2023 y 1597 de 2024; y la Política Nacional de Hidrógeno de bajas emisiones (CONPES, en formulación)— que asegura incentivos fiscales, seguridad jurídica y compatibilidad con los estándares de los mercados internacionales.

El hidrógeno, además de contribuir a la meta nacional de reducir en 51 % las emisiones para 2030, comparado con lo que el país emitiría si no tomara acciones frente al cambio climático, impulsará entre 7.000 y 15.000 empleos en la próxima década, facilitará la transferencia tecnológica, fortalecerá la soberanía energética al sustituir combustibles importados y posicionará a Colombia como hub latinoamericano de producción de energéticos de bajas emisiones. En síntesis, el hidrógeno se perfila como una palanca para reindustrializar el país con un sello de competitividad baja en carbono y para liderar una transición energética justa en la región.

⁴ Información recopilada por Asociación Hidrógeno Colombia y Cámara de hidrógeno y gases renovables ANDI-Naturgas

NUESTRA ENERGÍA HOY: ¿EFICIENTE Y LIMPIA?

“Una matriz energética en transformación”

El sistema energético colombiano enfrenta importantes desafíos para avanzar hacia la descarbonización y la sostenibilidad. En 2023⁵, los combustibles fósiles aportaron 78,3% de la oferta total de energía primaria, mientras que la hidroelectricidad apenas alcanzó el 10,1 % y el conjunto de fuentes no convencionales (solar, eólica, biomasa, geotermia, etc.) completa otro 11,6 %. Esta fuerte dependencia de hidrocarburos expone al país a la volatilidad de precios internacionales y eleva su huella de carbono, dificultando el logro de la meta nacional de -51 % de emisiones de GEI para 2030. La situación se agrava con la baja eficiencia en el uso final: solo 31 % de la energía que llega al consumidor se transforma en servicios útiles (movilidad, calor, iluminación). El restante 69 % se pierde como calor residual, fricción, fugas eléctricas o procesos obsoletos en transporte, industria y hogares. Cerrar esta brecha exige acelerar la incorporación de energías limpias, modernizar equipos y redes, e impulsar programas de uso eficiente de la energía y recuperación de calor que reduzcan la intensidad energética de la economía.



Fuente. DNP con base en datos de PAI-PROURE 2022–2030 (UPME)

5 Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2025). Balance Energético Colombiano Revisión 2022-Preliminar 2023. https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Beco/Presentacion_Balance_Energetico_Colombiano_2022%e2%80%932023.pdf

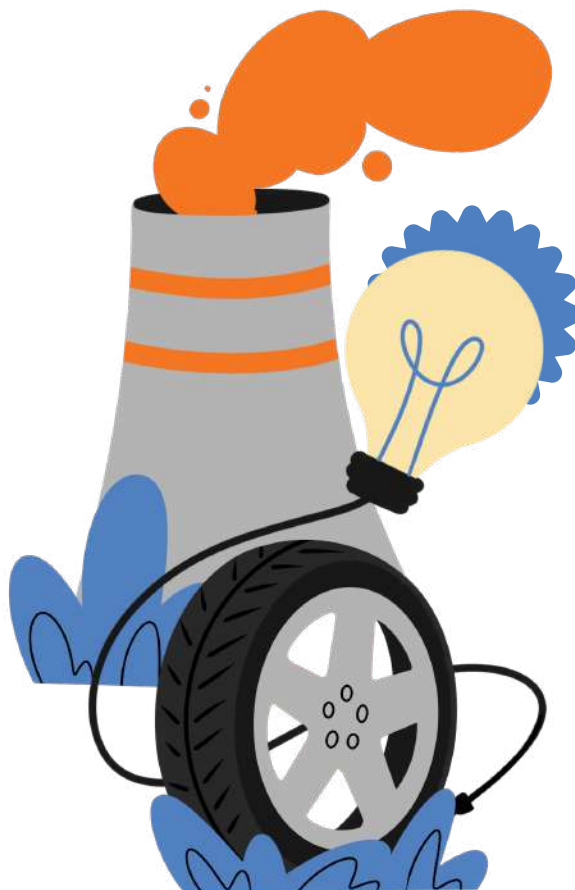
¿DÓNDE SE PIERDE MÁS ENERGÍA?

Transporte: Es el sector menos eficiente, con solo 24% de energía útil, un 70% se pierde principalmente por el uso de motores de combustión interna.

Sector residencial: Apenas 20% de la energía es útil, con 45% en pérdidas por electrodomésticos ineficientes y malas prácticas de uso.

Industria: Aunque tiene mayor rendimiento, el 64% de la energía se pierde por procesos obsoletos y baja tecnología en producción.

Estas cifras asociadas a la oferta de energía primaria y las pérdidas por ineficiencia evidencian la necesidad urgente de la implementación de medidas de modernización tecnológica asociadas a la generación y aprovechamiento de la energía.



¿DÓNDE ENTRA EL HIDRÓGENO?

El hidrógeno de bajas emisiones se convierte en la pieza que falta para descarbonizar los eslabones menos competitivos en términos de electrificación:

Transporte pesado y de larga distancia (camiones, trenes, flota marítima y aviación regional), donde la densidad energética de las baterías aún resulta insuficiente. Procesos industriales de alta temperatura (acero, cemento, refinería) que hoy dependen de coque, carbón o gas para alcanzar temperaturas superiores a los 1.000 °C. Almacenamiento energético estacional: permite convertir excedentes solares y eólicos en combustible químico, guardarlo por semanas o meses y reconvertirlo en electricidad o calor cuando la red lo requiera.

En la siguiente tabla se presentan los usos y actividades en las cuales se aprovecha el hidrógeno, así como los principales derivados y su participación en la descarbonización de la economía. Su naturaleza limpia, almacenable y multifuncional lo posiciona como el socio ideal de las renovables variables, equilibrando la oferta y la demanda y reforzando la seguridad energética.

TABLA 1.

USOS PRIORIZADOS DE HIDRÓGENO Y SUS DERIVADOS

SUSTANCIA / DERIVADO	APLICACIONES FINALES DE MAYOR PRIORIDAD	COMENTARIOS CLAVE
Hidrógeno	- Celdas de combustible para transporte pesado (camiones, buses, trenes) y maquinaria portuaria. - Turbinas de gas 100 % H₂ o mezclas H₂-gas natural para respaldo eléctrico o cogeneración. - Redes dedicadas de H₂. - Calderas industriales de alta temperatura. - Siderurgia (DRI/H₂) para acero verde. - Mezcla con gas natural en redes de distribución. - Materia prima para amoníaco, metanol y -nuevo- combustibles sintéticos (e-diesel, e-gasolina, e-nafta). - Co-firing en motores diésel estacionarios.	Complementa la electrificación donde la densidad energética de las baterías es insuficiente y permite producir e-fuels neutros en carbono.
Amoníaco	- Combustible marítimo (motores dual-fuel o celdas de combustible). - Calderas y turbinas industriales. - Generación eléctrica estacionaria. - Materia prima para fertilizantes (urea, nitrato de amonio).	Vector de transporte de H ₂ y solución inmediata para descarbonizar el movimiento de mercancías internacional.
Metanol	- Combustible marítimo (motores dual-fuel y pilas de combustible). - Combustible automotriz o aditivo (mezcla con gasolina). - Intermedio químico para SAF (vía ruta methanol-to-jet) y producción de biodiesel FAME. - Materia prima para formaldehído y olefinas.	Plataforma versátil para e-combustibles líquidos y síntesis de SAF.
Combustibles sintéticos o e-fuels (e-diésel, e-gasolina, e-nafta, SAF)	- Combustible sostenible de aviación (Sustainable Aviation Fuel - SAF): mezcla drop-in hasta 50 % en turbinas de aviación (meta nacional:100 millones de galones a 2035). - e-Diésel / e-Gasolina para flotas existentes de largo recorrido y vehículos ligeros mientras se electrifican gradualmente. - E-nafta como materia prima petroquímica baja en carbono.	Usan H ₂ de bajas emisiones + CO ₂ biogénico o capturado; permiten descarbonizar transporte aéreo y vehicular sin sustituir motores.

Fuente: Elaboración propia⁶

⁶ Referencias empleadas para la construcción de la tabla:
GIZ Colombia. 2023. Estudio técnico-económico para la identificación y evaluación de tecnologías PtX en Colombia. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/11898/08.Potencial_y_tecnologias_Power-to-X_en_Colombia_001.pdf
Cámara de Industria y Comercio Colombo-Alemana (AHK Colombia). 2024. Estudio de mercado de H₂V y Power to X en Colombia. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/11890/04.Estudio_de_Mercado_H2V_y_PtX.pdf

La principal prioridad del Gobierno de Colombia en materia de hidrógeno es su contribución estratégica a la descarbonización global y a la consolidación de una Transición Energética Justa, segura, confiable y eficiente, en articulación con los objetivos de transformación Productiva, reindustrialización, internacionalización y acción Climática. En coherencia con la Hoja de Ruta del Hidrógeno y la Hoja de Ruta de la Transición Energética Justa, se espera que el hidrógeno aplicado a usos industriales impulse sectores como la refinación, la agroindustria a través de su incorporación en la producción de fertilizantes nitrogenados y el transporte mediante el desarrollo de combustibles sintéticos.

En síntesis, migrar hacia una matriz más eficiente y baja en carbono no es solo cuestión de ampliar la generación renovable; requiere un cambio estructural donde el hidrógeno actúe como vector flexible, conectando sectores, respaldando la red y habilitando la descarbonización de la industria que Colombia necesita para cumplir sus metas climáticas y de reindustrialización.

TRANSICIÓN ENERGÉTICA: **EL CAMINO YA EMPEZÓ**

“Políticas públicas que abren nuevas oportunidades”

POLÍTICAS PÚBLICAS DE HIDRÓGENO DE BAJAS EMISIONES: EL ENGRANAJE NORMATIVO QUE HACE POSIBLE LA TRANSICIÓN

En apenas una década, Colombia pasó de promover genéricamente las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) a diseñar un marco legal integral que posibilita ubicar al hidrógeno en el centro de la reindustrialización limpia. El punto de partida fue la Ley 1715 de 2014, que abrió la puerta en términos de incentivos tributarios a las FNCER. A partir de allí, el país fue construyendo un sendero normativo escalonado que cada dos o tres años añade piezas nuevas y complementarias:

UN RECORRIDO NORMATIVO EN EVOLUCIÓN CONSTANTE

POLÍTICAS PÚBLICAS DE HIDRÓGENO DE BAJAS EMISIONES

Colombia ha diseñado un marco normativo y de políticas públicas atractivo para el desarrollo de proyectos y la inversión en la transición energética justa.

Cómo hemos avanzado:

2014

LEY 1715 DE 2014

Ley de renovables. Establece incentivos para el desarrollo y la utilización de las FNCER y promueve la gestión eficiente de la energía.

LEY 1964 DE 2019

Promueve el uso de vehículos eléctricos y fomenta el despliegue de infraestructura de carga.

LEY 2169 DE 2019

Impulsa el desarrollo bajo en carbono del país mediante el establecimiento de metas y medidas mínimas en materia de carbono neutralidad y resiliencia climática.

HOJA DE RUTA DEL HIDRÓGENO DE COLOMBIA, 2021

Metas y acciones de corto, mediano y largo plazo.

2019

LEY 2099 DE 2021

Transición Energética. Incluye el hidrógeno azul, verde, geotermia y la tecnología CCUS como FNCER, fortalece el Fenoge y crea el Fonenergía.

2021

2022

CONPES 4137 2024

Programa de apoyo a la Transición Energética

PROYECTO DE DECRETO

JULIO 2024

Estructura de gobernanza pública, certificación de origen, registros de proyectos.

CONPES 4118

2023

Política Nacional Portuaria, modernización y sostenibilidad.

DECRETO 2235

DE 2023

Hidrógeno Blanco

CONPES 4129

2023

Política Nacional de Reindustrialización

DECRETO 1597 DE

2024

Lineamientos y promoción de hidrógeno de bajas emisiones.

2024

HOJA DE RUTA DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA JUSTA

LEY 2294 DE 2023

Plan Nacional de Desarrollo Colombia Potencia Mundial de la Vida

2023

Amplia definición e incentivos a hidrógeno verde, CCUS, introduce hidrógeno blanco.

DECRETO 1476 DE 2022

Promoción del Hidrógeno

CONPES 4075 2022

Política Nacional de Transición Energética

En conclusión, este andamiaje jurídico no solo consolida la visión de país que sitúa al hidrógeno como uno de los pilares de la transición energética, sino que convierte la ambición en acción: brinda certeza a la inversión, acelera la ejecución de proyectos y cataliza la innovación tecnológica en transporte, industria y agro. Gracias a él, Colombia se equipa para liderar la reindustrialización verde de la región y para exportar competitividad baja en carbono al mundo.

EL HIDRÓGENO EN LA TEJ: **UNA NUEVA ERA PARA COLOMBIA**

“ Reconvertir para avanzar ”

Colombia vive un auténtico punto de inflexión: durante décadas la economía se apoyó en los hidrocarburos y la minería como principal fuente de ingresos, empleo y energía⁷, pero el imperativo climático, los compromisos internacionales de reducción de emisiones y la irrupción de tecnologías limpias han puesto en marcha una transformación sin precedentes. En ese giro histórico, el hidrógeno de bajas emisiones emerge como pieza clave para reconfigurar la estructura productiva del país.

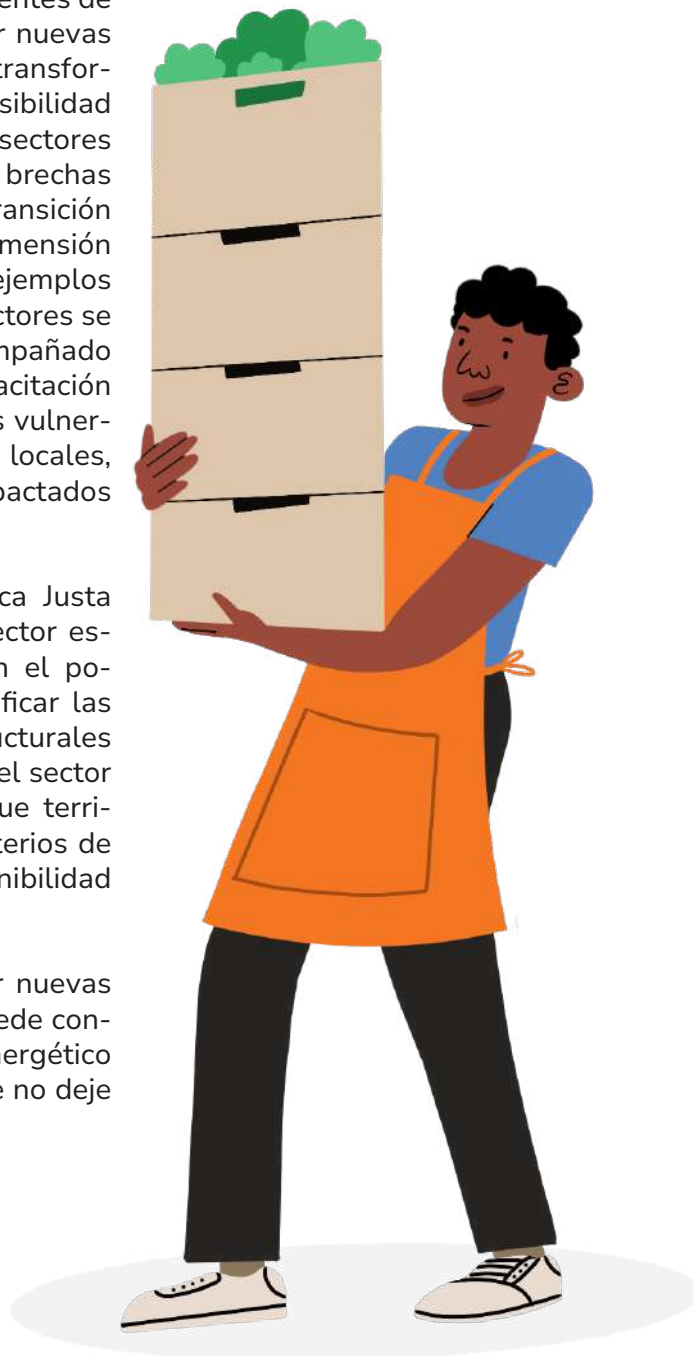
7 Ministerio de Minas y Energía. 2024. Diagnóstico base para la Transición Energética Justa. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/12591/DIAGN%C3%93STICO_BASE_PARA_LA_TRANSICI%C3%93N_EN-ERG%C3%89TICA_JUSTA_-_2024.pdf

RECONVERSIÓN CON ENFOQUE SOCIAL Y AMBIENTAL

El hidrógeno de bajas emisiones puede convertirse en la puerta de entrada a empleos verdes y de calidad en regiones tradicionalmente dependientes de los hidrocarburos y la minería. Al impulsar nuevas cadenas de valor (producción, transporte, transformación y uso de hidrógeno), se abre la posibilidad de reconvertir la mano de obra de estos sectores hacia actividades sostenibles, reduciendo brechas socioeconómicas y asegurando que la transición energética no deje a nadie atrás. Esta dimensión social debe presentarse en la cartilla con ejemplos concretos de cuántos empleos y en qué sectores se pueden generar. Este proceso debe ir acompañado de políticas públicas que fomenten la capacitación técnica, la inclusión laboral de poblaciones vulnerables y el fortalecimiento de capacidades locales, especialmente en los territorios más impactados por la transición.

La Hoja de Ruta de Transición Energética Justa (2025) identifica el hidrógeno como un vector estratégico de reconversión productiva, con el potencial de impulsar empleo verde, diversificar las economías locales y reducir brechas estructurales en zonas tradicionalmente dependientes del sector extractivo. A su vez, promueve un enfoque territorial que garantice una transición con criterios de equidad, participación comunitaria, y sostenibilidad ambiental.

Al proteger empleos existentes y generar nuevas oportunidades de calidad, el hidrógeno puede convertirse en un puente entre el modelo energético actual y una economía descarbonizada que no deje a nadie atrás.



REINDUSTRIALIZACIÓN CON ENERGÍA LIMPIA

El hidrógeno permite avanzar hacia una nueva etapa de reindustrialización en sectores estratégicos como el químico, agrícola, marítimo y logístico. Su versatilidad como vector energético y materia prima lo convierten en una herramienta clave para la transformación productiva sostenible del país.

Proyectos orientados a la producción de amoníaco verde para fertilizantes tienen el potencial de reducir la dependencia de insumos importados y fortalecer la soberanía alimentaria, al tiempo que promueven el desarrollo rural, alineándose con los objetivos de la transición justa, que busca dinamizar economías locales y generar empleos sostenibles en nuevas cadenas de valor.

Asimismo, el hidrógeno habilita procesos industriales más limpios en sectores de alto consumo energético, como la producción de cemento, acero o químicos, aportando a la construcción de una economía baja en carbono, moderna y competitiva.

En el frente logístico, el uso del hidrógeno en Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF, por sus siglas en inglés) y la descarbonización del transporte marítimo abre la puerta a transformar sectores históricamente intensivos en carbono. Estas soluciones, antes consideradas futuristas, comienzan a materializarse en proyectos concretos en el país, y posicionan al hidrógeno como un habilitador de exportaciones sostenibles y de alto valor agregado.

El desarrollo de estas aplicaciones también puede impulsar una nueva base industrial para Colombia, mediante la localización de nuevas tecnologías, el fomento a la innovación, y la integración a mercados internacionales exigentes en términos de sostenibilidad.



HACIA UNA ECONOMÍA EXPORTADORA DE HIDRÓGENO

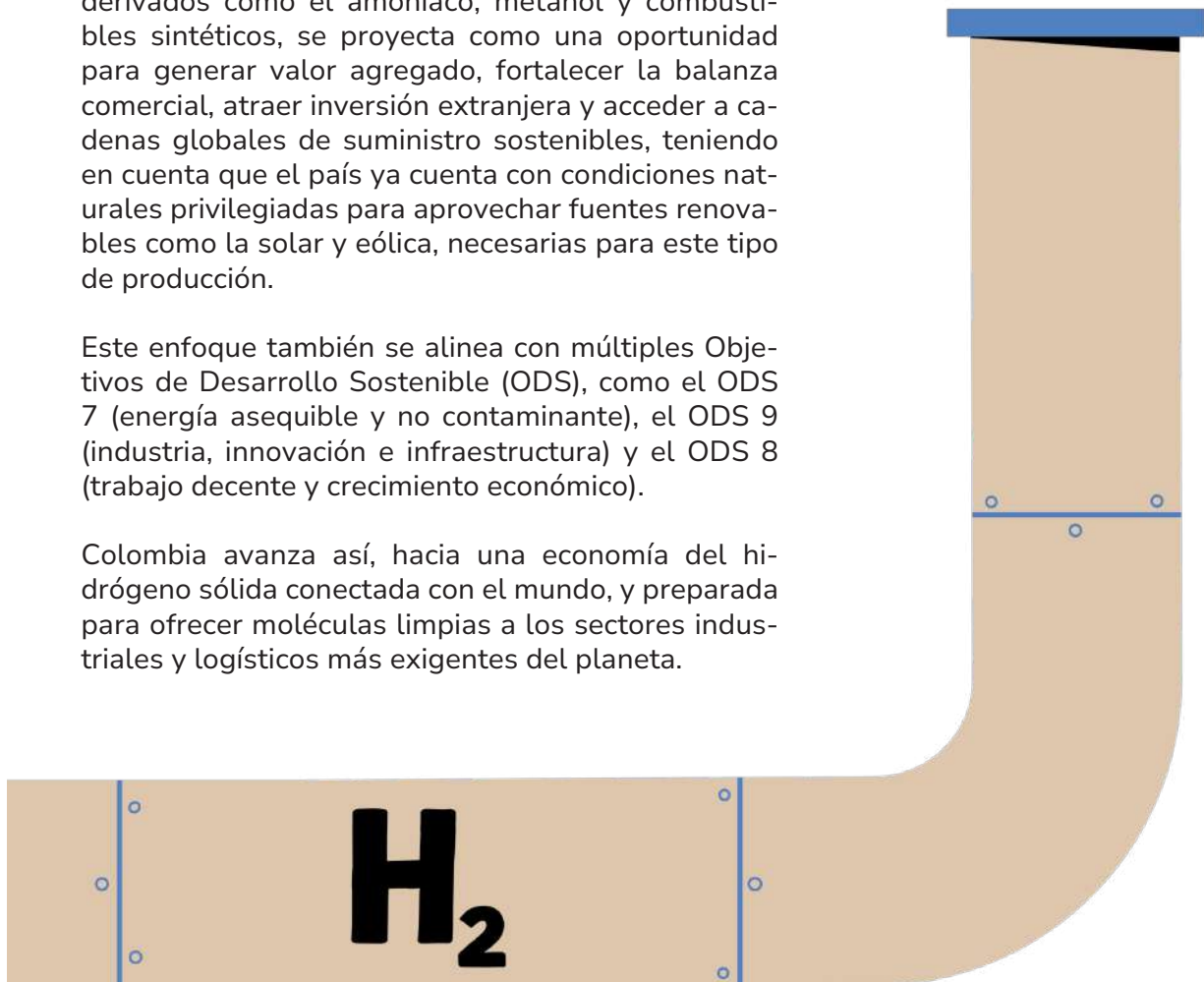
Colombia busca consolidarse como un hub regional para la producción y exportación de hidrógeno y sus derivados, aprovechando su riqueza en recursos naturales, su posición geoestratégica, y un marco normativo en evolución.

Esta visión no solo responde a la necesidad de diversificar la matriz productiva y energética, sino que posiciona al país como proveedor de soluciones energéticas limpias para mercados internacionales con metas ambiciosas de descarbonización.

La producción de hidrógeno de bajas emisiones, y derivados como el amoníaco, metanol y combustibles sintéticos, se proyecta como una oportunidad para generar valor agregado, fortalecer la balanza comercial, atraer inversión extranjera y acceder a cadenas globales de suministro sostenibles, teniendo en cuenta que el país ya cuenta con condiciones naturales privilegiadas para aprovechar fuentes renovables como la solar y eólica, necesarias para este tipo de producción.

Este enfoque también se alinea con múltiples Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como el ODS 7 (energía asequible y no contaminante), el ODS 9 (industria, innovación e infraestructura) y el ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico).

Colombia avanza así, hacia una economía del hidrógeno sólida conectada con el mundo, y preparada para ofrecer moléculas limpias a los sectores industriales y logísticos más exigentes del planeta.



“HIDRÓGENO PARA TODOS Y TODAS”

La transición energética puede ser también una palanca para la inclusión de mujeres, jóvenes, comunidades étnicas y otros grupos tradicionalmente excluidos del sector energético. Iniciativas como la red Women in Green Hydrogen, creada con el propósito de visibilizar el liderazgo y la participación de las mujeres en la industria del hidrógeno de bajas emisiones, da cuenta de que la nueva economía del hidrógeno es diversa y equitativa.



HIDRÓGENO DE BAJAS EMISIONES: **MOTOR DEL CAMBIO**

“ Más allá del color: el enfoque es la sostenibilidad ”

Ligero como ningún otro elemento, el hidrógeno encabeza la tabla periódica. En la naturaleza no es habitual encontrarlo solo, normalmente se encuentra acompañado de otros elementos como oxígeno y carbono, por lo que se requiere un proceso de separación para su obtención. El hidrógeno no es una fuente de energía directa, se considera un vector o portador energético, ya que, es un portador que almacena energía y permite el transporte, la distribución y su uso allí donde las baterías o las líneas de transmisión no llegan.

El hidrógeno se destaca por tener una alta densidad energética por unidad de masa, es decir, contiene más energía en menor masa comparado con combustibles convencionales como la gasolina o el diésel. Sin embargo, su principal desafío radica en que, al ser un gas muy liviano, ocupa mucho espacio en condiciones normales, lo que se traduce en una baja densidad volumétrica. Por esta razón, para su almacenamiento y transporte eficientes es necesario someterlo a procesos de compresión o licuefacción, o convertirlo en derivados como el amoníaco o el metanol, que facilitan su manipulación y distribución a gran escala.

En Colombia actualmente se identifican cuatro rutas principales cuyos costos proyectados de producción y participación en la demanda (≈ 176 kt en 2024) se sintetizan en la Tabla 1.

TABLA 2.

TIPOLOGÍAS DE HIDRÓGENO RECONOCIDAS EN COLOMBIA, CARACTERÍSTICAS Y PARTICIPACIÓN EN EL MERCADO NACIONAL.

TIPO	FUENTE/ PROCESO	COSTO 2025 (USD KG ⁻¹)	PARTICIPACIÓN EN LA DEMANDA NACIONAL*
Verde	Electrólisis alimentada con FNCER (solar, eólica, biomasa, pequeñas hidro)	4 – 6 (meta oficial $\leq 1,7$ a 2030)	<1 % (13 pilotos en marcha)
Azul	Reformado de gas natural + captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS)	2 – 4 (proyección 2,4 a 2030)	~10 % (usado sobre todo en refin-ería)
Blanco	Generación geológica natural (serpentinización, Radiólisis, desgasificación, mecanoradicales)	Costes aún en estudio; se prevé competitiv-idad similar al gris cuando se escale la producción	Exploratorio (primeras campañas sísmicas, geoquímicas y pozos de sondeo en fase de diseño)
Gris	Reformado de gas natural sin CCUS	1 – 3 (actual alternativa más barata)	~90 % (principalmente en refinación y fertilizantes)

*Demanda 2024: ≈ 176 kt H₂ año⁻¹; Ecopetrol concentra el 74 %.

La paleta de colores, sin embargo, encierra realidades muy distintas en términos de emisiones. Para garantizar transparencia y competitividad, el Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible trabajan en el establecimiento de un umbral nacional de intensidad de carbono que permita utilizar la intensidad de emisiones en la producción de hidrógeno en la definición de regulaciones nacionales, facilitando la interoperabilidad con el mercado nacional e internacional. Además, de identificar aquellos impactos ambientales en la producción y uso del hidrógeno y sus derivados.

HIDRÓGENO Y COSTOS: **¿CUÁNTO VALE EL FUTURO?**

“ La viabilidad económica está en marcha ”

La curva de costos del hidrógeno a partir de electrólisis se espera que disminuya con los desarrollos tecnológicos y despliegue del mercado que están teniendo lugar. Las proyecciones oficiales sitúan el costo nivelado del hidrógeno (LCOH, por sus siglas en inglés, es decir, el costo promedio de producir hidrógeno durante la vida útil de una planta) en 2,1–4,5 USD/kg para 2030 y se espera que se reduzca hasta 1,5–3,0 USD/kg en 2050, impulsado por el recurso eólico-solar de clase mundial que ofrecen La Guajira y el Atlántico. Para ponerlo en perspectiva, producir hidrógeno hoy cuesta aproximadamente el doble que generar energía a partir de gas natural, por lo que esta reducción puede marcar un punto de equilibrio que haga viable su adopción a gran escala. Entre los derivados, el amoníaco verde podría cotizarse en torno a 0,45 USD/kg NH_3 para 2050—un precio que abre la puerta a fertilizantes de bajas emisiones y combustibles marítimos competitivos—, mientras el metanol verde se proyecta por encima de 0,65 USD/kg CH_3OH , reflejando los mayores costos de captura y suministro de CO_2 .

En términos regionales, de acuerdo a análisis realizado por el Banco Mundial⁸, Colombia se posiciona entre los países con mayor competitividad para producir hidrógeno por electrólisis en América Latina, al alcanzar un costo nivelado (LCOH) inferior a 4 USD/kg gracias al aprovechamiento de la energía eólica terrestre. Esta ventaja sitúa al país en un rango más favorable que potencias como Brasil (4,70 USD/kg con eólica) y Perú (con solar fotovoltaica), y muy por debajo de los valores reportados en naciones del Caribe y Centroamérica como República Dominicana, Guyana, Costa Rica o Jamaica, donde los costos superan los 5,40–7 USD/kg. Frente a países como Argentina, Bolivia o El Salvador —cuyos costos se ven encarecidos por factores financieros como una elevada tasa de costo de capital—, Colombia muestra un entorno más atractivo para la inversión y la consolidación de proyectos.

⁸ Beylis, Guillermo, and Nancy Lozano Gracia, eds. 2025. *From Resource Rich to Resource Smart: Opportunities for Latin America and the Caribbean in the Energy Transition*. Washington, DC: World Bank. doi: 10.1596/978-1-4648-2242-1

Esta senda descendente transforma al hidrógeno y sus e-fuels en auténticos motores de descarbonización, a la vez que refuerza la competitividad industrial y el potencial exportador de Colombia en los mercados globales de energía limpia.

TABLA 4.
PROYECCIONES DE COSTOS DEL HIDRÓGENO Y SUS
DERIVADOS EN COLOMBIA (2030–2050).

INDICADOR	2030	2050	COMENTARIOS DE COMPETITIVIDAD
LCOH – Costo nivelado de hidrógeno (USD/kgH ₂)	2,1 – 4,5	1,5 – 3,0	La Guajira presenta el piso de costos gracias a factores de planta eólicos >60 %. Atlántico y Bolívar convergen < 3 USD/kg con proyectos híbridos solar-eólico.
LCOA – Amoniac (USD/KgNH ₃)	n/a	≈ 0,45	Proyecciones IEA/IRENA para cadenas “green-NH ₃ ” que combinen electricidad renovable <25 USD/MWh y electrolizadores ≥1 GW.
LCOM – Metanol (USD/kgCH ₃ OH)	n/a	> 0,65	El metanol aún carga una prima de CCUS biogénico y captura de CO ₂ industrial; no alcanza paridad con gris antes de 2040.

Fuente: GIZ Colombia-2023. Complemento a la Hoja Ruta del Hidrógeno
Enfocado en las Tecnologías PtX

En definitiva, la caída de costos dibuja un horizonte en el que el hidrógeno de bajas emisiones y sus e-combustibles serán rentables en Colombia antes de 2030 y plenamente competitivos hacia 2050. Con precios alineados a los estándares globales, el país pasará de los pilotos a la exportación a gran escala, anclando su descarbonización interna y ganando un rol protagónico en las cadenas internacionales de vector energético.

HIDRÓGENO GEOLÓGICO: **ENERGÍA DESDE LAS PROFUNDIDADES**

“ Un recurso natural por descubrir ”

El hidrógeno geológico es aquel que se forma y acumula naturalmente en la corteza terrestre. Se considera una fuente limpia y puede generarse continuamente a partir de varios mecanismos naturales. Entre los más relevantes se encuentra la serpentinización, una reacción entre agua y minerales ultramáficos ricos en hierro; la radiólisis del agua, provocada por la desintegración natural de elementos como uranio, torio y potasio; y la generación de mecano radicales, que ocurre cuando las rocas se fracturan en fallas activas, liberando radicales que reaccionan con el agua. También se identifican fuentes como la desgasificación magmática, que ocurre cuando el calor del magma que está debajo de la Tierra libera gases, y otra es la pirólisis de materia orgánica en ambientes de alta madurez térmica, como cuencas con carbones sobremaduros, ocurre cuando la materia orgánica, como restos de plantas muy antiguas que están en el subsuelo, se calientan y se descomponen, liberando también hidrógeno (Zgonnik, 2020).

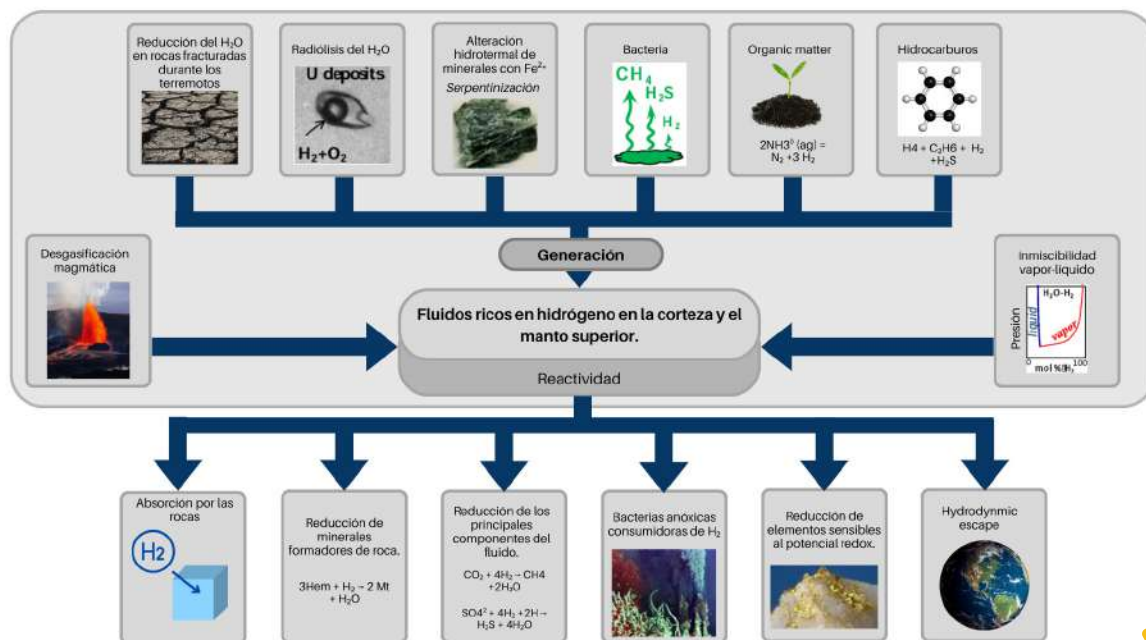


Figura 1. Procesos de generación y reactividad del hidrógeno en la corteza y el manto superior. Adaptado de (Truche & Bazarkina, 2019).

En Colombia, estas condiciones geológicas se presentan en diferentes regiones del país. La serpentinización se asocia con los complejos ultramáficos y ofiolíticos de la Cordillera Occidental y el flanco occidental de la Cordillera Central (como Ginebra, Filadelfia y Venus). La Radiólisis tiene alta probabilidad en zonas como el escudo guyanés y el Batolito de Buga, mientras que los mecanoradicales podrían generarse en grandes sistemas de fallas como Cauca-Romeral. Por su parte, las cuencas sedimentarias de los Llanos Orientales, Putumayo y Valle Medio del Magdalena presentan condiciones favorables para la generación de hidrógeno por maduración térmica de materia orgánica.

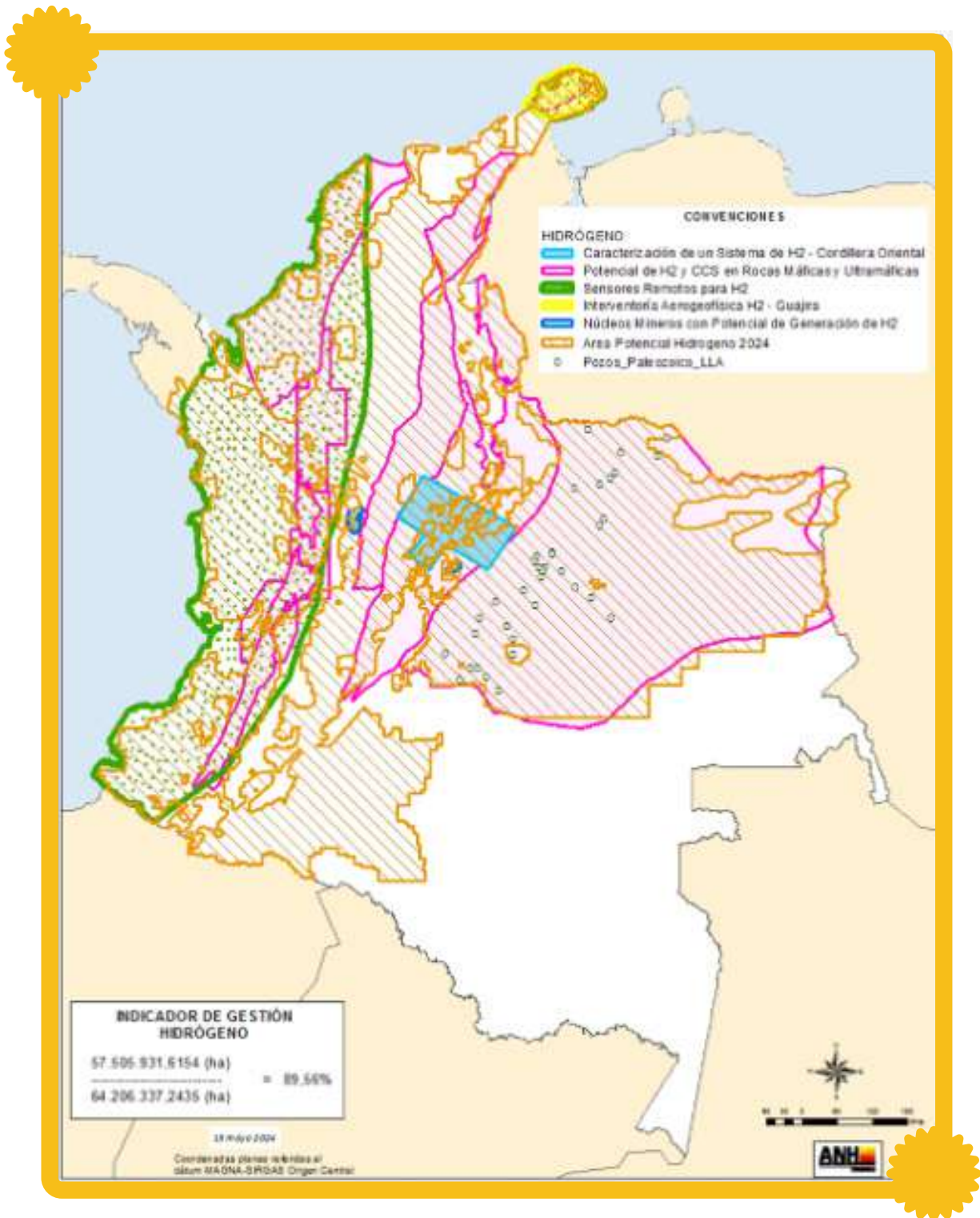


Figura 2. Relación entre mecanismos de generación de hidrógeno natural y las regiones geológicas donde podrían estar ocurriendo en Colombia. **Fuente:** ANH, 2024.

La exploración del hidrógeno geológico combina técnicas remotas, geofísicas y geoquímicas para identificar zonas con potencial de generación y acumulación, a través de imágenes satelitales, sísmica, magnetometría y análisis de gases. Su explotación puede realizarse de forma directa desde reservorios naturales sellados.

En la figura se ilustran tres métodos utilizados en la exploración del hidrógeno geológico. En (a), se observan imágenes satelitales multiespectrales que permiten identificar anomalías en superficie. En (b), se muestra un perfil sísmico 2D que revela estructuras profundas como fallas o domos salinos, donde podría acumularse hidrógeno. Y en (c), se representa un método tradicional de medición directa del gas en el suelo, mediante sensores instalados a distintas profundidades. Estas herramientas complementarias permiten enfocar con mayor precisión los estudios en campo.

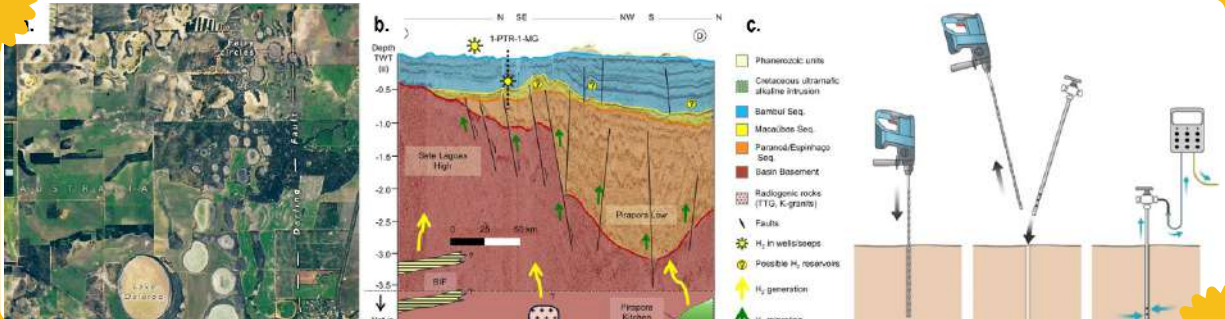


Figura 3. Métodos de Exploración de hidrógeno geológico. a. Imagen Multiespectral en Australia Occidental **FUENTE:** (NASA, 2023). b. Perfil sísmico de reflexión 2D de la Cuenca de São Francisco **FUENTE:** (Freitas et al., 2024). c. Forma tradicional de medir hidrógeno del suelo **FUENTE:** (Patiño et al., 2024).

Sobre esta fuente de generación de hidrógeno, se destaca que el país se posiciona como pionero en América Latina en la exploración de esta fuente limpia y estratégica, con recientes hallazgos hechos a través de estudios técnicos realizados por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), en los cuales se confirmó la presencia de hidrógeno blanco en pozos de las cuencas Cordillera Oriental y Sinú-San Jacinto⁹.

⁹ Gobierno Nacional confirma hallazgo de hidrógeno natural en el subsuelo colombiano. Más información disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/gobierno-nacional-confirma-hallazgo-de-hidrogeno-natural-en-el-subsuelo-colombiano/>

¿PARA QUÉ SIRVE EL HIDRÓGENO?

USOS EN LA VIDA REAL

“ El hidrógeno entra en acción: así transforma tu mundo ”

Colombia proyecta que la demanda de hidrógeno y sus derivados crezca entre 2030 y 2050, a medida que tres grandes motores ganan tracción:

- **Fertilizantes y química verde** (amoníaco, metanol).
- **Combustibles sintéticos** para aviación, flotas marítimas y transporte pesado.
- **Reemplazo del hidrógeno fósil** consumido hoy en refinerías y, cada vez más, en siderurgia.

Dos grandes roles de la molécula:

ROL	EJEMPLOS DE APLICACIÓN	ESTADO DE COMPETITIVIDAD*
a) Insumo energético	• Generación eléctrica y calor mediante celdas de combustible o turbinas H₂-gas. • Transporte con pila de combustible: camiones, buses, trenes ligeros, flotas portuarias. • Almacenamiento estacional: convierte excedentes solares/eólicos en energía química y los devuelve a la red cuando se requiere.	Competitivo hoy en nichos de alta potencia y largas autonomías. Costos en rápido descenso.
b) Insumo industrial	• Amoníaco → fertilizantes, explosivos y transporte marítimo. • Metanol → química intermedia, e-combustibles, SAF (vía ruta methanol-to-jet). • Refinería (hidrotratamiento) y siderurgia (reducción directa de mineral de hierro).	Competitivo en amoníaco y refinería; acero y SAF avanzan con inversiones piloto.

A continuación, se presenta gráficamente los diferentes usos potenciales del hidrógeno, así como su competitividad, comparado con otras alternativas tecnológicas que pudieran sustituir al hidrógeno.



Fuente: Elaboración propia a partir de escalera del hidrógeno limpio de Michael Liebreich ¹⁰

***Referencia gráfica:** matriz de competitividad de la figura adjunta (verde = competitivo hoy, amarillo = competitividad intermedia, rojo = a largo plazo).

¹⁰ Michael Liebreich/Liebreich Associates, Escalera de Hidrógeno Limpio, versión 5.0, 2023. Crédito del concepto: Adrian Hiel, Energy Cities. CC-BY 4.0

CÓMO SE VE EN LA PRÁCTICA — CINCO FRENTES PRIORITARIOS:

FRENTE	CASOS DE USO EMBLEMÁTICOS	POR QUÉ ES CLAVE
1. Agroquímica y fertilizantes	Amoníaco verde para urea y nitratos; metanol verde como insumo químico	Colombia importa 95 % de su materia prima para fertilizantes; el H ₂ local cierra la brecha y fortalece la soberanía alimentaria.
2. Refinería y petroquímica	Hidrotratamiento, hidro-craqueo y desulfuración con H ₂ limpio, sustituyendo el hidrógeno de origen fósil.	Reduce la huella de carbono de los combustibles líquidos convencionales y apoya la transición hacia cadenas químicas bajas en emisiones
3. Transporte de largo alcance	- Combustible SAF para aviación. - Amón-/Metanol para buques y ferris. - Camiones y buses con pila de combustible.	Sectores difíciles de electrificar donde la densidad energética por unidad de masa del H ₂ y sus e-fuels no tiene sustituto práctico.
4. Metalurgia y acero verde	Reducción directa del mineral de hierro (DRI-H ₂) para producir acero sin coque; hornos de alta temperatura > 1 000 °C para vidrio y cemento.	La siderurgia consume cerca del 8 % de la energía industrial nacional. Sustituir el coque por H ₂ podría reducir hasta un 95 % las emisiones de proceso
5. Energía y almacenamiento	- Almacenamiento estacional (Power-to-H₂-to-Power). - Mix H₂-gas para turbinas de respaldo - Micro-redes renovables en ZNI.	Proporciona flexibilidad al sistema eléctrico 100 % renovable y garantiza energía en periodos de baja generación solar o hidráulica

H₂ = hidrógeno; SAF = * Sustainable Aviation Fuel* (combustible sostenible de aviación);

DRI = * Direct Reduced Iron* (reducción directa de mineral de hierro);

ZNI = Zonas No Interconectadas del sistema eléctrico nacional.

En síntesis: al sumar la siderurgia (acero verde) y otras aplicaciones estratégicas, el hidrógeno de bajas emisiones se consolida como columna vertebral de la descarbonización industrial, la soberanía alimentaria y la seguridad energética de Colombia.

FERTILIZANTES VERDES: **SEMBRANDO AUTOSUFICIENCIA**

“ El campo también necesita energía limpia ”

El hidrógeno de bajas emisiones puede tener un rol relevante como insumo para la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en proceso de producción de amoníaco, así como para impulsar la producción local de bienes de alto valor agregado como los fertilizantes. Este desarrollo genera encadenamientos productivos, entendidos como el conjunto de vínculos entre empresas, sectores y actores locales que se fortalecen a partir de una actividad principal —en este caso, la producción de hidrógeno y sus derivados— mediante la provisión de insumos, servicios, transporte, mantenimiento, ingeniería y nuevos emprendimientos asociados. Fomentando el empleo local, la transferencia tecnológica y la competitividad del sector agrícola, contribuyendo a la soberanía alimentaria, en la medida que se reducen las emisiones contaminantes y la dependencia de los combustibles fósiles. Estimaciones¹¹ muestran que al año Colombia consume alrededor de dos millones de toneladas de fertilizantes y de estos solo el 5% de la demanda nacional es atendida con producción local de materia prima. Así, la cadena de valor de los fertilizantes nitrogenados —aquellos que contienen compuestos de nitrógeno disponibles para las plantas, como urea, nitrato de amonio, sulfato de amonio o soluciones NPK con base amoniacal— en Colombia está más enfocada en la mezcla de fertilizantes complejos con insumos mayoritariamente importados, junto a la logística y comercialización de estos.

Este déficit comercial en materias primas conlleva a altos costos de producción que afectan la competitividad de las actividades agropecuarias y los productos derivados. Particularmente, la dependencia en materias primas importadas conlleva a una alta vulnerabilidad frente a las fluctuaciones en las variables externas que determinan el precio y la disponibilidad de los fertilizantes en el país¹².

11 Fuentes empleadas: Fondo Nacional de Fomento de la Papa (2024), Legiscomex, Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA).

12 CIF: Cost, Insurance and Freight: valor de importación que incluye costo, seguro y flete.

NPK: Mezcla de nutrientes: Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K).

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations.



El hidrógeno verde representa una alternativa estratégica para reducir esta dependencia y fortalecer la producción nacional de fertilizantes nitrogenados. Su integración en la cadena de valor puede observarse en los siguientes componentes:

COMPONENTE	SITUACIÓN ACTUAL	OPORTUNIDAD CON HIDRÓGENO VERDE
Materia prima (H₂)	95 % del amoníaco utilizado para fabricar fertilizantes es importado.	Sustituir por hidrógeno electrolítico producido con energía solar o eólica nacional, reduciendo emisiones y dependencia.
Fertilizantes nitrogenados	Mezcla local con insumos importados.	Implementar unidades modulares de amoníaco verde acopladas a fuentes renovables (2–5 t/día NH ₃). Integrar amoníaco verde como base para urea y nitratos de producción nacional.
Costos y competitividad	Alta exposición a precios internacionales del gas natural.	Reducción de costos y fortalecimiento de la soberanía alimentaria mediante producción nacional limpia.

Fuente: Elaboración propia con base en FAO (2024), IEA (2023) y GIZ (2024).

AMONÍACO VERDE: **DEL PROCESO HABER-BOSCH A UN INSUMO ESENCIAL**

La vasta mayoría del amoníaco mundial se obtiene mediante el proceso Haber-Bosch, una reacción que combina nitrógeno (N_2) del aire y hidrógeno (H_2) en un reactor metálico a 200–300 bar de presión y 400–500 °C, en presencia de un catalizador. El hidrógeno tradicionalmente proviene del reformado de gas natural¹³ (hidrógeno gris), lo que convierte a la industria del amoníaco en uno de los mayores emisores de CO_2 del sector químico; Reemplazar ese hidrógeno fósil por hidrógeno de bajas emisiones transforma el amoníaco en un producto “bajo en carbono” —clave para la transición energética— y abre dos grandes impactos:

1. Agricultura y soberanía alimentaria

- El amoníaco es la fuente primaria de nitrógeno en fertilizantes (urea, nitrato de amonio).
- Con amoníaco verde, Colombia puede reducir su dependencia de importaciones, estabilizar precios y recortar la huella ambiental de su agroindustria.

2. Nuevos mercados energéticos e industriales

- Sirve como portador de hidrógeno: se licúa y transporta fácilmente, hidrógeno como producto final en destino.
- Se estudia como combustible marítimo libre de carbono y refrigerante sostenible, además de ser base para explosivos, textiles y plásticos.

13 IEA (2021), Ammonia Technology Roadmap, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap>, Licence: CC BY 4.0

Por su versatilidad y volumen de demanda —más de 180 Mt/año a escala global—, descarbonizar el amoníaco mediante hidrógeno de bajas emisiones representa una palanca decisiva para la competitividad agrícola, la reducción de emisiones industriales y el surgimiento de nuevas cadenas de valor en Colombia y el mundo. Desplegar hidrógeno de bajas emisiones en la producción de amoníaco permitiría:

REDUCIR HUELLA DE CARBONO

de la agroindustria, sustituyendo una de las fuentes industriales de CO₂ más intensivas.

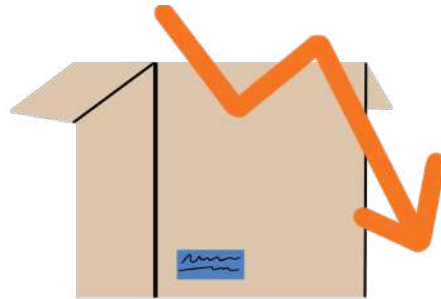


INCREMENTAR EL CONTENIDO LOCAL

en la cadena de valor, generando empleo y encadenamientos productivos en petroquímica, logística y servicios.

BAJAR LA FACTURA DE IMPORTACIONES

y amortiguar la exposición a shocks de precios globales, fortaleciendo la seguridad alimentaria.



ABRIR MERCADOS EMERGENTES

como combustibles marítimos de amoníaco y exportaciones de fertilizantes bajos en carbono.

Para más información, puede consultar las siguientes referencias disponibles en EcoH2:

- NTT Data & GIZ, 2023. Análisis de competitividad para la producción de amoníaco verde en México y Colombia bajo las proyecciones actuales del mercado.
- GIZ Colombia. 2024. Estudio de mercado de H2V y Power to X en Colombia.

CIELOS LIMPIOS- **AVIACIÓN PARA LA VIDA**

“ SAF: el combustible que cuida el cielo ”

Los Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF, por sus siglas en inglés) constituyen una alternativa estratégica para reducir las emisiones del transporte aéreo. A diferencia de los combustibles fósiles convencionales, los SAF se obtienen a partir de fuentes renovables —como aceites vegetales usados, grasas animales, residuos agrícolas o biomasa lignocelulósica— mediante procesos termoquímicos y catalíticos que generan hidrocarburos con propiedades equivalentes al Jet A-1. Estos combustibles son plenamente compatibles con los motores y la infraestructura actual, lo que permite su introducción progresiva en las rutas comerciales sin requerir modificaciones técnicas significativas.

En 2023, la aviación representó el 2,5 % de las emisiones globales de CO₂ relacionadas con la energía, tras haber crecido a un ritmo más rápido entre 2000 y 2019 que el ferrocarril, la carretera o el transporte marítimo. Las emisiones de la aviación en 2023 alcanzaron casi 950 Mt de CO₂¹⁴. Para empezar a reducir las emisiones esta década, de acuerdo con el Escenario de Cero Emisiones Netas para 2050 (Escenario NZE), las partes interesadas deben aumentar la cuota de combustible con bajas emisiones de carbono, mejorar el diseño de fuselajes y motores, optimizar las operaciones e implementar soluciones para limitar la demanda.

14 IEA.2024.Aviation.Disponible en: <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>

El Gobierno Nacional, en las bases del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 reconoce la necesidad de usar combustibles sostenibles de aviación como medida indispensable para sustituir combustibles fósiles, contribuyendo además a la reducción de Gases de Efecto Invernadero y a la descarbonización del transporte aéreo, con el objetivo de reducir las emisiones del sector aeronáutico y fortalecer la autosuficiencia energética.

Desde el Ministerio de Minas y Energía en conjunto con la Aeronáutica Civil y Ecopetrol se impulsa el Ecosistema de SAF en el país, donde se agrupan entidades del sector público, privado, sociedad civil y academia con el fin de establecer la ruta de incorporación del SAF en el mercado local y su impacto en mercados internacionales. Como parte de este trabajo, se publicó la **Hoja de Ruta de Combustibles Sostenibles de Aviación**, donde se propone una meta de 100 millones de galones de SAF para 2035 y 450 millones para 2050. En Colombia, el impulso al SAF se integra a la Hoja de Ruta de Transición Energética Justa, que plantea sustituir progresivamente el uso de combustibles fósiles en la aviación. La Resolución 00090 de 2025 de Aerocivil define el plan nacional de implementación, estableciendo como meta producir entre 150 y 200 millones de galones anuales hacia 2050, con una reducción estimada del 80 % de las emisiones netas de carbono respecto al queroseno convencional.

El desarrollo, producción, distribución y adquisición de Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF) en Colombia fomenta la transición energética y la descarbonización del transporte aéreo, y el hidrógeno de bajas emisiones tendría un papel relevante en esta industria. A continuación la producción y metas proyectadas para SAF:

AÑO OBJETIVO	CAPACIDAD INSTALADA (MILLONES DE GALONES/AÑO)	PARTICIPACIÓN EN MEZCLA NACIONAL (%)	REDUCCIÓN ESTIMADA DE CO₂ EQUIVALENTE	MATERIA PRIMA PREDOMINANTE
2025	10	1,5	0,3 Mt CO ₂ /año	Aceite de cocina usado (UCO)
2030	50	8	1,8 Mt CO ₂ /año	Residuos de palma y biomasa lignocelulósica
2040	120	25	4,2 Mt CO ₂ /año	Aceites vegetales reciclados y co-procesamiento con hidrógeno verde
2050	180–200	40	6,5 Mt CO ₂ /año	Biomasa avanzada y e-fuels (H ₂ verde + CO ₂ capturado)

Fuente: Elaboración propia con base en OACI (2024), Aerocivil (2025) y Min. Energía (2025).

PUERTOS DEL CARIBE: **MOTORES DE DESCARBONIZACIÓN**

“Hidrógeno en movimiento desde nuestras costas”

Colombia tiene una posición geográfica estratégica que le proporciona acceso directo al transporte marítimo global y le posibilita la participación en mercados clave como el asiático, europeo y norteamericano, consolidando a Colombia como un nodo clave o punto estratégico para el comercio internacional marítimo. Por otra parte, si bien en Colombia las emisiones de GEI del sector marítimo equivalen a 2% de las emisiones nacionales de GEI asociadas al uso de la energía¹⁵, la relevancia de las exportaciones/importaciones indicadas previamente pone a Colombia en una posición estratégica para contribuir a la descarbonización del transporte marítimo a nivel internacional. Al estar ubicada en rutas navieras internacionales clave, el país tiene la oportunidad de desempeñar un papel promotor e influyente en este proceso.

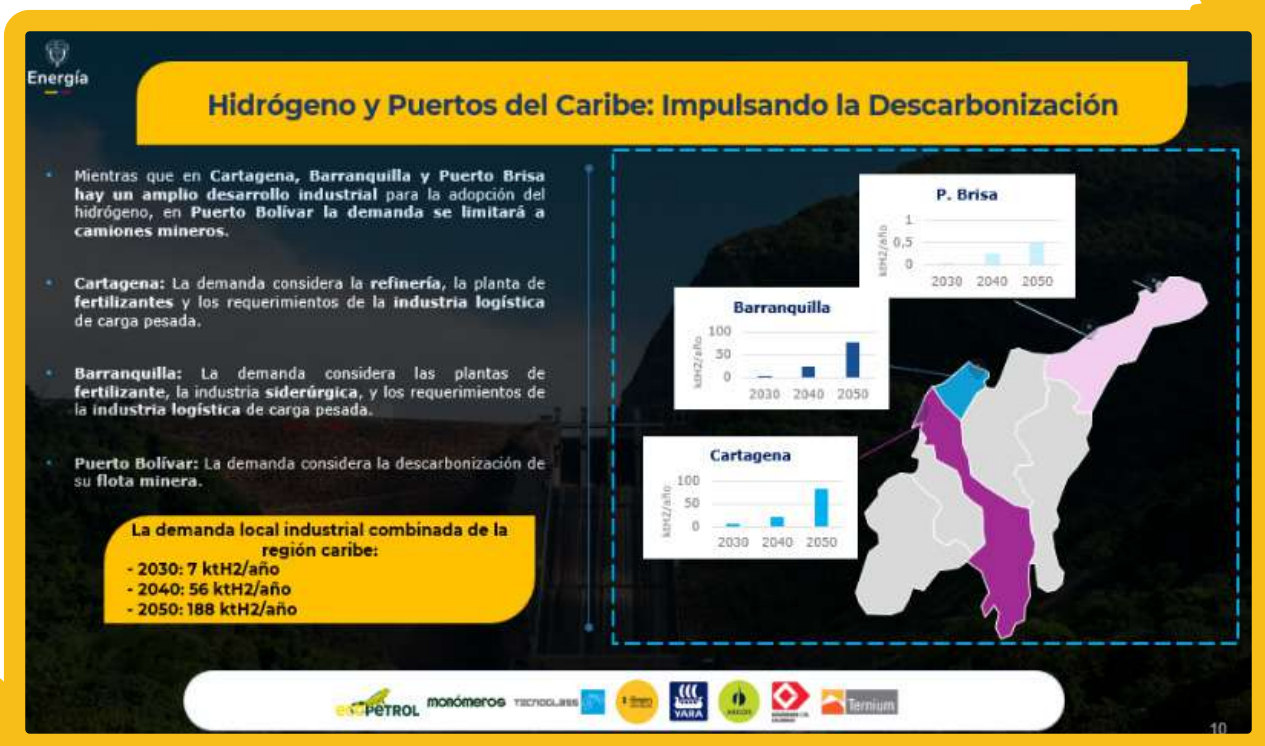
Para aprovechar estas ventajas, en el país se ha impulsado un marco de políticas públicas que promueven tanto el desarrollo de zonas portuarias eficientes, como la transición energética justa, el impulso de las energías renovables y el desarrollo de la Hoja de Ruta de Hidrógeno en Colombia, junto con estrategias que promueven la eficiencia y sostenibilidad de las zonas portuarias nacionales.^{15,16}

¹⁵Dimar.Contaminación y emisiones atmosféricas. Disponible en: https://www.dimar.mil.co/proteccion_del_medio_marino/prevencion_de_la_contaminacion_marina/contaminacion_y_emisiones_atmosfericas

Aunado a ello, el Gobierno Nacional a través del Departamento Nacional de Planeación-DNP, Agencia Nacional de Infraestructura-ANI, Ministerio de Transporte y Ministerio de Minas y Energía avanzan en una hoja de ruta para los puertos con mayor potencial de desarrollar proyectos de hidrógeno bajas emisiones y derivados para exportación en Colombia.

Como parte de este trabajo, se fijaron los siguientes objetivos: 1). Identificar las ubicaciones portuarias con mayor potencial para desarrollar proyectos piloto de producción y exportación de combustibles de cero emisiones a corto y mediano plazo; 2). Realizar una evaluación detallada de las ubicaciones portuarias preseleccionadas, creando recomendaciones específicas para la transformación de cada ubicación en un proyecto piloto para la producción, almacenamiento, suministro y exportación de combustibles de cero emisiones. y 3). Explorar la posibilidad de uso interno y exportación de estos combustibles internacionalmente, teniendo en cuenta la demanda en diversas industrias como la naviera, la producción de fertilizantes y químicos, industrias pesadas y la aviación.

Como parte de los resultados se presentan algunos elementos relevantes de las cuatro ubicaciones portuarias con mayor potencial para el desarrollo de un proyecto de hub de exportación de combustibles cero emisiones en el corto y mediano plazo.



Fuente: Banco Mundial, Inicio, Cenit. 2024. Estudio de prefactibilidad de 4 zonas portuarias. Producción, almacenamiento, suministro y/o exportación de combustible búnker cero emisiones de carbono en Colombia – Apoyo a los estudios de prefactibilidad en ubicaciones portuarias estratégicas.

AVANCES CONCRETOS: **DEL PLAN A LA ACCIÓN**

“ Del papel a los proyectos ”

Colombia se encuentra en una posición estratégica y privilegiada para liderar la transición energética en América Latina mediante el desarrollo del hidrógeno de bajas emisiones. Este vector energético, reconocido por su versatilidad y potencial para descarbonizar sectores intensivos en carbono, ha ganado protagonismo en la agenda nacional como una de las soluciones clave para alcanzar los compromisos climáticos del país.

Fortalezas estructurales del país

FORTALEZA ESTRUCTURAL	DETALLE PRINCIPAL	VENTAJA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO
Matriz eléctrica baja en carbono	> 65 % hidro + solar y eólica en rápido crecimiento	Permite producir H ₂ a partir de electrólisis con bajas emisiones y costos competitivos
Diversidad de recursos energéticos	Sol y viento de clase mundial (La Guajira, Caribe), biomasa (Valle del Cauca), geotermia (Eje Cafetero), gas natural + potencial CCUS, contextos geológicos para H ₂ blanco	Habilita las tres rutas de hidrógeno: electrólisis, reformado por metano con captura de carbono y explotación de hidrógeno de origen geológico
Infraestructura y know-how industrial	Oleoductos, gasoductos, poliductos adaptables; puertos de aguas profundas en Caribe y Pacífico; décadas de operación de gases a presión	Reduce CAPEX de transporte/almacenamiento y acelera la integración del H ₂ en cadenas existentes
Ventaja geoestratégica	Costas en Atlántico y Pacífico, corredores logísticos al interior	Facilita exportaciones de amoníaco y e-combustibles a EE. UU., Europa y Asia
Entorno institucional y regulatorio favorable	Ley 2099 (2021), Decretos 1476 (2022), 2235 (2023) y 1597 (2024); meta de -51 % GEI a 2030	Brinda certeza jurídica e incentivos para atraer inversión nacional e internacional

MARCO REGULATORIO Y POLÍTICAS PÚBLICAS

Colombia ha avanzado de forma significativa en el diseño normativo que apoya el despliegue del hidrógeno. Entre los hitos más relevantes destacan:

- **Ley 1715 de 2014:** base jurídica para el impulso de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), extendida posteriormente al hidrógeno.
- **Ley 2099 de 2021:** considera al hidrógeno verde y azul como FNCER, promoviendo su inclusión en la transición energética.
- **Ley 2294 de 2023:** reconoce al hidrógeno blanco como parte de las FNCER, garantizando beneficios fiscales y facilitando su desarrollo.
- **Decretos 1476 de 2022, 2235 de 2023 y 1597 de 2024:** reglamentan la promoción y el uso de diferentes tipos de hidrógeno.
- **CONPES 4075 de 2022:** Política de transición energética, compuesta por cuatro ejes estratégicos que buscan incrementar la seguridad energética; incentivar el conocimiento y la innovación en transición energética; generar mayor competitividad y desarrollo económico desde el sector energético,
- **CONPES 4129 de 2023:** Política nacional de reindustrialización, que contempla, entre otras, la promoción de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER)
- **CONPES 4137 de 2024:** Autorización de garantía estatal a la FDN por hasta USD 138,5 millones para financiar el programa de apoyo a la transición energética donde el hidrógeno a partir de electrólisis es una de ellas.

Adicionalmente, se encuentra en proceso de elaboración un documento CONPES dedicado exclusivamente al hidrógeno de bajas emisiones, liderado por el Ministerio de Minas y Energía junto con el Departamento Nacional de Planeación. Este documento sentará las bases para una política pública integral que abarque aspectos regulatorios, socioambientales, de gobernanza, incentivos económicos y fortalecimiento de la demanda en sectores clave como el transporte, la industria y los fertilizantes.

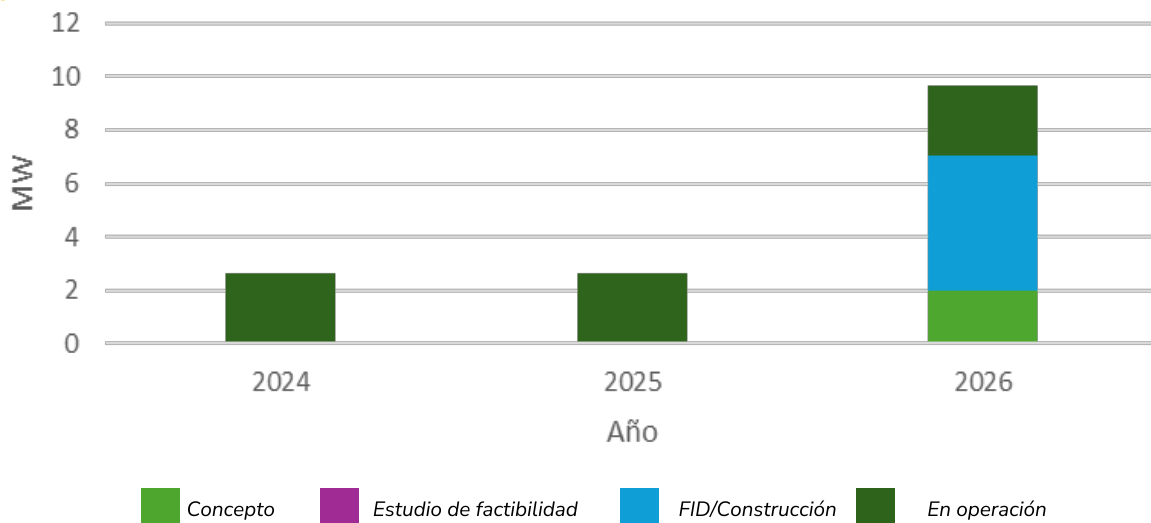


EVOLUCIÓN DEL ECOSISTEMA Y PROYECTOS EN MARCHA

Desde la publicación de la Hoja de Ruta del Hidrógeno (2021), el portafolio nacional ha pasado de ideas iniciales a proyectos con inversión asegurada y plantas en operación.

GRÁFICA 1

EVOLUCIÓN DE LA CAPACIDAD COMPROMETIDA DE PROYECTOS DE HIDRÓGENO POR ETAPA (2024-2026)



La gráfica 1 adjunta ilustra ese avance¹⁶:

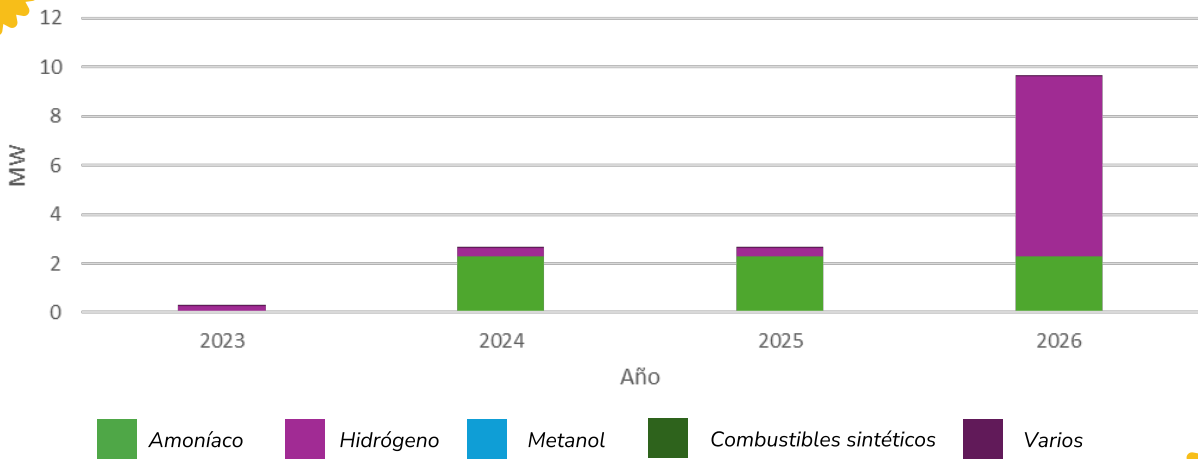
- **2024-2025** – Predominan las iniciativas en fase conceptual y de prefactibilidad (tonos verdes y morado), que suman unos 3 MW equivalentes y aportan más de 400 t/año de hidrógeno comprometido.
- **2026** – El salto es evidente: casi 10 MW repartidos entre proyectos en construcción (azul) y operativos (verde oscuro), con una producción proyectada de 1 120 t/año.

El bloque azul (FID/Construction) señala que el capital ya está desembolsado y las obras avanzan; el verde oscuro confirma la primera generación comercial de H₂ en el país. Así, de las 12 t/año de 2022 se pasa a un crecimiento exponencial que refleja 37 iniciativas en distintas etapas y una curva de aprendizaje institucional cada vez más consolidada.

¹⁶ Información recopilada por Cámara de Comercio e Industria Colombo-Alemana (AHK Colombia), Asociación Hidrógeno Colombia y Cámara de hidrógeno y gases Renovables ANDI-Naturgas

La Gráfica 2 presenta la capacidad instalada comprometida (MW) para proyectos de hidrógeno de bajas emisiones en Colombia entre 2023 y 2026, discriminada por producto principal: hidrógeno gaseoso, amoníaco, metanol y otros sintéticos. Refleja únicamente las iniciativas que ya cuentan con decisión final de inversión (FID) o se encuentran en construcción.

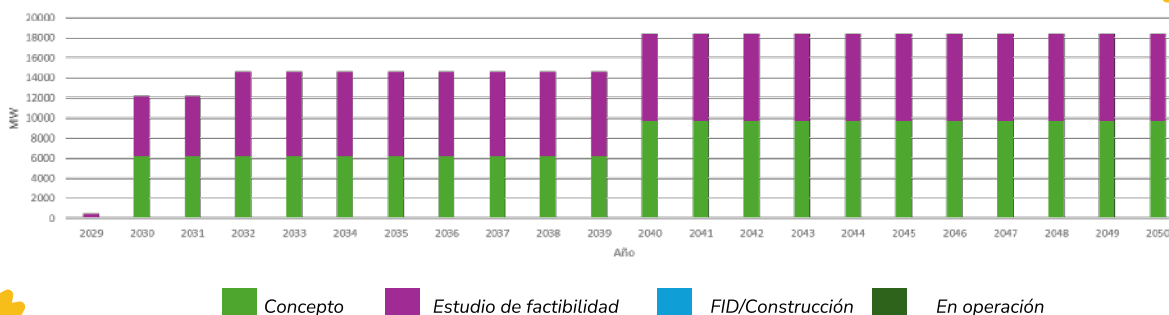
GRAFICA 2.
CAPACIDAD INSTALADA COMPROMETIDA POR TIPO DE PRODUCTO (MW), 2023-2026



En 2023 aparece un único piloto de hidrógeno puro; durante 2024 y 2025 la capacidad se estabiliza en torno a 2,5 MW con claro predominio del amoníaco verde. Para 2026 la barra total se cuadruplica hasta casi 10 MW: el amoníaco se mantiene, pero surge un bloque adicional asociado a proyectos multiderivados (SAF, e-combustibles), lo que evidencia la evolución del mercado hacia un portafolio más diverso. En cuanto a proyectos en fase conceptual o con estudios de factibilidad en marcha, se estima que podrían generar más de 2200 kt de hidrógeno anuales a 2040 para exportación, lo cual representaría cerca del 80% de la producción nacional de hidrógeno:

GRAFICA 3.

PROYECCIÓN DE CAPACIDAD TOTAL DE PROYECTOS DE HIDRÓGENO POR ETAPA (2029-2050)



Las proyecciones a largo plazo revelan la magnitud de lo que viene después de los primeros proyectos piloto. En la gráfica se aprecia que:

- **2029-2033:** Predomina la franja verde (concepto) y morado (estudios de factibilidad), indicio de una cartera amplia que aún busca cierre financiero; sin embargo, la barra total ya supera 12 000 MW, reflejo de las expectativas positivas en esta industria emergente.
- **2034-2039:** Empieza a crecer la sección azul (FID / construcción): los proyectos más avanzados pasan a obras civiles y compras de electrolizadores, mientras surge el primer bloque verde oscuro (operativo).
- **2040:** Punto de inflexión: la columna roza 18 000 MW y alrededor de la mitad corresponde a iniciativas con inversión asegurada o en operación. Es esta capacidad instalada la que permitiría producir $\approx 2,2$ Mt de hidrógeno al año para exportación, volumen equivalente al 80 % de la producción nacional proyectada.
- **2041-2050:** El perfil se estabiliza: se mantiene un flujo constante de proyectos en concepto y factibilidad que repone la cartera, mientras la porción operativa sigue creciendo, garantizando oferta sostenida para los mercados nacionales internacionales.

RETOS Y PERSPECTIVAS

El avance del hidrógeno en Colombia enfrenta retos técnicos, institucionales y financieros que deben abordarse de forma coordinada, la siguiente tabla presenta los principales retos, el estado actual y las acciones ejecutadas para mitigar estas barreras:

RETO	SITUACIÓN ACTUAL	ACCIONES EN CURSO
Financiación temprana y señal de mercado	Capital de riesgo limitado para los primeros proyectos comerciales; altos CAPEX de electrólisis y derivados.	Diseño de incentivos fiscales y garantías verdes dentro del Proyecto de Ley de Economía del Hidrógeno y mesas con banca multilateral (BID, AFD, BMZ, BID Invest) para vehículos de blended-finance.
Infraestructura nacional de la calidad	Laboratorios, metrología y esquemas de acreditación todavía no cubren pureza H ₂ , trazabilidad de emisiones ni ensayos de seguridad.	Alianza de cooperación con el PTB alemán para ampliar capacidades de la Red Nacional de Metrología y del ONAC; desarrollo de normas ICONTEC/ISO asociadas a la cadena de valor del hidrógeno.
Déficit de información geocientífica para hidrógeno blanco	Escasa caracterización de subsuelo, hace imposible estimar con rigor el potencial técnico.	MME, SGC y ANH lideran mesas técnicas y campañas de prospección sísmica, geoquímica y flujo de gases para acelerar la evaluación del recurso.
Desarticulación interinstitucional	Competencias dispersas entre MinEnergía, MinAmbiente, Minciencias, DNP, CREG, UPME, ANH, ANLA, ONAC, etc.	Borrador de Decreto de Comisión Intersectorial de Hidrógeno y Derivados , que coordinará políticas, supervisará la certificación de origen y alineará incentivos.
Certificación de origen y estándares internacionales	Falta de umbral nacional de intensidad de carbono; riesgo de barreras de acceso en la UE y otros mercados.	MME y MADS trabajan en la definición de un umbral máximo de emisiones y en la adopción de metodologías para la determinación de la intensidad de GEI asociados a producción y acondicionamiento del hidrógeno. Adicionalmente, se trabaja conjuntamente en la estructuración de mecanismo público de certificación de hidrógeno de bajas emisiones.
Seguridad y manejo de sustancias peligrosas	Normativa de transporte, almacenamiento y uso de H ₂ aún fragmentada.	Revisión y actualización de reglamentos a cargo del MinTransporte; capacitaciones sectoriales con gremios y academia.

NUESTRO PRIMER PASO: AMONÍACO VERDE

“ Hechos que marcan historia ”



El proyecto Protium, desarrollado por la empresa Hevolucion en Antioquia, Colombia, es el primer proyecto productivo de amoníaco a partir de hidrógeno de bajas emisiones en latinoamérica que entra en operación. Su capacidad de electrólisis es de 2,3MW, para una producción diaria de 1000 kg de hidrógeno, con los cuales se producen 5000 kg diarios de amoníaco que serán utilizados por la empresa para la producción de fertilizantes verdes. Adicionalmente, en las instalaciones se cuenta con estación de repostaje para abastecer el automóvil Hyundai Nexu, un vehículo equipado con celda de combustible que ha sido empleado para realizar evaluaciones del desempeño técnico, ambiental y económico de la utilización de hidrógeno en aplicaciones de movilidad en el país.



OTRO HITO: **ECOPETROL Y LA CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE HIDRÓGENO CON TECNOLOGÍA DE MEMBRA- NA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO (PEM) MÁS GRANDE DE AMÉRICA LATINA**



Ecopetrol anunció la construcción de planta de hidrógeno verde más grande de Latinoamérica en la refinería de Cartagena con una inversión de US \$28,5 millones. El Proyecto Coral, concebido por la empresa como caso de negocio para el aprendizaje y escalamiento de la producción industrial de hidrógeno, implica la construcción de la que será la planta de hidrógeno verde con tecnología PEM más grande de América Latina en la refinería, con una capacidad proyectada de 800 Toneladas al año (o 2,2 Ton/día). Su inicio de operación se estima en 2026.

Proyecto Coral H₂ Verde en Refinería de Cartagena

Avanzamos en la construcción de la planta de hidrógeno verde con tecnología PEM más grande de América Latina en la Refinería de Cartagena.



Capacidad: 800 Ton/año – 2,2 Ton/día – 92 kg/h

Objetivo principal
APRENDER PARA ESCALAR

1^{er} PROYECTO
a escala industrial en entrar
en operación en Colombia

#1 PROYECTO
más grande en LATAM
Tipo PEM (Proton-Exchange
membrane-)

5
MW
Electrólisis

7.7
KTon CO₂e
abatidas al año
respecto a H₂ gris,
equivalente a 1.650
vehículos/año.



PILOTOS QUE ABREN CAMINO

“Cada ensayo nos acerca al cambio”

A continuación, se presenta listado de algunos proyectos piloto que marcan el inicio de una ruta transformadora: experiencias que, paso a paso, convierten las ideas en realidades y muestran cómo la innovación abre camino hacia un futuro sostenible.

PROYECTO PILOTO	UBICACIÓN	ENTIDAD(ES) LÍDER(ES)	CAPACIDAD / TECNOLOGÍA	OBJETIVO PRINCIPAL	ESTADO / INVERSIÓN
Econova Caribe	Cartagena (Bolívar)	Grupo Ecopetrol	-Electrólisis 50 kW -Solar fotovoltaica	Producir H ₂ para abastecer movilidad liviana y buses	En operación
Primer bus a hidrógeno 100 % ensamblado en Colombia	Bogotá (SITP)	Marcopolo Superpolo Green Movil Fenoge Ecopetrol	Celda de combustible 60 kW -Energía eléctrica a través de contrato de suministro de energía eléctrica	Demostrar bus urbano a H ₂ para 14 años de servicio	Pruebas / alistamiento Entrada en operación en 2026 Inversión COP 22000 millones
Piloto Planta Aguas Claras	Bello (Antioquia)	EPM	- Electrólisis AEM 5 kW -Energía eléctrica a partir de motogeneradores que emplean biogás de aguas residuales	Blending con biogás y usos en movilidad	En operación
Piloto Promigas – Estación Heroica	Mamonal, Cartagena	Promigas	-Electrólisis PEM 22 kW -Producción ≈ 1 574 kg H ₂ /año - -Solar FV dedicada	Producción de H ₂ verde y mezcla con gas natural en redes	En operación Inversión ≈ USD 1,2 millones
Power-to-Gas universidades	Riohacha	Univ. de Antioquia Univ. de La Guajira	- Electrólisis AEM 5 kW -5 kW eólico + 10 kW solar	Generar H ₂ verde y sintetizar gas natural sintético vía metanación	En operación

ECOSISTEMA H2 COLOMBIA: **LA PLATAFORMA DE TODOS**

“ Conocimiento y conexión para un futuro limpio ”

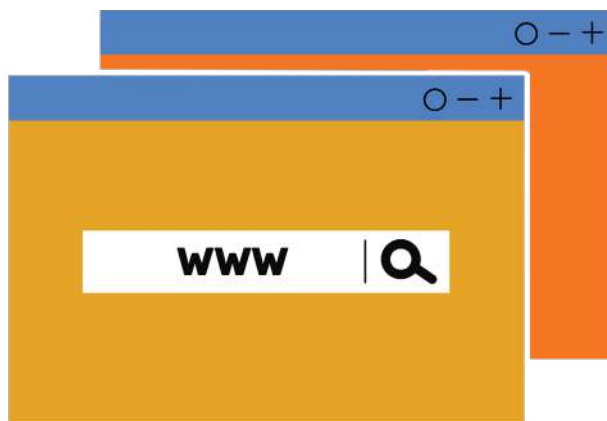


El desarrollo del hidrógeno en Colombia exige algo más que obras e infraestructura: necesita información transparente, actualizada y confiable. Para cubrir esa brecha, el Ministerio de Minas y Energía lanzó Ecosistema H2 Colombia, una plataforma digital abierta que integra y ordena los datos clave del sector.

A través de este portal, ciudadanos, empresas, universidades y entidades públicas pueden consultar estudios técnicos, registrar proyectos, monitorear indicadores y descubrir oportunidades de inversión, todo en un mismo lugar y con acceso gratuito.

¿QUÉ SE PUEDE HACER EN LA PLATAFORMA?

La plataforma está estructurada en diferentes módulos que facilitan la navegación y el acceso a la información según las necesidades de cada usuario:



- **Cadena de valor:** Información detallada sobre las etapas de exploración, producción, almacenamiento, distribución y usos finales del hidrógeno.
- **Publicaciones:** Estudios técnicos, documentos de política pública y análisis del sector.
- **Ecosistema académico:** Materiales educativos, glosarios y recursos para formación técnica y divulgación científica.
- **Normatividad:** Compendio de leyes, decretos y resoluciones que regulan el uso y producción del hidrógeno en Colombia.
- **Avances del hidrógeno en Colombia:** Noticias, indicadores, eventos y reportes actualizados que documentan el progreso del ecosistema nacional. Este módulo sistematiza los hitos alcanzados en la implementación de la Hoja de Ruta del Hidrógeno (2021), permitiendo hacer seguimiento a las metas de corto, mediano y largo plazo propuestas por el país.



ADEMÁS, LA PLATAFORMA PERMITE:

- Registrar proyectos que se encuentren en etapa de concepto, prefactibilidad, factibilidad o ejecución.
- Ubicar proyectos activos en el GeoPortal.
- Visualizar información de los hubs identificados en el país Mapa de Hidrógeno en Colombia.
- Acceder a material de orientación para estructurar y construir proyectos de hidrógeno desde cero.

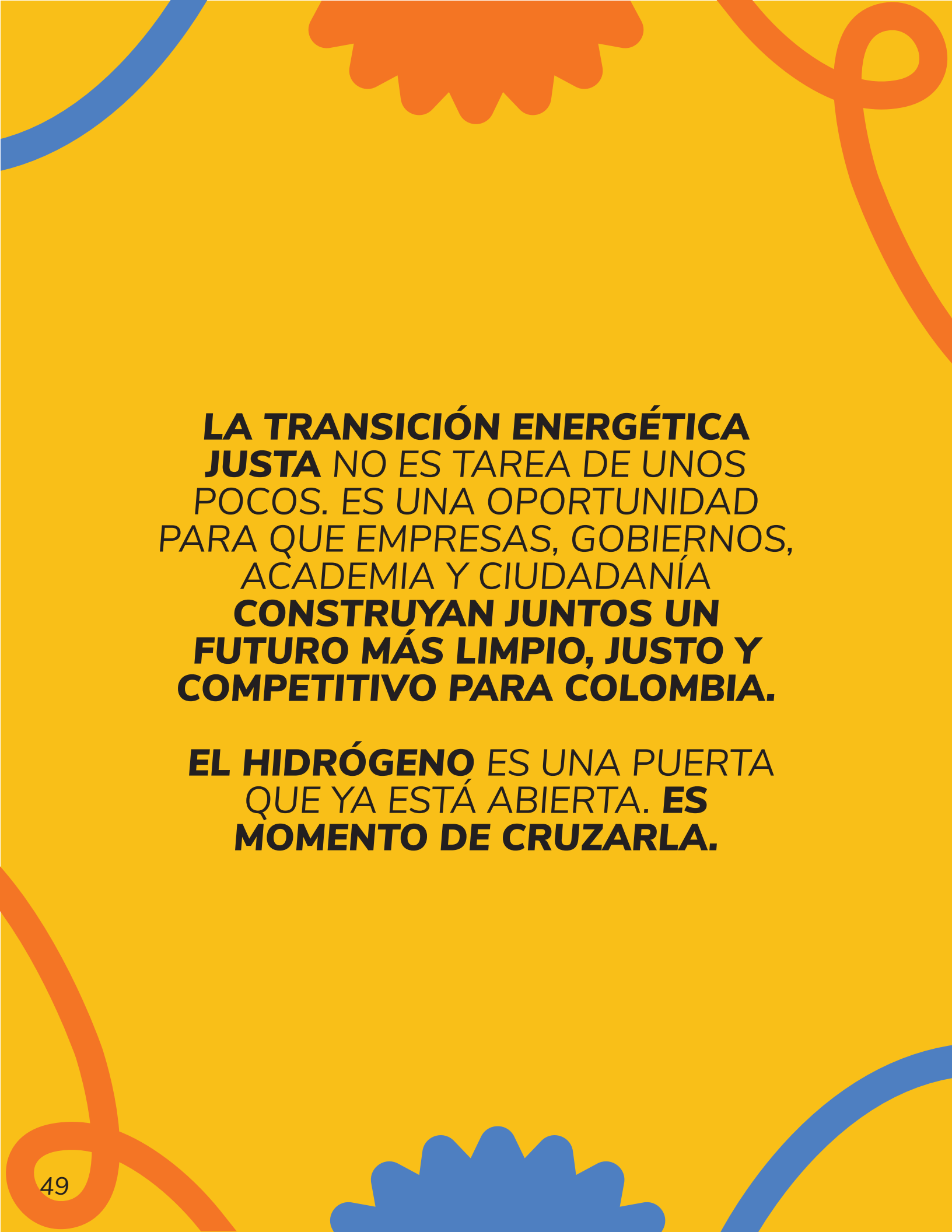
Ecosistema H₂ Colombia constituye una herramienta estratégica para consolidar el desarrollo del hidrógeno en el país, facilitando el acceso a información útil y promoviendo la articulación entre los distintos actores del sistema energético nacional.



MÁS INFORMACIÓN DISPONIBLE EN:

[HTTPS://WWW.MINENERGIA.GOV.CO/ES/ECOSISTEMA-HIDROGENO-COLOMBIA/H2-EN-COLOMBIA/ECOSISTEMA-ACADEMICO/](https://www.minenergia.gov.co/es/ecosistema-hidrogeno-colombia/h2-en-colombia/ecosistema-academico/)





**LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA
JUSTA** NO ES TAREA DE UNOS
POCOS. ES UNA OPORTUNIDAD
PARA QUE EMPRESAS, GOBIERNOS,
ACADEMIA Y CIUDADANÍA
**CONSTRUYAN JUNTOS UN
FUTURO MÁS LIMPIO, JUSTO Y
COMPETITIVO PARA COLOMBIA.**

EL HIDRÓGENO ES UNA PUERTA
QUE YA ESTÁ ABIERTA. **ES
MOMENTO DE CRUZARLA.**

REFERENCIAS **BIBLIOGRÁFICAS**

- Brandt, A. R. (2023). Greenhouse gas intensity of natural hydrogen produced from subsurface geologic accumulations. *Joule*, 7(8), 1818–1831. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.07.001>
- Congreso de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014: Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. Diario Oficial No. 49150 <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>
- Congreso de Colombia. (2021). Ley 2099 de 2021: Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>
- Congreso de Colombia. (2023). Ley 2294 de 2023: Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026 “Colombia, Potencia Mundial de la Vida”. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=209510>
- Departamento Nacional de Planeación. (2022). Documento CONPES 4075: Política de transición energética para el desarrollo sostenible y la seguridad energética de Colombia. Consejo Nacional de Política Económica y Social, República de Colombia.
- Departamento Nacional de Planeación. (2023). Documento CONPES 4118: Política nacional portuaria: eficiencia, sostenibilidad y competitividad del sistema portuario colombiano. Consejo Nacional de Política Económica y Social, República de Colombia.
- Everts, A. (2024). Everything you need to know about natural or geologic hydrogen. Hydrogen Science Coalition. Recuperado de <https://h2sciencecoalition.com/blog/everything-you-need-to-know-about-natural-or-geologic-hydrogen/>
- Freitas, V. A. de, Prinzhofer, A., Françolin, J. B., Ferreira, F. J. F., & Moretti, I. (2024). Natural hydrogen system evaluation in the São Francisco Basin (Brazil). *Science and Technology for Energy Transition*, 79, 95. <https://doi.org/10.2516/stet/2024091>
- GIZ Colombia. (2023). Producto 3 - Estudio técnico, económico e identificación de hubs de hidrógeno verde en Colombia. Fichtner GmbH & Co. KG Sarweystrasse. Alemania https://www.minenergia.gov.co/documents/11896/06.Hubs_de_hidr%C3%B3geno_verde.pdf

- GLZ Colombia. (2023). Hubs de hidrógeno verde en Colombia: Resumen ejecutivo. Fichtner. Alemania https://www.minenergia.gov.co/documents/11897/07.H2_Hubs_Executive_Summary.pdf
- Ministerio de Minas y Energía. (2015). Decreto 1073 de 2015: Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Minas y Energía. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77887>
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia: Un compromiso con la transición energética. https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja_Ruta_Hidrogeno_Colombia_2810.pdf
- Ministerio de Minas y Energía. (2024). Decreto 1597 de 2024: Por el cual se adiciona el Decreto [1073](#) de 2015, con el fin de establecer lineamientos de política pública para la gestión y promoción del Hidrógeno de bajas emisiones y/o sus derivados, y se establecen otras disposiciones. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=257096>
- Ministerio de Minas y Energía. (2023). Decreto 2235 de 2023: Por el cual se adiciona el Decreto 1073 de 2015 Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, con el fin de reglamentar el artículo 235 de la Ley 2294 de 2023 en lo relacionado con el desarrollo de proyectos de Hidrógeno Blanco en el marco de la Transición Energética Justa en Colombia. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=227190>
- Ministerio de Minas y Energía. (2023). Hoja de Ruta de la Transición Energética Justa – TEJ 2025: Resumen ejecutivo y oportunidades y desafíos socioambientales. Gobierno de Colombia. https://minenergia.gov.co/documents/13272/Hoja_de_ruta_transicion_energetica_justa_TEJ_2025.pdf
- NASA Earth Observatory. (2023). Circular Depressions Seep Hydrogen Gas. Recuperado de <https://earthobservatory.nasa.gov>
- Patiño, C., Piedrahita, D., Colorado, E., Aristizábal, K., & Moretti, I. (2024). Natural H₂ Transfer in Soil: Insights from Soil Gas Measurements at Varying Depths. *Geosciences*, 14(11), 296. <https://doi.org/10.3390/geosciences14110296>
- Prinzhofer, A., Cissé, C. S. T., & Diallo, A. B. (2018). Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(43), 19315–19326. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>
- Truche, L., & Bazarkina, E. F. (2019). Natural hydrogen the fuel of the 21st century. *E3S Web of Conferences*, 98. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199803006>
- Zgonnik, V. (2020). The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 203). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>



La Energía de Nuestra Gente