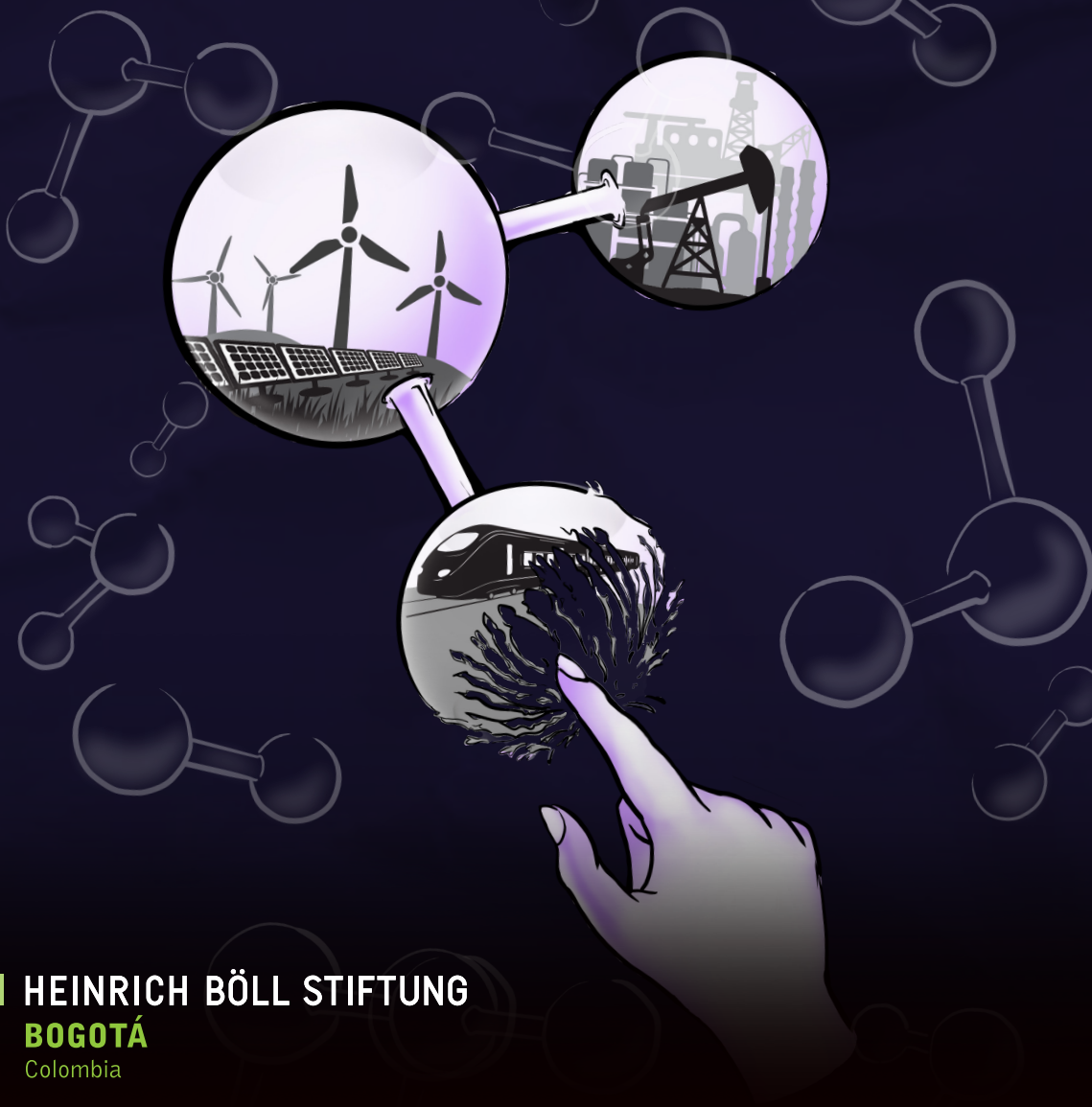
Hidrógeno en Colombia
SI SE HACE MAL, PODRÍA SER PEOR.
Reflexiones sobre su apuesta



HEINRICH BÖLL STIFTUNG
BOGOTÁ
Colombia

Santiago Enrique Aldana Rivera

Coordina los programas de Ecología, Sustentabilidad y Clima de la Fundación Heinrich Böll, en la Oficina de Bogotá. Estudió Administración Ambiental y es especialista en Gerencia de Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. También, en Derecho Ambiental de la Universidad del Rosario. Ha trabajado como investigador y consultor para varias ONG en temas de transición energética, política climática y derechos humanos y fue asesor de temas socioambientales, minero-energéticos y climáticos durante 2018-2022 en el Senado de la República de Colombia. Ha resultado elegido para asistir como delegado en discusiones internacionales sobre política climática.

Fabián Andrés León Peñuela

Investigador de la Oficina Colombia del Centro de Información sobre Empresas y Derechos Humanos. Enfoca su trabajo en temas relacionados con la responsabilidad legal empresarial en materia de derechos humanos, diligencia debida ambiental, derechos humanos y regulación de actores económicos. Es abogado de la Universidad Nacional de Colombia y economista y politólogo de la Universidad de Montreal (Canadá). También, especialista en Educación y Gestión Ambiental, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; en Justicia, Víctimas y Construcción de Paz de la Universidad Nacional de Colombia y candidato a magíster en Derecho Constitucional. Tiene experiencia con población migrante y refugiada, a la que atendió por más de seis años en Canadá. Ha acompañado procesos de formación ambiental y en derechos humanos con comunidades indígenas y campesinas.

Hidrógeno en Colombia
SI SE HACE MAL, PODRÍA SER PEOR.
Reflexiones sobre su apuesta

Santiago Enrique Aldana Rivera
Fabián Andrés León Peñuela

Bogotá, D. C.
2022

HEINRICH BÖLL STIFTUNG
BOGOTÁ
Colombia

Hidrógeno en Colombia
SI SE HACE MAL, PODRÍA SER PEOR.
Reflexiones sobre su apuesta

© Fundación Heinrich Böll, Oficina Bogotá - Colombia

Publicación con licencia Creative Commons (CC BY-NC-SA 4.0)
Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

ISBN: 978-628-95412-0-5

Fundación Heinrich Böll
Oficina Bogotá - Colombia
Calle 37 No. 15–40, Bogotá
Teléfono: (+57) 1 371 9111
co-info@co.boell.org
co.boell.org
Representante: Florian Huber

Primera edición
Diciembre de 2022

Impresión y acabados
AF Impresores S.A.S

Impreso y hecho en Colombia /
Printed and made in Colombia

Autores
Santiago Enrique Aldana Rivera
Fabián Andrés León Peñuela

Edición
Fundación Heinrich Böll
Oficina Bogotá - Colombia

Coordinación editorial
Ángela Valenzuela Bohórquez

Revisión de textos
Luisa María Navas Camacho

Diseño gráfico
Rosy Botero

Este documento puede descargarse gratuitamente en http://co.boell.org
Los textos que aquí se publican son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no expresan necesariamente el pensamiento de la posición de la Fundación Heinrich Böll, Oficina Bogotá - Colombia.

Índice general

Índice de tablas 4
Índice de imágenes 5

Siglas y abreviaturas 6

Introducción 9
Primer capítulo. ABC del hidrógeno 11
1. Qué es y qué no es el hidrógeno y su carácter de energía extrema 11
2. Producción del hidrógeno 13
   2.1. Métodos de obtención de hidrógeno 13
   2.2. Cromática del hidrógeno 17
   2.3. Hidrógeno gris, azul y verde 18
   2.4. Almacenamiento y transporte 20
3. Rol del hidrógeno en la transición energética 21
   3.1. Actuales y futuras aplicaciones del hidrógeno 21
   3.2. Hidrógeno para descarbonizar la energía y cumplir metas climáticas ... 24
   3.3. Solución al trilema de la transición energética 26
4. Incertidumbres técnicas y de impactos del hidrógeno 28
   4.1. Clima 29
   4.2. Agua y tierra 30
   4.3. Tecnología de captura, almacenamiento y uso del carbono (CCUS) 32
   4.4. Eficiencia energética 34
   4.5. Costo del hidrógeno 35
   4.6. Seguridad 36

Segundo capítulo. Tendencias internacionales y fines geopolíticos del hidrógeno 37
1. Papel y lugar de estas tecnologías en los discursos y políticas globales y nacionales de transición energética 37
   1.1. El sueño del hidrógeno 37
   1.2. Las necesidades en política pública 40
   1.3. Hojas de rutas y factores habilitantes del desarrollo del hidrógeno 41
2. Discurso empresarial y política climática internacional 43
   2.1. ¿Quiénes promueven el hidrógeno en el mundo? 43
   2.2. Pacto de Glasgow y otros compromisos en el contexto del Acuerdo de París 44

3. Proyecciones futuras 48
3.1. Proyecciones del mercado del hidrógeno..... 48
3.2. Rol de Latinoamérica en el desarrollo del hidrógeno 51

Tercer capítulo. El debate nacional sobre la transición energética 55
1. Transición en Colombia 56
1.1. ¿Cómo se ha abierto paso la transición energética en las políticas, normas y proyectos? 60
1.2. La ruta del hidrógeno 61
1.3. El hidrógeno verde y el azul en Colombia 63
2. Tensiones en la transición y los hidrógenos 67
2.1. Territorios de la transición 71
2.2. De Río Negro a la Guajira: ¿otra zona de sacrificio? 73

Cuarto capítulo. Reflexiones finales 78
1. Preguntas de justicia y democracia ambiental 78
2. El lugar de la Diligencia Debida 81
3. Los posibles impactos sobre los derechos humanos 87
4. ¿Cómo ha sido la toma de decisiones y cómo está diseñada para proyectos puntuales? 92
5. ¿Qué conexiones tiene el hidrógeno con el extractivismo? 94

Conclusiones 101

Referencias bibliográficas 106

Índice de tablas

Tabla 1. Principales métodos de producción de hidrógeno 13
Tabla 2. Tipos de hidrógeno por fuente, proceso y relación de generación de emisiones 17
Tabla 3. Tipos de almacenamiento de hidrógeno 20
Tabla 4. Empresas, casa matriz y sector de las empresas seleccionadas por el Fenoge para desarrollar proyectos de hidrógeno 71
Tabla 5. Riesgos, características e impactos del hidrógeno verde 89
Tabla 6. Colombia Impactos del desarrollo del hidrógeno por sus vínculos con el sector extractivo 100
Tabla 7. Promesas y desafíos en torno al hidrógeno 103

Índice de imágenes

Imagen 1. Aplicaciones posibles del hidrógeno. 22
Imagen 2. El final del petróleo era esto 27
Imagen 3. Descripción general de opciones de sitios para inyección de emisiones de CO_2 capturadas posterior de producción de hidrógeno azul 33
Imagen 4. Costos de producción de hidrógeno por fuente de producción, 2018 35
Imagen 5. Red en expansión de rutas comerciales, planes y acuerdos de hidrógeno 40
Imagen 6. Países que cuentan con estrategias de política pública de hidrógeno o que están en preparación, octubre de 2022..... 42
Imagen 7. Financiación anual media por país o grupo de países, potencialmente disponible para proyectos de hidrógeno, 2021-2030.. 43
Imagen 8. Producción mundial de hidrógeno por tipo de método..... 48
Imagen 9. Costo nivelado del hidrógeno, posterior a su método de producción 49
Imagen 10. Demanda global de hidrógeno por sector 50
Imagen 11. Demanda global de hidrógeno en fabricación por región ... 51
Imagen 12. Costes de hidrógeno de la energía solar fotovoltaica híbrida y el sistema eólico terrestre, a largo plazo 52
Imagen 13. Escenarios previstos por la UPME para el desarrollo del hidrógeno en Colombia. 59
Imagen 14. Matriz energética de Colombia. 2018 59
Imagen 15. Participación de Colombia en el mercado mundial del hidrógeno, en la perspectiva de 2050 62
Imagen 16. Fases del desarrollo normativo sobre transición energética e hidrógeno en Colombia 67
Imagen 17. Mapa de estrés hídrico de El Caribe colombiano 72

Siglas

ACGIH -	American Conference of Governmental Industrial Hygienists La Conferencia Estadounidense de Higienistas Industriales Gubernamentales
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BOGA	Beyond Oil and Gas Alliance - Más Allá del Petróleo y el Gas Natural
CCS	Carbon Capture and Storage - Sistema de Captura y almacenamiento de carbono
CCUS	Carbon Capture, Use and Storage - Sistema de Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono)
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
COP	Conference Of the Parties - Conferencia de las Partes
DEP	The U.S Deparment of State - Departamento de Estado de los Estados Unidos
DOT	The U.S. Department of Transportation - Departamento del Transporte de los Estados Unidos
ECOPETROL	Empresa Colombiana de Petróleos
EPA U.S.	Environmental Protection Agency - Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos
FNCE	Fuentes No Convencionales de Energía
CGEI	Gases de efecto invernadero
GFANZ	Glasgow Financial Alliance for Net Zero - Alianza Financiera de Glasgow para el Cero Neto
GLP	Gas Licuado de Petróleo
IEA	International Energy Agency - Agencia Internacional de Energía
IRENA	International Renewable Energy Agency - Agencia Internacional de Energía Renovable
MINENERGÍA	Ministerio de Minas y Energía
NFPA	The National Fire Protection Association - Asociación Nacional de Protección contra el Fuego
NZE	Net-Zero Emissions - Emisiones netas zero
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía

OPEP	Organización de Países Exportadores de Petróleo
PCI	Poder Calorífico Inferior
PEM	Proton-exchange membrane - Membrana de intercambio de protones
PEN	Plan Energético Nacional
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PROCAC	Programa Brasileño de Sistemas de Hidrógeno y Pilas de Combustible
RAT	Reformado autotérmico
REFICAR	Refinería de Cartagena
SOE	Membrana de estado sólido
UPME	Unidad de Planeación Minero-Energética

Fórmulas y símbolos

CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de carbono
H_2	Hidrógeno
kg	kilogramo
m^3	Metro cúbico
MJ	Megajoule
Mt	Millones de toneladas
NH_3	Amoníaco

Introducción

El hidrógeno participa de manera fundamental en todas las etapas de la transducción de energía que hacen posible la vida sobre nuestro planeta (Mendoza, 2006). Sus características llaman hoy la atención para poder cerrar la brecha energética, de confiabilidad, de contaminación y de eficiencia entre los combustibles fósiles y las energías renovables, con el fin de emprender las transiciones que necesitamos para enfrentar las crisis que vivimos cada vez con mayor intensidad.

Del hidrógeno se reconoce que su combustión genera solo agua, recordando las palabras de Julio Verne. En su libro *La isla misteriosa*, publicado en 1874, alcanzó a predecir que se podría generar más energía a partir del agua, que del mismo carbón que sostiene aún parte de nuestras sociedades y economías. Sin embargo, a pesar de la energía potencial que guarda el hidrógeno en sus enlaces, las tecnologías para obtenerlo se encuentran en fase de maduración, lo que trae mucha incertidumbre sobre su despliegue.

En igual forma, han sido varias las ocasiones en las que el hidrógeno, a pesar de sus oportunidades, no ha podido despegar. No obstante, en estos últimos años, los gobiernos se enfrentan con mayor dureza al trilema energético[1], apoyado por pandemias y conflictos entre países que son potencias de la energía, lo que, los llama a defender el desarrollo a cuestas de la agenda de derechos humanos. De esta manera, en estos últimos cinco años, varios gobiernos han posicionado al hidrógeno en la agenda pública para declararlo la energía del futuro, dando línea sobre a dónde deben ir los territorios con mayor potencial de fuentes energéticas primarias, tanto fósiles como renovables. Este es el caso

1. El trilema energético se cuestiona: ¿cómo lograr en los próximos años seguridad energética para el crecimiento económico, al tiempo con la equidad energética para la estabilidad social y con la sostenibilidad ambiental para el mundo?

del globo sur, donde aún no se lleva una profunda discusión sobre su impacto socioambiental del hidrógeno.

El hidrógeno tendría la posibilidad de modificar toda la geopolítica energética del mundo y quitar el mercado a quienes lo poseen actualmente. Sin embargo, a medida que se observa al hidrógeno como vector energético, se generan varias preocupaciones, en especial, por observase que, a cambio, podría profundizar el monopolio de los que concentran la energía, generar mayor gasto energético y acentuar la crisis climática. Como bien se sabe, la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma y, para el caso del hidrógeno, también tendría graves repercusiones su transformación a partir de las formas como se obtenga.

Este libro se construye con el fin de entender el hidrógeno como elemento y vector energético, para, luego, reflexionar sobre cómo se incluiría y potenciaría en la cadena de valor de los sistemas energéticos presentes y futuros en los ámbitos global, regional y nacional. Además, para indagar sobre el rol que tendría Colombia en esta transición y acerca de los dilemas que despertaría de cara a enfoques de democracia y justicia ambiental.

El texto se propone como un insumo para las discusiones nacionales que se adelantarán con el nuevo gobierno y con el sentido de urgencia de las crisis que nos persiguen hoy en día. A pesar de haberse permitido la entrada del hidrógeno en el país mediante la Ley 2099 de 2021, fue poco lo que se le permitió a la ciudadanía conocer sobre las implicaciones de este vector energético. Así, se espera que este sea un insumo para profundizar la discusión y promover mayor investigación sobre la conveniencia o no del hidrógeno, en clave de criterios de justicia social y ambiental para los próximos años.

Primer capítulo.
ABC del hidrógeno

1. Qué es y qué no es el hidrógeno

Al hidrógeno lo recordamos por ser el primer elemento dentro de la tabla periódica. Esa posición no es un evento del azar. De hecho, está allí por ser el más abundante en todo el planeta Tierra y en el universo. Su átomo, conformado por un protón y un electrón (la mayoría de veces, pues existen tres formas de encontrarlo), es imperceptible a simple vista en estado gaseoso, de modo que es ligero, incoloro, inodoro e insípido para nuestros sentidos (Centro Nacional del Hidrógeno, 2022).

El hidrógeno, por su estructura, se encuentra combinado con otros elementos como el oxígeno, formando moléculas básicas para la vida como el agua, el carbón y otros compuestos orgánicos. Esta cualidad hace que tenga la capacidad de proporcionar energía, pero, por su disposición natural, no se pueda aprovechar de manera directa en gran parte de los casos. Esa es la razón de que se le defina como vector energético.

Los vectores energéticos son sustancias o dispositivos capaces de almacenar energía, de tal manera que puede liberarse de manera controlada en otro lugar o momento posterior de aprovecharse o extraerse la energía. Se consideran vectores porque la energía que se obtiene proviene de fuentes primarias de energía. Algunas de estas fuentes son el Sol, los combustibles fósiles, el viento y el movimiento del agua (Benjumea, 2020).

Tal diferenciación es clave para el entendimiento del hidrógeno porque, cuando se trata de él, no es que se aproveche energía pura, sino que, simplemente, conseguirla es un producto de la aplicación de la energía primaria, que puede controlarse para su posterior uso. Es decir, una parte de la energía empleada queda almacenada en nuevos enlaces químicos formados (Area, Lardini, Sánchez, Fernández, & Ferrer, 2019). Es así como el hidrógeno puede compararse con

la electricidad, un vector energético generado por la combustión del carbón, la absorción de la radicación solar, el movimiento de nuestros ríos u otras formas de generación y que la captan varios sistemas para transportarla, almacenarla y consumirla.

El hidrógeno, como la electricidad, requiere de energía y tecnología para producirse. Debido a que se encuentra en la tierra combinado con otros elementos, es preciso, para utilizarlo como fuente de energía, obtenerlo libre a partir de un compuesto que lo contenga. En esta forma, mientras la simple unión del hidrógeno con otros elementos como el oxígeno libera energía mediante el agua, en el caso contrario, para su separación, requiere de energía para aprovecharlo en su manera más pura. Esta energía puede provenir de diferentes fuentes primarias, junto con vectores energéticos como la electricidad, que permiten encasillar, dependiendo de la fuente de energía, el tipo de hidrógeno que se genera y sus subproductos.

Para el aprovechamiento de la energía que guarda el hidrógeno en sus enlaces, cedida en su separación, se requiere de un proceso complejo denominado *reacción química exotérmica de oxidación–reducción* entre una sustancia reductora (el hidrógeno) y una sustancia oxidante (como el oxígeno). La importancia de esta reacción es el poder calorífico, que se refiere a la energía liberada en la reacción de una combustión, ya sea por unidad de masa, o por unidad de volumen.

Al compararse el hidrógeno con otro combustible fósil, por ejemplo, la gasolina, con respecto a su Poder Calorífico Inferior (PCI), es decir, a la cantidad de calor realmente aprovechable, se observan varios dilemas de eficiencia energética. Mientras la gasolina tiene un PCI de 43,95 Megajoule (MJ) /kilogramo (kg) y el hidrógeno 120,01 MJ/kg, se observa que el hidrógeno tiene casi tres veces mayor poder calorífico por unidad de masa. Esto último indica que es un combustible excelente a nivel energético (Energía Junta de Castilla y León, 2022).

No obstante, debido a la baja densidad del hidrógeno en condiciones ambientales (0,09 kg/metro cúbico, m^3) en relación con la gasolina (730 kg/m^3), la energía por volumen que ofrece el hidrógeno (0,0108 MJ/litro) es aproximadamente 3.000 veces inferior a la de la gasolina (32,08 MJ/litro) (A. Mulero, 2018). Esto quiere decir que, para aprovechar el alto valor energético del hidrógeno, por ejemplo, movilizando un vehículo, es necesario almacenarlo en dimensiones de volumen y seguridad adecuadas. Tal condición se conseguiría comprimiendo a altas presiones (entre 350 y 700 bar[2]) o licuándolo

2. Bar es una unidad de presión utilizada en aire comprimido.

y manteniéndolo a temperaturas criogénicas menores a 253 °C. Así, se trata de un proceso costoso económica y energéticamente hablando (Cervantes, 2013).

Sin embargo, de la energía química contenida en el hidrógeno, se puede obtener, además de calor, energía cinética y electricidad, También, es posible transformar el hidrógeno en varios productos derivados, entre ellos, vectores energéticos sintéticos basados en hidrógeno y productos químicos básicos como el metanol, el amoniaco, el metano sintético y los combustibles sintéticos (los llamados *e-fuels*). Este proceso se denomina Power to X (PtX). La X es un marcado de posición para el producto derivado, por ejemplo, amoníaco.

De igual manera, el hidrógeno se utiliza para mejorar la combustión en motores convencionales tanto diésel como gasolina. En este proceso, el hidrógeno añade mayor combustión y aumenta la potencial.

2. Producción del hidrógeno

2.1. Métodos de obtención de hidrógeno

El hidrógeno, por su abundancia y su potencial energético como vector de transición, se ha estudiado ampliamente para diversificar las fuentes de producción. En esta forma, en la actualidad, se pueden producir desde diversas materias primas, distintas fuentes de energía y variados métodos y procedimientos.

Desde las fuentes de energía, la producción puede ser 100 % renovable, 100 % de combustibles fósiles o una mezcla de ambas procedencias. De igual manera, la producción puede darse en grandes centrales o en pequeñas unidades distributivas, ubicadas cerca o dentro de los puntos de uso, dada la ligereza del hidrógeno en la cadena de valor de los sistemas energéticos.

Los principales tipos de métodos para obtener hidrógeno son: termoquímicos, electrolíticos, biológicos y otros. Se encuentran descritos en la tabla 1.

Tabla 1. Principales métodos de producción de hidrógeno

Métodos termoquímicos	Métodos electrolíticos	Métodos biológicos	Otros métodos
En estos métodos se usan calor y reacciones químicas para obtener el hidrógeno de combustibles convencionales (fósiles) o de biomasa. A continuación, en esta misma columna, algunos de ellos:	El agua se disocia en hidrógeno y oxígeno usando electricidad. Se requiere hacerlo con agua de alta pureza para evitar la deposición de minerales y la descomposición de las celdas que separan las partículas. A continuación, alguno de ellos:	Bacterias y algas en sus procesos biológicos propios pueden producir hidrógeno. A continuación, algunos de ellos:	
Reformado de gas metano con vapor (SMR): Es el proceso mediante el cual el metano (CH_4) se somete a un tratamiento térmico y luego se mezcla con vapor a alta temperatura y presión para obtener hidrógeno y otros compuestos, entre ellos, dióxido de carbono. Para obtener hidrógeno de alta pureza, se requiere entre sus etapas de producción, luego de la compresión y purificación del metano, vapor de agua a temperaturas altas (1.000 °C) y presiones medias de entre 20 y 30 bares. Es, por ahora, uno de los métodos con mayor eficiencia térmica, con menores emisiones y más bajo costo en grandes unidades. Sin embargo, es un proceso complejo y sensible a la calidad del gas natural.	Electrolizadores alcalinos: son un tipo de electrolizadores que utilizan un líquido electrolítico de solución acuosa de hidróxido de potasio o de hidróxido de sodio. Su tecnología es de las más avanzadas y maduras. Pueden producir entre 40 y 70 kilogramos de H_2 por hora, solo necesitan temperaturas que oscilen entre 60 y 80°C y usan presiones a nivel atmosférico. Tienen una vida útil de cinco años y una eficiencia de entre 47 y 82 %. Estos electrolizadores requieren de energía constante que alimente el sistema, por lo que su desarrollo encuentra dificultades con energías renovables.	Descomposición biológica del agua: Puede realizarse mediante microrganismos fotosintéticos que son capaces de descomponer el agua en oxígeno e hidrógeno. Algas como la Scenedesmus, producen hidrógeno bajo dos condiciones, (1) bajo luz visible o (2) en ausencia de aire (anaerobia) y luz. Este método presenta menor producción de H2 por unidad de peso, pero tiene gran estabilidad debido a la ausencia de oxígeno. También las cianobacterias, como la Spirulina, producen hidrógeno mediante la fermentación en condiciones similares a las algas, siendo esta especie de alga la que presenta actividad más elevada en su tipo. La eficiencia del método de descomposición biológica del agua en hidrógeno es bastante baja, pero este hecho puede compensarse con el costo reducido de inversión.	Descomposición foto catalítica del agua: El proceso corresponde a la obtención directa del hidrógeno a partir de agua gracias a la incidencia de rayos solares en semiconductores inmersos en una solución acuosa. La eficiencia de este proceso es baja y está aún en investigación básica.

Continúa...

... viene

Oxidación parcial: consiste en mezclar combustible de hidrocarburos con oxígeno para formar una mezcla de hidrógeno y gas comprimido. El proceso utiliza hidrocarburos pesados, incluidos brea de desasfaltado y coque de petróleo. Estos se precalientan y luego se mezclan con oxígeno dentro de una cámara de combustión a alta temperatura, lo que causa la oxidación parcial del combustible y produce una mezcla de hidrógeno y monóxido y dióxido de carbono. Se utiliza principalmente para producir H_2 utilizado en aplicaciones de refinería, de producción de gas de síntesis a partir de carbón y energía eléctrica a partir de coque de petróleo y brea de desasfaltado mediante ciclos combinados integrados con turbinas a gas (IGCC, por sus siglas en inglés).	Membrana de intercambio de protones (PEM): se utiliza una membrana polimérica con carácter ácido, que es responsable del intercambio de protones del hidrógeno. Los electrodos son, normalmente, metales nobles como el platino o el iridio. Este método está disponible de manera comercial, siendo utilizado en aplicaciones de pequeña escala. La PEM es uno de los primeros electrolizadores. Se desarrolló en 1966 y se comercializó en 1978. Diferente a los electrolizadores alcalinos, la PEM tiene la habilidad de trabajar bajo variaciones de potencia, ya que responde rápido a las fluctuaciones.		Hidrógeno, como subproducto de otros procesos: en la producción de acero se genera hidrógeno como subproducto. Para utilizarlo, debe recolectarse y tratarse, siendo un desafío conseguir un nivel de pureza apto para una celda de combustible. .
Reformado autotérmico (RAT): es una combinación entre los dos anteriores procesos (reformado de gas metano con vapor y oxidación parcial) en la que el calor resultante de la oxidación parcial es transferido al proceso de reformado. Las materias primas de este método pueden ser gas natural, gases residuales de refinería, gas preformado, gas licuado de petróleo (GLP), nafta y otras. Tanto el RAT como la oxidación parcial son métodos benéficos por su menor tamaño de instalaciones, los bajos costos para pequeñas unidades y la simplicidad del sistema. No obstante, tiene menor rendimiento, es baja la pureza del H_2 que se produce y genera más emisiones de GEI que el reformado de gas metano con vapor.	Membrana de estado sólido (SOE): se usa una membrana sólida cerámica, que presenta una buena conductividad. Este método está en fase de investigación a pesar de haberse creado en los pasados años sesenta, en Estados Unidos y Alemania. La SOE puede ser más eficiente que los electrolizadores alcalinos y que la PEM. Requiere de temperaturas entre los 600 y los 900 °C. El objetivo de esta tecnología es aumentar la temperatura de operación, lo que la vuelve atractiva cuando existe una temperatura alta, por ejemplo, para aplicaciones combinadas de calor y potencia. Se ha mostrado que fuentes de geotermia y el uso de concentración solar podrían aportar el calor que necesita este método.		Pirolisis: Se usa metal fundido, alimentado con gas natural. En el proceso, el gas natural pasa a través de un metal fundido, y libera hidrógeno y carbono sólido, con lo que se evitan emisiones contaminantes de CO_2. Aún está en fase de estudio

continúa...

... viene

Gasificación del carbón: proceso que convierte, parcial o completamente, el carbón en gas comprimido. Después de purificado, se usa en la combustión de turbinas de gas para producir electricidad, en calidad de materia prima para síntesis químicas como amoniaco, como combustible líquido y en la producción de metano, o metanación, para obtener gas natural sintético. Es uno de los procesos más usados en la actualidad. Gasificación de biomasa: es un método de oxidación parcial que convierte la biomasa en gas de síntesis en presencia de un agente gasificador como el aire, vapor, oxígeno o CO2. Se emplean biomasa terrestre y biomasa marina. De otro lado, existe la fermentación oscura que se utiliza con bacterias que consumen materia orgánica y generan hidrógeno molecular. Descomposición térmica del agua: proceso de disociación de la molécula del agua mediante calor. Se requieren temperaturas superiores a los 2.500 °C y se utilizan ciclos termodinámicos con diferentes reacciones químicas intermedias para producir H2 a temperaturas más bajas, 850-1.000 °C.			

Fuente: elaboración propia a partir de Vásquez & Salinas (2018) y Parra (2020)

2.2. Cromática del hidrógeno

De manera reduccionista, se ha dicho que el hidrógeno es un vector energético que genera agua como subproducto. A pesar de que el hidrógeno puro combustionado con oxígeno es capaz de validar dicha afirmación, lo cierto es que para sostenerla se necesita conocer su fuente de energía, el método implementado y la disposición que se hace de los subproductos generados además del hidrógeno.

La ciencia y el mercado de este vector energético han buscado categorizar las formas de producir hidrógeno mediante colores. A medida que avanzan el desarrollo del elemento y su despliegue por su abundancia, son cada vez más las categorías que existen, que vinculan tanto los métodos de producción antes mencionados, como las fuentes de energía y otros vectores energéticos. La escala cromática del hidrógeno se describe en la tabla 2.

Tabla 2. Tipos de hidrógeno por fuente, proceso y relación de generación de emisiones

Color	Fuente	Método	Alcance de generación de emisiones de GEI
Gris	Gas natural o petróleo	Reformado de gas metano con vapor Oxidación parcial	Generación de emisiones de CO_2
Marrón	Carbón	Reformado autotérmico Gasificación de carbón Gasificación de biomasa	Altas emisiones de CO_2
Azul	Gas natural o petróleo	Reformado de gas metano con vapor Oxidación parcial Reformado autotérmico Tecnología de Captura, Almacenamiento y Uso del Carbono (CCUS, por sus siglas en inglés)	Bajas emisiones (captura de CO_2 no es totalmente efectiva. Véase sección 4.3
Turquesa	Fósil (sobre todo gas natural)	Pirolisis	Nulas o bajas emisiones de CO_2 (se obtiene carbono sólido, según la fuente desde la que se impulse la pirólisis).

Continúa...

... viene

Rosa	Energía nuclear	Electrolisis	Residuos nucleares
Amarillo	Fuentes mixtas de generación de electricidad	Electrolisis	La producción de emisiones dependerá de las fuentes usadas para generar electricidad
Verde	Electricidad o energía a partir de fuentes renovables	Electrolisis	Emisiones nulas.
Dorado	Amoniaco, biogás (biometanol), gas natural	Membranas cerámicas protónicas Reformado de gas metano con vapor (SMR) Tecnología de Captura, Almacenamiento y Uso del Carbono (CCUS, por sus siglas en inglés)	Bajas o negativas (si se consideran las capturadas y/o evitadas por la descomposición del biogás)
Blanco	Yacimiento de petróleo	Fracking (estrategias de explotación no viables por ahora)	En estudio

Fuentes: elaboración propia a partir de Pérez, 2022; Linares, Moratill, & Pinilla, 2020 y Ojea, 2021.

La cromática del hidrógeno hace que sea difícil ubicar estrategias e incentivos para fomentar su despliegue e incorporación en las cadenas de valor de los sistemas energéticos. Por esta razón, diversos gobiernos y hacedores de política pública han centrado sus esfuerzos en priorizar la taxonomía del hidrógeno gris, azul y verde.

2.3. Hidrógeno gris, azul y verde

La principal diferencia entre el hidrógeno gris y el azul es que el primero no posee Sistemas de Captura, Almacenamiento y Uso de Carbono (CCUS, por sus siglas en inglés). Estos sistemas tienen como fin evitar la emisión de CO_2 a la atmósfera a causa del uso de combustibles fósiles en el proceso de generación del hidrógeno, para, eventualmente, almacenarlos o generar un reciclaje de emisiones que permitan contenerlas de manera segura y permanente (RCN on CCUS, 2022).

Sin los sistemas de CCUS, el hidrógeno azul no tendría sentido, ya que su fin es ser una alternativa que limite los impactos perjudiciales de la crisis climática por medio de la captura de CO_2 y sostenga el consumo energético del mundo. Sin embargo, su despliegue se ha entorpecido por ser altamente costoso al implicar el desarrollo de absorbentes que permitan eficazmente evitar la emisión de CO_2.

De otro lado, alrededor de las CCUS persiste el debate sobre el destino del CO_2. En la actualidad, existen proyectos que inyectan el CO_2 en formaciones geológicas y océanos, junto con la siembra de árboles orientada a la fijación biológica del CO_2 mediante la fotosíntesis; mientras tanto, algunas compañías han usado estas emisiones para producir materiales de construcción, extraer petróleo o para la remedición de desechos industriales alcalinos; de esa manera, se genera valor económico a este gas de efecto invernadero, pero sin ser aún suficiente para su despliegue de manera coherente con el propósito de estos sistemas.

Debido a que la implicación de estas tecnologías u otras estrategias de gestión del carbono se ven como un costo que puede incrementar el precio de la energía, su introducción de se ha hecho por presión regulatoria: para compensar la ausencia de una viabilidad económica, se ha propuesto incluir en los presupuestos del hidrógeno, los costos sociales y económicos de no adelantar las CCUS. No obstante, la eficiencia de estas tecnologías no garantiza guardar el carbono bajo a tierra, sino a cambio retrasar su llegada a la atmósfera, de modo que se profundiza, eventualmente, la crisis del sistema climático para las futuras generaciones.

Por el otro lado, el hidrógeno verde es la solución soñada para la transición energética de los gobiernos y empresas. Al depender de fuentes de energías renovables como la energía solar, eólica e incluso la biomasa, sus productos en emisiones son nulas, llamando así la atención de ser la principal estrategia para descarbonizar la matriz energía hacia 2050.

Sin embargo, el hidrógeno verde presenta las mismas desventajas de las energías renovables. Sus elevados costos y su lentitud en desplegarse ponen barrera para que el hidrógeno sea también masivo. Asimismo, la dependencia de su generación con sistemas conectados refuerza el concepto de los sistemas interconectados que promueven la centralización de la energía, sin permitir una efectiva autonomía energética. Aun así, el hidrógeno de este tipo resulta ser la pieza faltante para garantizar confiabilidad en los sistemas energéticos, ya que el hidrógeno, al ser un vector energético, permite almacenar, transportar y generar la energía de manera constante, algo que las energías renovables no pueden hacer.

A pesar de las ventajas ambientales y climáticas del hidrógeno verde, en la actualidad, el hidrógeno azul es mucho más barato y tiene mayor confiabilidad por:

- Aprovechar para su producción y distribución la estructura existente de la industria de combustibles fósiles.
- No depender de minerales nobles y extraños como el platino, el paladio, el titanio, entre otros, en los procesos de obtención.

- Requerir menos energía: al menos, seis veces menos energía de la que se requiere para producir hidrógeno verde (Area, Lardini, Sánchez , Fernández, & Ferrer, 2019).

2.4. Almacenamiento y transporte

Una de las aplicaciones más importantes del hidrógeno es su uso como almacenamiento de energía. Este punto es clave en su introducción al mercado por ser su principal ventaja competitiva. El hidrógeno, dado que tiene una alta densidad energética por unidad de masa, pero a la vez, ocupa mucho volumen, requiere de diferentes formas de almacenamiento. Entre ellas, están las que se describen en la tabla 3.

Tabla 3. Tipos de almacenamiento de hidrógeno

Tipos de almacenamiento de hidrógeno	
Almacenamiento como gas comprimido	Es la técnica con mayor despliegue y es, eventualmente, una de las que implican menores costos. En esta forma, solo se almacenan cantidades relativamente pequeñas de hidrógeno y su masificación aún se encuentra en desarrollo.
Como hidrógeno liquido	Es la tecnología más empleada. Permite una buena densidad de almacenamiento, pero requiere temperaturas muy bajas, lo que hace que se necesite un aislamiento mayor de lo normal y, por lo tanto, se eleva su costo.
Como hidruros metálicos	En esta forma, el hidrógeno se almacena sobre un sólido (metal). Al utilizarse metales, según la aplicación que se use, los pesos, la vida útil y el costo se elevan considerablemente.
Como hidruros químicos	Son sistemas compactos que exigen infraestructuras especiales.
Como estructuras de carbono	Entre estas estructuras están los nanotubos, que permiten una elevada densidad de almacenamiento de hidrógeno, a la vez que son ligeras.

Fuente: Elaboración propia a partir de Energía Junta de Castilla y León (2022)

Finalmente, la distribución del hidrógeno se hace en su estado gaseoso (a presión), o en su estado líquido (criogénico), aprovechando algunos métodos de almacenamiento y redes existentes, lo que favorece los tipos de hidrógeno dependientes de combustibles fósiles.

3. Rol del hidrógeno en la transición energética

3.1. Actuales y futuras aplicaciones del hidrógeno

Sin saberlo, Henry Cavendish descubrió en 1766 lo que hoy se llama la energía del futuro. En sus experimentos, encontró que al poner ácido sobre algunos metales se desprendía un gas inflamable desconocido, al que, posteriormente, Antoine Lavoisier bautizó como hidrógeno, por tener la capacidad de formar agua al oxidarse y ser fundamental para la vida (Zschimmer & Schwarz, 2020).

Desde esa época, los estudios y aplicaciones adelantados, han encontrado aplicación, en especial, en refinación y usos industriales. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) en 2020 se demandaron, aproximadamente, 90 millones de toneladas (Mt) de hidrógeno: 70 de ellas, se utilizaron como hidrógeno puro y menos del 20 Mt se mezclaron con gases que contienen carbono, para producir metanol y fabricar acero (IEA, 2021). Estos usos y la ausencia del despliegue de tecnologías capturadoras de CO_2 han hecho que se generen cerca de 900 Mt de emisiones de CO_2 por año, unas tres veces las emisiones generadas por Colombia en 2020 (291,30 Mt emisiones CO_2 eq) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

La refinación del petróleo es la mayor consumidora de hidrógeno en la actualidad. Alcanzó consumos cercanos a los 40 Mt en 2020, que es la tendencia a corto y mediano plazo. El hidrógeno se produce, normalmente, *in situ* o se compra a empresas dedicadas a su producción, donde, para obtenerlo, se emplea reformado de metano con vapor (IEA, 2021).

Para el caso del sector industrial, el consumo en 2020 alcanzó las 51 Mt y la producción química consumió aproximadamente 46 Mt. De estas últimas, ¾ partes se utilizaron para producir amoniaco y ¼, para el metanol. Los 5 Mt restantes se consumieron en el proceso de reducción directa de hierro para la fabricación de acero. Solo 0,3 Mt de la demanda de 2020 se cubrió con hidrógeno bajo en carbono (plantas con CCUS de gran escala, pequeñas unidades de electrólisis en el subsector químico y proyectos de CCUS en el hierro y siderúrgico), un 20% más que en 2019 (IEA, 2021).

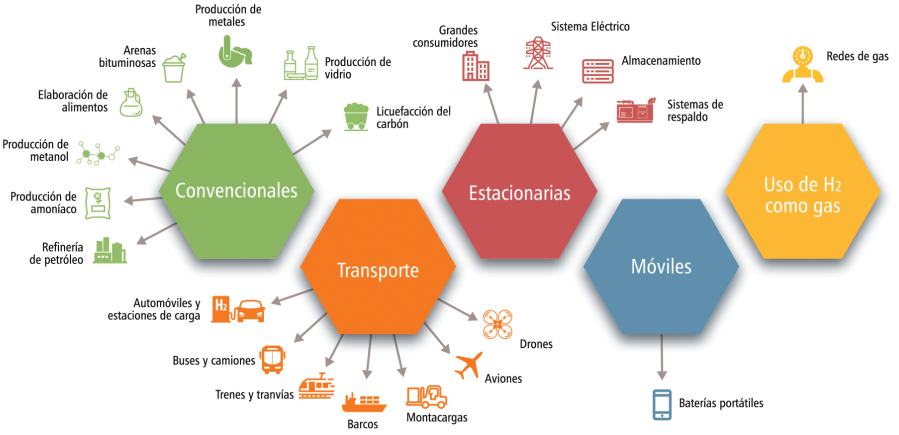
La industria aún no reconoce las oportunidades que plantea el hidrógeno bajo en o cero emisiones. Según el Escenario de Emisiones Netas Cero para 2050, se espera que la demanda total del hidrógeno de la industria aumente un 44 % para 2030, en espera de que el hidrógeno bajo en emisiones ascienda a 21 Mt en este mismo año. No obstante, el análisis de cartera de proyectos hechos por la IEA demuestra que solo se cubriría el 18 % de la demanda de hidrógeno

para 2050 con la tendencia actual y apenas se podría producir 1 Mt en proyectos equipados con CCUS y 3 Mt con proyectos electrolíticos bajo el hidrógeno verde (IEA, 2021).

En igual forma, en el caso del sector químico, a pesar de que la demanda para 2030 se proyecta en 54 Mt, solamente entre 2,3 y 3,1 Mt anuales se podrían producir con hidrógeno bajo en carbono para final de la década. Un patrón parecido al de otros subsectores como del hierro y el acero (IEA, 2021).

A pesar del panorama en el sector de la industria y los químicos, el hidrógeno se proyecta en múltiples aplicaciones, en la premisa de su viabilidad energética y de su bajo aporte en emisiones. Esas aplicaciones se agrupan, principalmente, en usos convencionales, en transporte, estacionarias, móviles y en el uso de hidrógeno como gas (véase imagen 1).

Imagen 1. Aplicaciones posibles del hidrógeno.



Fuente: Vásquez & Salinas, 2018

En los usos convencionales, se ha reconocido la posibilidad del hidrógeno de mejorar combustibles como la gasolina, el diésel, el crudo sintético, el metanol, entre otros hidrocarburos líquidos. Es un catalizador de generación de valor para estos combustibles (Vásquez & Salinas, 2018).

De otro lado, manteniendo la tendencia de producción de amoniaco (NH_3) a partir del hidrógeno, se ha planteado su uso como otro vector energético con potencialidad de ser utilizado en calidad de componente de fertilizantes en la agricultura. Su avance se sustenta en el contexto de la seguridad alimentaria para los próximos años, ante la intensa degradación de suelos causada por la

famosa Revolución Verde. Su desarrollo bajo en carbono podría enfrentar la responsabilidad actual del amoniaco en emisiones, al consumir el 1 % de toda la energía generada en la actualidad, que produce unos 420 millones de toneladas de dióxido de carbono por año (Mt CO_2/año) (IEA, 2021).

De igual manera, el hidrógeno tendría un papel en la producción de margarina para la elaboración de alimentos y en la reducción de imperfecciones en la producción de vidrio (Vásquez & Salinas, 2018).

En cuanto a la aplicación en el sector transporte, es quizás una de las que mayor atención ha recibido por su potencialidad de garantizar, a la vez que reduce su huella de carbono, actividades que requieren una alta demanda de energía: los desplazamientos en aviones, barcos trenes y buses e, incluso, militares.

En el mismo sector, la brecha entre las energías renovables de garantizar confiabilidad al sistema energético podría subsanarse gracias al hidrógeno. En automóviles, se han empezado a desarrollar tecnologías de celdas de combustible y los principales productores de carros comienzan a usarlas para venta de vehículos comerciales, de carreras y militares, como tanques de guerra en Estados Unidos. De otro lado, a pesar de tener un escaso avance, en Europa, Asía, América del Norte y Australia tienen estaciones de carga para alimentar estos vehículos (Vásquez & Salinas, 2018).

En el caso de buses, transporte de carga, barcos y aviones, el desarrollo del hidrógeno está, todavía, en su mayoría, en proyectos piloto, pero demostrando grandes oportunidades para transitar hacia este elemento. Países como Estados Unidos han construido camiones que funcionan a partir de hidrógeno. En China, ya se prueban trenes y tranvías con este vector, que podrían llevar hasta 300 pasajeros. En Noruega y Bélgica, se prueban barcos transbordadores de pasajeros híbridos, que utilizan el diésel y el hidrógeno para movilizarse. Y en Alemania, se llevan a cabo los primeros vuelos comerciales a partir de un tren de potencia de celda de combustible de hidrógeno, a cortas distancias y pequeñas escalas (Vásquez & Salinas, 2018).

Entre los principales beneficios de la aplicación del hidrógeno se reconocen los siguientes: i) la eficiencia mejorada por ofrecer batería de larga duración, ii) potencia constante y fiable al no generar pérdidas de energía, iii) ahorro de costos por uso menor de combustibles y eliminación de costos de consumo de electricidad, iv) ahorro de espacio por no utilizar baterías de gran tamaño y v) mejora ambiental por evitar emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y material particulado en su combustión.

También, ha sonado el hidrógeno para tener aplicaciones estacionarias, es decir, instalar celdas en una locación fija y contar con energía primera que dé respaldo, electricidad y calor. Al menos, en 2016, se calculaban más de 100.000

dispositivos que se estaban usando para estos fines, siendo más popular su uso como energía de respaldo para instalaciones de telecomunicaciones.

Esta última forma de uso tiene potenciales ventajas en ordenamiento y espacio, ya que evitaría la instalación de pesados equipos de energías renovables en lugares con alta densidad de infraestructura. Asimismo, en la actual era digital el hidrógeno entraría a suministrar energía a grandes almacenes, centros de datos, plantas de tratamiento de agua, aeropuertos y hospitales. Este es el caso de empresas como Adobe, Apple, AT&T, Coca-Cola, eBay, Google, Honda, Microsoft, Walmart, entre otras, que tienen sistemas de provisión de energía con base al hidrógeno en la actualidad (Vásquez & Salinas, 2018).

Asimismo, ante la necesidad de los sistemas eléctricos de garantizar balance en generación y consumo energético, el hidrógeno se está considerando con posibilidades de producir electricidad. En ello, se reconocen ventajas como variar su generación con rapidez, conectarse y desconectarse sin mucho impedimento, aumentar su consumo eléctrico de manera rápida y almacenar energía durante un periodo significativo para entregarla posteriormente a la red, de modo que se responda ante el incremento de consumo energético de la humanidad.

Empresas y científicos creen que el mundo del hidrógeno podría apoyar al eléctrico para construir un ciclo que responda a la demanda energética y sostener las mismas actividades que hoy nos tienen en crisis, a la espera de un despliegue masivo de energías renovables o sistemas de captura que retrasen las emisiones de estas actividades. Así, la aplicación del hidrógeno en sistemas eléctricos podría ser una vía para generar más hidrógeno y a la vez perfeccionar combustibles y aportar calor y electricidad a empresas, hogares y demás entidades (El periódico de la energía, 2020).

3.2. Hidrógeno para descarbonizar la energía y cumplir metas climáticas

El sector energético es el responsable de casi ¾ partes de las emisiones GEI que han hecho aumentar la temperatura mundial en una media de 1,2 °C desde la era preindustrial. No obstante, aún los escenarios proyectan altas presiones sobre él y estiman que no se debilitarán en las próximas décadas (PNUD, 2022).

Al mismo tiempo, la energía moderna forma parte de nuestras vidas diarias y de las aspiraciones de la población mundial, que crecerá en unos 2.000 millones de personas de aquí a 2050 (UN, 2019). Asimismo, la forma como se abordan el desarrollo y el incremento de demanda de servicios energéticos, en muchas economías mal llamadas en desarrollo, atraviesan una fase caracterizada

por un alto consumo de energía y un notorio crecimiento de las emisiones de GEI debido a la urbanización y a la industrialización. Estas economías buscan garantizar su derecho al desarrollo, igual que lo han tenido las potencias mundiales hasta ahora.

De otro lado, mientras el sistema energético asume estas presiones, aún no ha sido capaz de hacer frente a los desafíos hacia una revolución de energías bajas en emisiones, en mora de responder al sentido de urgencia de la crisis climática. Según el IPCC, para mantener el calentamiento por debajo de 1,5 grados centígrados, los países deben reducir las emisiones en, al menos, un 45 % para 2030, en relación con los niveles de 2010 (UN, 2022). De esta manera, entre la brecha de los combustibles convencionales y de las energías las renovables, el hidrógeno se ha planteado como una oportunidad para solucionar la responsabilidad del sector energético a mediano y largo plazo, en miras a responder a los compromisos internacionales comunes referidos a la crisis climática, como es el Acuerdo de París, y a garantizar la demanda energética para los próximos años.

Entre los fines de la transición energética, se ha encontrado en el hidrógeno la posibilidad de contribuir al sostenimiento de productos y aplicaciones de las que nuestra sociedad moderna no ha querido prescindir, para que sean más respetuosas con el clima, de cara a 2050, cuando se habrá pasado el punto de no retorno de seguir el mundo como va. El hidrógeno azul y el verde han tenido resonancia en estos últimos años por ser aquellos con los que las empresas extractivas pueden perpetuar sus actividades, en especial, por el despliegue de las tecnologías de captura y uso de carbono.

No obstante, está lejos de lograrse la ayuda que podría dar el hidrógeno para descarbonizar la matriz energética. Entes como la EIA reconocen que si bien para 2030 podría duplicarse o triplicarse la producción de hidrógeno bajo en (azul) o cero (verde) emisiones, estaría lejos la posibilidad de aportar a la descarbonización y su mayor desarrollo se daría alrededor de 2050 (IEA, 2019).

Aun así, otro estudio hecho por DNV, empresa consultora, reconoce que para 2030, el hidrógeno podría aportar solo el 0,5 % de la energía que se consume en el mundo y alcanzar el 5% para 2050, siendo 2/3 partes menos de lo que se necesita para lograr las metas de carbono neutralidad en los compromisos de largo plazo. Aunque el 5 % parece no ser significativo, sí representa, aproximadamente, 200 millones de toneladas de hidrógeno: 1/5 de ellos se tendrían en la producción de amoniaco y otro quinto, en producción de metanol y combustible de aviación. El resto sería hidrógeno puro (DNV, 2022).

Ahora: se ha reconocido que el sueño del hidrógeno no sería completamente verde, ni tampoco barato. Si bien el mismo estudio estima que el 72 % del hidrógeno y sus derivados utilizados como vectores energéticos se basarán en la

electricidad para 2050, el 28 % del hidrógeno producido sería azul con CCUS; se tendría la posibilidad de llegar a un mayor porcentaje, de volverse barato el gas natural en algunos países, por medio de nuevos yacimientos o de la implementación de técnicas como el *fracking* en la explotación de yacimientos no convencionales (DNV, 2022).

De otro lado, el gasto mundial de producción de hidrógeno para fines energéticos alcanzaría, desde ahora hasta 2050, los 6,8 trillones de dólares, con un gasto adicional de 180.000 billones de dólares en gasoductos de hidrógeno y 530.000 billones en la construcción y operación de terminales de amoníaco. Este valor surge de una inversión anual en hidrógeno y sus derivados estimada, para 2030, de 129 billones de dólares y para 2050, 440 billones anuales, por su creciente entrada en la segunda mitad de este siglo (DNV, 2022).

Por supuesto, las estimaciones varían. En el caso del Hydrogen Council, un conglomerado de compañías del sector ha pronosticado que para 2050, el hidrógeno suplirá más del 20 % de la demanda de energía global (BBVA, 2021), mientras que International Renewable Energy Agency (Irena) estima el 12 %, junto con sus dilemas e incertidumbres del caso (Irena, 2022).

3.3. Solución al trilema de la transición energética

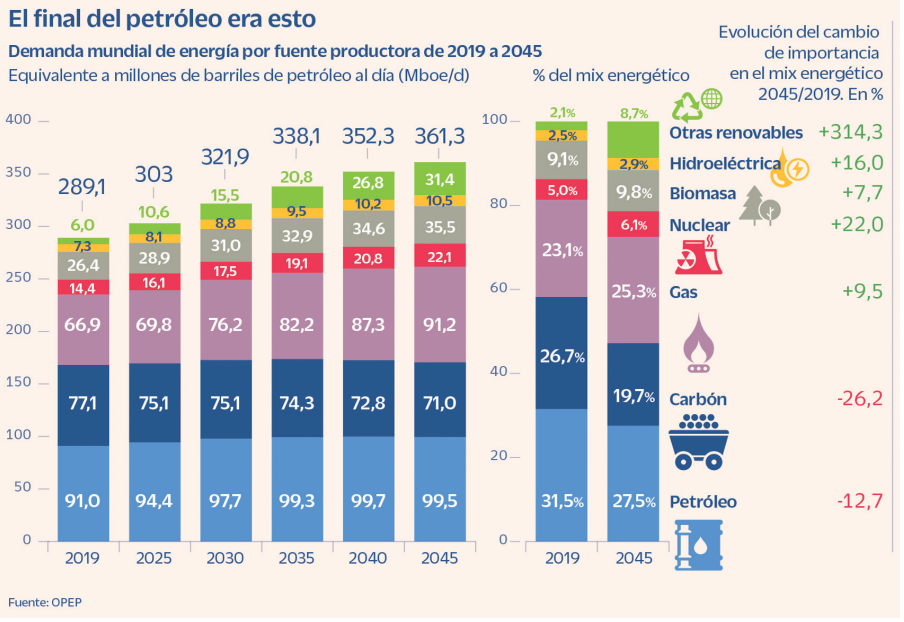
La forma como nuestras sociedades se relacionan con la energía y los fines que se han planteado para los próximos años ha gestado el trilema de la transición energética. Ante el intenso consumo energético, su inequitativa distribución y su aporte en el calentamiento de la atmósfera, el trilema consiste en cuestionarse lo siguiente: ¿cómo lograr en los próximos años seguridad energética para el crecimiento económico, al tiempo con la equidad energética para la estabilidad social y con garantizar sostenibilidad ambiental de manera transversal para el mundo? (World Energy Council, 2020).

Estos tres dilemas simultáneos responden al fin de sostener el sistema para no profundizar las crisis que ha generado. Sin embargo, al abordarlos, se ha reconocido que no es posible, al menos en las próximas décadas, deconstruir el consumo energético que hemos multiplicado desde la revolución industrial y apostar por una transición que nos permita seguir creciendo.

Así lo formulan y sostienen organizaciones como la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), que establece un incremento de consumo de energía de un 20%, una evolución de cambio de importancia de energías renovables de más de 314,3%, un crecimiento de consumo de gas y una leve reducción, pero también un sostenido consumo de carbón y petróleo, para 2045 (Belinchón, 2021). A pesar de que las declaraciones

de entes como el IPCC recomiendan haber reducido a mediados de siglo el consumo global de carbón en un 95 %, el petróleo, en un 60% y el gas, en un 45%, para evitar que la temperatura del planeta no sobrepase los 1,5°C, las expresiones mencionadas señalan que el ocaso de los combustibles fósiles no estaría, para nada, cerca (IPCC, 2022) (véase imagen 2).

Imagen 2. El final del petróleo era esto



Fuente: Belinchón, 2021

Así es que el hidrógeno desempeña un papel preponderante en estos dilemas y en la resistencia de los productores de combustibles fósiles a transitar a fuentes de energías limpias y renovables. De apostar por el hidrógeno azul, la transición energética podría perder sentido. Por sus mayores capacidades habilitantes con respecto al hidrógeno verde, eso le permitiría sostenerse en el futuro sin un efectivo aporte a la reducción de emisiones y, ni siquiera, en la distribución equitativa de la energía, pues se recurriría a la infraestructura y a sistemas interconectados existentes (Groizard, Howarth, & Jacobson, 2022). Por su parte, el hidrógeno verde solo sería compatible con la transición si su despliegue y avance alcanzara eficiencias energéticas superiores al hidrógeno azul, lo que no parece estar cerca, dada la falta de confiabilidad en las mismas fuentes renovables.

Ahora bien, con las últimas noticias de algunos países de considerar el gas como combustible de transición (Encabo, Carrión, & Ordóñez, 2022), el hidrógeno azul sería, finalmente, uno más de la diversifica oferta de la industria de combustibles fósiles. Tal situación repercutiría gravemente en el trilema planteado y generaría, en cambio, retrocesos mayores en el camino de garantizar un clima seguro para las futuras generaciones.

Asimismo, varios estudios apuntan a que la electrificación sería la solución que podría darle sentido y compatibilidad a otras fuentes y vectores energéticos, en especial, los renovables, al ser un vector con altas eficiencias en costos y distribución (Endesa, 2022). Sin embargo, su disponibilidad inmediata, su compleja capacidad para almacenarse (baterías pesadas y minerales nobles y extraños para guardarla) y su inconsistencia de suministro en el caso de las fuentes renovables, hacen que sea cada más difícil electrificar las actividades que hoy dependen exclusivamente de los combustibles fósiles.

El hidrógeno, en sus múltiples colores, podría ser un mecanismo para avanzar en la electrificación, pero sería solo beneficioso si dependiera del hidrógeno verde. No obstante, el hidrógeno, al ser vector energético, lleva implícito un factor de conversión bajo entre la energía primaria utilizada y la energía útil, lo que representaría un proceso poco eficiente, aunque su capacidad energética sea muy alta (Fundación Renovables, 2021). Por lo tanto, incluso si se masificará la generación de energía primaria a partir de fuentes renovables y el hidrógeno verde se desplegará para almacenar, transportar y consumir esa energía, la eficiencia podría demandar una energía primaria mayor de la que se esperaría en el marco de la descarbonización de la matriz energética. Esto lleva a que su uso, su escala y la progresión de su capacidad de suministro requiera profundos debates sobre cómo se entienden la transición energética y los fines futuros de la energía para los próximos años.

4. Incertidumbres técnicas y de impactos del hidrógeno

El uso del hidrógeno plantea varias incertidumbres que hacen de la transición un experimento riesgoso para los próximos años. De igual manera, como todo aprovechamiento de energía, provoca impactos que son sujetos de revisión, en especial, por su incorporación en los discursos de la transición energética.

A continuación, se describen las incertidumbres técnicas y de impactos más destacadas: en el clima, en el agua y tierra, en las tecnologías de captura,

almacenamiento y uso de carbono (CCUS), en la eficiencia energética, en el costo del hidrógeno y en la seguridad.

4.1. Clima

Cada vez son más las empresas extractivas que buscan espacio en el hidrógeno para hacer más responsable su actividad. Sin embargo, reciente evidencia científica ha demostrado que, de hacerse mal, podría ser peor el hidrógeno para el clima a corto plazo, que los combustibles fósiles que reemplazaría. Esta afirmación es de los científicos Steven Hamburg e Ilissa Ocko, del Fondo de Defensa Ambiental de Estados Unidos. Ellos descubrieron que el hidrógeno en sí mismo, cuando se emite a la atmósfera, contribuye al cambio climático al aumentar la cantidad de otros GEI como el metano, el ozono y el vapor de agua, lo que provoca un calentamiento indirecto (Hamburg & Ocko, 2022a).

Por ser tan pequeña, la partícula del hidrógeno, es difícil contenerla, lo que hace que se filtre de manera sencilla en la atmósfera a lo largo de la cadena de valor. Esto significa que, mientras más prolongado sea el viaje entre la producción y el uso final, mayor será también el potencial de fuga (Hamburg & Ocko, 2022b).

Esa realidad ha estado oculta porque el cambio climático se estudia en periodos de 100 años, de manera que se ignora sistemáticamente el impacto a corto plazo del hidrógeno y de otros agentes de forzamiento del cambio climático de corta duración. Además, las estimaciones de forzamiento climático del hidrógeno se consideraban solo en la troposfera, sin observar sus efectos en la estratosfera. Esto revelaría que la contabilidad de ambas situaciones tendría un mayor potencial de calentamiento de parte del hidrógeno de lo que normalmente se reconoce (Hamburg & Ocko, 2022a).

Hamburg y Ocko encontraron en sus estudios que, de aplicar los efectos atmosféricos combinados en un periodo de tiempo más corto, el poder de calentamiento de cinco años de un pulso de hidrógeno en relación con el CO_2 es 20 veces mayor que lo que muestran los cálculos actuales, que utilizan el enfoque estándar de 100 años (Hamburg & Ocko, 2022a).

Asimismo, observaron que en el impacto del calentamiento relativo de las emisiones continuas, en lugar de las pulsadas, más representativas del mundo real, el hidrógeno es 100 veces más potente que las emisiones de CO_2 durante un periodo de diez años (Hamburg & Ocko, 2022b).

Reconocen también la importancia de prestar atención a las tasas de fuga, ya que evidenciaron que, en situaciones de altas fugas las emisiones de hidrógeno, se podría producir casi el doble de calentamiento en los primeros cinco

años, después de reemplazar a los combustibles fósiles. No obstante, si las tasas de fuga son mínimas (situación que requiere un nivel alto de tecnología), el hidrógeno en sí, sin considerar la fuente de la que se obtuvo, podría producir una disminución del 80 % en el calentamiento durante ese mismo periodo de tiempo (Hamburg & Ocko, 2022a).

Los autores son claros en precisar que estos efectos son válidos para el hidrógeno, el cual, incluso con fugas moderadas, podría aumentar el calentamiento a corto plazo. Asimismo, reconocen que el hidrógeno azul tendría efectos peores debido al calentamiento adicional de las emisiones de metano generadas a lo largo de la cadena de suministro de gas natural (Hamburg & Ocko, 2022a).

De su estudio, resalta la siguiente afirmación:

> *Esto significa que en escenarios intensivos en hidrógeno (50 % o más de la demanda de energía final suministrada por hidrógeno) con altas tasas de fuga, incluso el hidrógeno verde podría contribuir con una décima de grado Celsius de calentamiento en 2050 (Hamburg & Ocko, 2022a).*

Es decir, durante 100 años, el hidrógeno tendría 200 veces más potencia de calentar la atmósfera como GEI que el CO_2 a corto plazo en el momento de su liberación, lo que socavaría los beneficios climáticos de las apuestas de descarbonización.

4.2. Agua y tierra

Julio Verne expresó un sueño en su libro *La isla Misteriosa*, publicado en 1874:

> *Algún día se empleará el agua como combustible, (…) el hidrógeno y el oxígeno de lo que está formada, usados por separados o en forma conjunta, proporcionarán una fuente inagotable de luz y calor, de una intensidad de la que el carbón no es capaz* (Verne, 1875).

Pues, ese sueño no reconocía el impacto y los dilemas que se tendrían con la disponibilidad de este recurso.

En un estudio de 2007, Michael Webber, director asociado del Centro de Política Energética y Ambiental Internacional de la Universidad de Texas, en Austin, definió que para producir un 1 kilogramo de gas hidrógeno se requieren 2,4 galones de agua como materia prima. Así, si en un año se alcanzan a producir 60 millones de kilogramos de hidrógeno por medio de la electrolisis en

el marco del hidrógeno verde, se requerirían aproximadamente 143 billones de galones de agua destilada. La mayor parte del aumento de consumo de agua se atribuirían a los usos indirectos que se apliquen tanto en destilar el agua, como en los procesos de transporte y almacenamiento del hidrógeno (Webber, 2007).

Esta situación contrasta con el estrés hídrico, en niveles altos y extremos, que viven actualmente 2.600 millones de personas en el mundo, cuando la apuesta ideal es el hidrógeno verde. De igual manera, se reflexiona sobre el efecto que tendría desplegar una industria como la del hidrógeno, cuando su mayor punto de desarrollo habría pasado el punto de no retorno de la crisis climática para 2050, donde se ha calculado que se elevaría esta cifra a 5.400 millones de personas o más, con niveles altos y extremos de estrés hídrico (Statista, 2022).

Líderes del mercado mencionan que el agua no sería problema, pues provendría de la desalinización del agua de mar, cuya abundancia encajaría perfecto para la demanda que se espera en los próximos años. No obstante, las plantas de desalinización o desalación tienen grandes impactos ambientales, en especial por su alta demanda energética y por la disposición de la salmuera y de otros residuos al océano (Fibras y Normas de Colombia, 2019). Sobre este punto, un estudio de la Universidad de las Naciones Unidas encontró en 2019 que las aguas residuales de las plantas de desalinización son vertidas a los océanos nuevamente con altos niveles de sal y agentes químicos tóxicos, que alcanzan niveles del 5 % con toxinas como cloro y cobre. Esta realidad se traduce en diversos impactos como reducir los niveles de oxígeno en el agua de mar, alterar los procesos productivos de las especies marinas, aumentar el pH y la temperatura del océano y afectar a comunidades que subsisten de la pesca artesanal (Jano, 2022).

Por otro lado, la romantización del hidrógeno podría estar en riesgo al descubrirse sus efectos en el uso y el cambio de suelo. Algunos gremios explican que una ventaja de producir hidrógeno azul es su aprovechamiento de la infraestructura existente y del hidrógeno verde, la reducción de espacio a cambio de grandes baterías que almacenen directamente la energía producida por fuentes renovables. Sin embargo, esta discusión se queda corta cuando se reflexiona acerca del suelo que se utilizaría para producir la energía renovable soñada, como la solar y la eólica, y se abren preguntas como: ¿energías renovables o agricultura?

En España, por ejemplo, se ha reconocido que para producir un megavatio de energía fotovoltaica se requieren 2 ó 3 hectáreas, como mínimo, cantidad que se multiplicaría en proyectos que llegarían a producir 100 ó 200 megavatio de energía (Yoldi, 2022). Sumado a esto, dado que son escasos los minerales para la tecnología que requieren las energías renovables, como el vector energético del hidrógeno, eso implicaría hacer competir a los ecosistemas y medios

agrarios con incursiones mineras, lo que potenciaría, eventualmente, conflictos existentes. Entre esos minerales de la transición están el cobre, el litio, el níquel, el manganeso, el cobalto, el grafito, el cobre, el zinc, las tierras raras, entre otros (Cuéllar & Fischer, 2022)

Finalmente, se entraría a reflexionar sobre la escala de producción del hidrógeno y acerca de su ubicación. Varias ciudades de Corea del Sur y de Alemania están usando sus techos para instalar paneles solares; sin embargo, la producción de hidrógeno se plantea en grandes cantidades, lo que imposibilitaría la instalación de pequeñas plantas por su alto costo y sus bajos niveles de seguridad y de eficiencia en los centros urbanos, los mayores consumidores de energía.

4.3. Tecnología de captura, almacenamiento y uso del carbono (CCUS)

Por si fuera poco el efecto mismo del hidrógeno en la atmósfera, podría ser peor la situación con el hidrógeno azul, si se considera la evidencia reconocida de las tecnologías CCUS. A pesar de que la AIE ha estimado que será el hidrógeno azul el más desarrollado a corto y a mediano plazo por sus bajos costos de producción con respeto a otras tecnologías bajas en emisiones, como la electrolisis del agua, aun así, se ha visto que es imposible eliminar con estas tecnologías el 100 % de las emisiones de CO_2 generadas en el proceso: las mejores tecnologías disponibles (aún por demostrar a escala) se limitan a reducir emisiones en hasta el 97-98 %, en los mejores casos (IEA, 2021).

Otras investigaciones revelan que las CCUS han logrado, apenas, capturar el 33% del CO_2 que se genera en la actualidad por medio del hidrógeno azul (Fundación Renovables, 2021).

Sumado a lo anterior, la producción de hidrógeno no significaría una reducción de CO_2. A cambio, las emisiones de CO_2 ligadas al hidrógeno azul constituyen tan solo entre un 9-12% menos que las que produce el hidrógeno gris (Groizard, Howarth, & Jacobson, 2022). De otro lado, este vector energético de origen fósil tampoco implica el cese de explotación de gas: si bien las CCUS podrían capturar las emisiones de CO_2 de manera rápida, aun así, en la extracción y en el transporte de gas natural seguirían existiendo emisiones previstas de metano. Es pertinente recordar que este GEI es el principal componente del gas natural y, cuando entra a la atmósfera, es 28 veces más perjudicial para el clima en periodos de 100 años y 84 veces más potente en el calentamiento en 20 años que el mismo CO_2 (Groll, 2021).

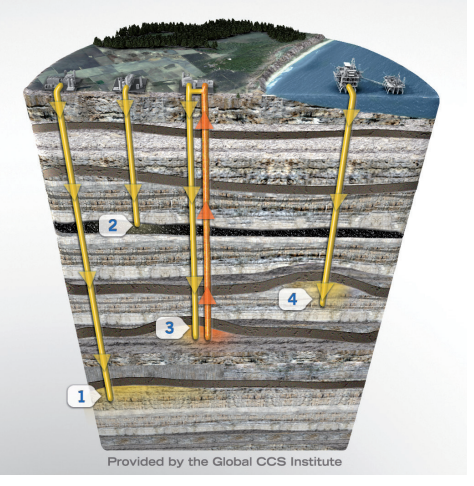
El *lobby* del gas se ha apoyado en las tecnologías CCUS para re-etiquetar su responsabilidad incluyendo los adjetivos "limpio" y "bajo en carbono" en sus actividades. Sin embargo, vale la pena reflexionar antes de aplicar estas tecnologías; pensar en los riesgos existentes en la industria extractiva, en especial, en yacimientos no convencionales donde se practicaría una extracción a la inversa. Tanto en la explotación, como en el cierre de yacimientos, se presentan barreras tecnológicas que no garantizan estándares de seguridad, como fallas en las paredes de recubrimiento para evitar la filtración de los hidrocarburos en explotación o cierre, o el colapso de los pozos con potencialidad de contaminar acuíferos (Olade, 2015). Estas barreras podrían ser potenciales generadoras de pasivos, incluso, a perpetuidad, como se ha observado con el cierre de yacimientos de carbón (Ángel, 2019).

Asimismo, la aplicación de CCUS depende, en gran parte, de la calidad de su construcción. Sobre esta, no hay suficiente evidencia científica en relación con los riesgos asociados que podría presentar la reinyección/fuga de CO_2 en formaciones geológicas terrestres u oceánicas. De por sí, el exceso de CO_2 en los océanos incentiva la acidificación de las aguas y altera los ciclos naturales de la fauna marina (Viñas, 2019), de las que dependen más de 3.000 millones de personas, actualmente (UN, 2015). En esta forma, es necesario incluir el principio de precaución en esta discusión, al considerar la ausencia de certeza científica sobre los impactos de estas tecnologías en diversos ecosistemas (véase imagen 3).

Imagen 3. Descripción general de opciones de sitios para inyección de emisiones de CO_2 capturadas posterior de producción de hidrógeno azul.

Descripción general del almacenamiento (opciones del sitio)

1. Formaciones salinas
2. Inyección en vetas de carbón profundas no explotables o recuperación mejorada de metano en lecho de carbón (ECBM)
3. Uso de CO_2 en la recuperación mejorada de petróleo
4. Yacimientos de petróleo y gas agotados



Fuente: Global CCS Institute, 2022

A pesar de las dudas técnicas, el Grupo de trabajo III del IPCC, en su reporte "Mitigación del cambio climático", publicado el 4 de abril de 2022, reconoce, en todos sus escenarios de tendencia de incremento de la temperatura global, el desarrollo de CCUS con niveles de eficiencia de 90-95%. Destaca estas tecnologías como una de las opciones más cercanas, rápidas y urgentes para descarbonizar la energía y su futura demanda.

De otro lado, el mismo panel destaca que, de no implementarse estas tecnologías a la escala que se requiere, tendrían que retirarse plantas de energía a partir de carbón 23 años antes de su tiempo de funcionamiento para cumplir la meta de 1,5°C. Por otra parte, los activos de las industrias de gas y petróleo tendrían que retirarse 17 años antes de su vida útil, lo que significa de las CCUS mayor tiempo de maniobra y provecho de los combustibles fósiles para la transición que deberían hacer estas industrias (Global CCS Institute, 2022).

4.4. Eficiencia energética

Se ha dicho que el mejor combustible es el más eficiente (Pollos & Armiño, 2021). No obstante, es aún difícil afirmarlo en relación con el hidrógeno. Si bien calcular la eficiencia del hidrógeno depende de los métodos y fuentes de energía que se empleen, para algunas de estas se ha reconocido una eficiencia máxima del hidrógeno azul entre 74-85% y del hidrógeno verde, entre 50 y 70% (Fundación Renovables, 2021).

Lo anterior se suma a investigaciones que sugieren que el despliegue de hidrógeno verde puede requerir de 2 a 14 veces más energía que las alternativas disponibles que usan electrificación directa (Environmental Defense Fund, 2022). El simple desvío de energía para poder separar las partículas del agua implica un alto costo energético; eso, junto con el reconocimiento de impactos a la salud de las comunidades por las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) en la combustión del hidrógeno y el impacto en la disponibilidad del recurso hídrico (Hamburg & Ocko, 2022a).

Otros estudios reconocen que es muy ajustada la cadena de rendimiento de generación y procesamiento del hidrógeno, al considerar tasas de retorno energético de todo el sistema muy reducidas e, incluso, menores que 1 (energía neta entregada negativa) (GEEDS-UVa, 2021). Esta situación implica que se invierte más energía en la creación de la infraestructura, que la que se va a recuperar en toda su vida útil, lo que es un gasto energético.

De otro lado, se ha observado que, en el marco de la confiabilidad del suministro de energía renovable, aun las baterías de litio son más eficientes que los sistemas de almacenamiento de hidrógeno (celdas de combustibles de hidrógeno

regenerativo), debido a su mayor eficacia de ida y vuelta. Esto se refiere a que estas baterías de litio tienen mayor eficiencia en la energía que se necesita para cargarlas y en la energía que está disponible durante la descarga (Pellow, Emott & Barnhart, s.f.).

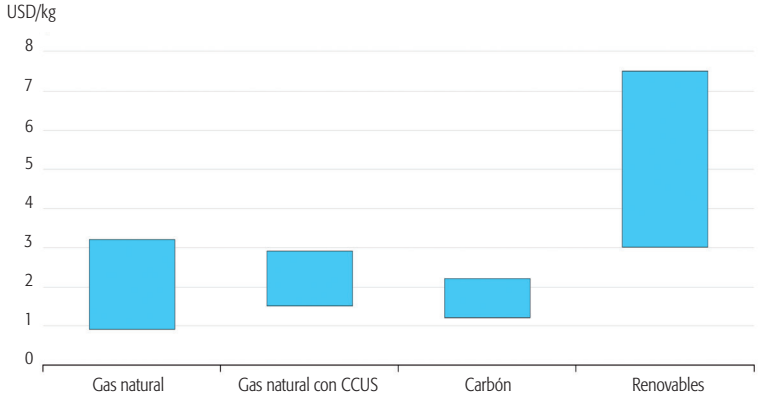
Así, los gobiernos deben asegurar que, antes de destinar inversiones públicas a proyectos de hidrógeno verde, de resultados positivos la tasa de retorno energético de todo el proceso de generación eléctrica más la generación y procesamiento del hidrógeno. Aun si esto sucede, se alcanzan a pronunciar empresas y gobierno sobre subestimar su costo energético por la esperanza que despierta este vector energético (Jacobo, 2020) y por la promesa de llegar a escenarios de "cero emisiones netas".

4.5. Costo del hidrógeno

El costo de "la energía del futuro" depende en gran parte de las inversiones que se hagan hoy. Solo en 2021, se invirtieron 12 mil millones de dólares en el mundo en hidrógeno como portador de energía y se espera que sean China, Medio Oriente y África del Norte y Europa grandes inversores desde aquí hasta 2050 (DNV, 2022).

No obstante, estas inversiones no son limpias del todo. En la actualidad, es más barato producir el hidrógeno que proviene de combustibles fósiles, que el hidrógeno de bajas emisiones en carbono. En 2018, la AIE estimó que, si bien depende de los precios del gas, el costo nivelado de la producción de hidrógeno a partir de gas natural oscila entre 0,5 y 1,7 dólares por kilogramo; el hidrógeno con tecnologías CCUS, entre 1 y 2 dólares por kilogramo y el hidrógeno a partir de electricidad renovable, entre 3 y 8 dólares por kilogramo (véase imagen 4) (IEA, 2019).

Imagen 4. Costos de producción de hidrógeno por fuente de producción, 2018.



Fuente: IEA, 2019

A pesar de que en escenarios de emisiones netas cero (NZE, por sus siglas en inglés) el hidrógeno verde podría bajar en 1,3 dólares por kilogramo para 2030, esto dependería de la innovación tecnológica y de una mayor implementación y potencial de generación de energía renovable de los países. Así, podrían compararse los precios con los del hidrógeno azul y sus tecnologías CCUS. Asimismo, en los escenarios más optimistas a largo plazo, el hidrógeno verde alcanzaría precios entre 1 y 3 dólares por kilogramo, lo que haría que sea, con el hidrógeno azul, la energía fotovoltaica competitiva en varias regiones.

4.6. Seguridad

Por sus mismas características, el hidrógeno es altamente inflamable. No es por poco que en muchas ocasiones se relacione el hidrógeno con el fatal suceso ocurrido en 1937 cuando se incendió el Zeppelin Hindenburg. En esa tragedia, murieron 35 personas y con ella se creó el "síndrome Hindenburg", que se refiere a una actitud escéptica hacia el hidrógeno como portador de energía (Groll, 2021).

Cuando entra en contacto con el oxígeno y se enciende, el hidrógeno puede generar un grave riesgo de incendio. A diferencia de la gasolina, por ser el elemento más ligero sobre la Tierra, tiene probabilidad de dispersarse fácilmente y arder más fácilmente que la gasolina. Es tal el punto, que la chispa de electricidad estática del dedo de una persona es suficiente para provocar una explosión cuando hay hidrógeno disperso en el espacio (0,0019 MJ). Adicionalmente, la llama del hidrógeno es invisible ante nuestros sentidos, por lo que es difícil de detectar fugas (Linde, 2021).

Por otro lado, el hidrógeno es inodoro, incoloro e insípido, pero no tóxico. Sin embargo, en caso de acumularse en un ambiente interior, puede causar asfixia al desplazar al oxígeno. Para evitar estas situaciones, el hidrógeno debe estar a temperaturas muy bajas, lo que demanda, además, energía para reducir su riesgo de inflamación (Crowcon, 2021).

Las propiedades descritas del hidrógeno exigen que haya instalaciones altamente especializadas que garanticen que no habrá exposición a sus riesgos asociados. También, son una barrera para su despliegue, pues, en su transporte podrían presentarse eventos no deseados que afecten a las personas, el ambiente, las instalaciones y los activos industriales (Mapfre, 2021).

Segundo capítulo.
Tendencias internacionales y fines geopolíticos del hidrógeno

1. Papel y lugar de estas tecnologías en los discursos y políticas globales y nacionales de transición energética

1.1. El sueño del hidrógeno

El hidrógeno está generando una reconfiguración geopolítica sin precedentes alrededor de la energía. Instituciones como la Agencia Internacional de las Energías Renovables (Irena, por sus siglas en inglés) lo consideran como "la pieza faltante del rompecabezas" (Irena, 2022) No es para menos, en un momento en el que las guerras, las pandemias y las crisis económicas empujan a buscar alternativas para resolver el trilema de la energía. Varios gobiernos reconocen, de este vector energético, sus calidades para enfrentar la crisis climática. Las posibilidades que ofrecen el hidrógeno azul y el verde llaman a que se produzca y se sostenga la demanda energía de manera limpia, segura y asequible.

No obstante, detrás del hidrógeno, se tejen diversos discursos con el fin de sostener la demanda energética, siempre vinculada al crecimiento y al desarrollo de los países. De esta manera, en varias introducciones a documentos referidas a las bondades y ventajas del hidrógeno se mencionan de últimas conceptos como "seguridad energética", cuando la visión holística del hidrógeno demuestra que es el fin último de esta transición.

La versatilidad del hidrógeno permite ponerlo entre sustituto y canal para la transición energética. Mientras, aún, hay mucha incertidumbre sobre cómo garantizar energía 24/7 con energías primarias que están en rangos cortos del día como es la solar y la eólica, el hidrógeno se postula para llevar a cabo la tarea

y, sobre todo, impulsar las actividades que jamás habríamos desarrollado sin el potencial energético que nos ofrecen los combustibles fósiles, cuya demanda energética es lo que hoy nos tiene en múltiples crisis.

El hidrógeno es un sueño para muchos gobiernos en estos momentos por varias razones: para obtenerlo, se pueden aprovechar las tuberías existentes, existe la posibilidad de pintar de verde los combustibles fósiles con tecnologías de CCUS, con él, se puede reducir la generación de emisiones de manera expresa y, también, potenciar otras aplicaciones como en la producción de fertilizantes en clave de seguridad alimentaria.

De otro lado, a pesar de los falsos comienzos del hidrógeno en el pasado, esta vez se plantea la posibilidad de permitir el mayor despliegue de energías renovables para producirlo. Este despliegue es, quizás, el mayor punto de inflexión con respecto a cómo los países se han organizado para sostener su seguridad energética, ya que el hidrógeno priorizaría a los países con mayor potencial de energías renovables (en su mayoría, los que están en el trópico) y promete regionalizar la distribución de la energía entre continentes, por las cualidades mismas del hidrógeno en su transporte y almacenamiento (Irena, 2022).

Asimismo, se promete incorporar nuevos y diversos participantes al mercado, diversificando las rutas y los suministros. Así, se lograría pasar el poder de la energía de las manos de unos pocos, a las de la mayoría. Por esto, muchos de los avances normativos se están impulsado mediante la cooperación internacional, en especial, de parte de 30 países que están ya planificando su comercio activo, con argumentos de promover enfoques más democráticos e inclusivos para países en desarrollo. Irena, por ejemplo, calcula que más del 30% del hidrógeno producido será objeto de comercio transfronterizo para 2050, porcentaje que supera al del gas natural en la actualidad (Irena, 2022).

Aun así, en la actualidad los hidrógenos más baratos y que más se producen son el hidrógeno gris y el azul, usados principalmente en aplicaciones industriales y de refinerías. Este presente, junto con las proyecciones menos optimistas y diferentes, proponen crear el espacio seguro que necesitan las empresas extractivas para mantener su poder energético, pues empiezan a ser sujetos de diversificación de portafolio de servicios bajo la misma base fósil y no de transición, como se espera que sea.

El riesgo latente de tal situación es no poder reconocer dónde termina la explotación de combustibles fósiles y donde inicia la producción de hidrógeno, al promover que los beneficios, incentivos y factores habilitantes apliquen a toda la cadena de valor de estos sistemas energéticos. No es coincidencia que estén involucrados los países con mayor producción de petróleo: Australia, Omán, Arabia Saudita, Estados Unidos y Emiratos Árabes Unidos (Irena, 2022).

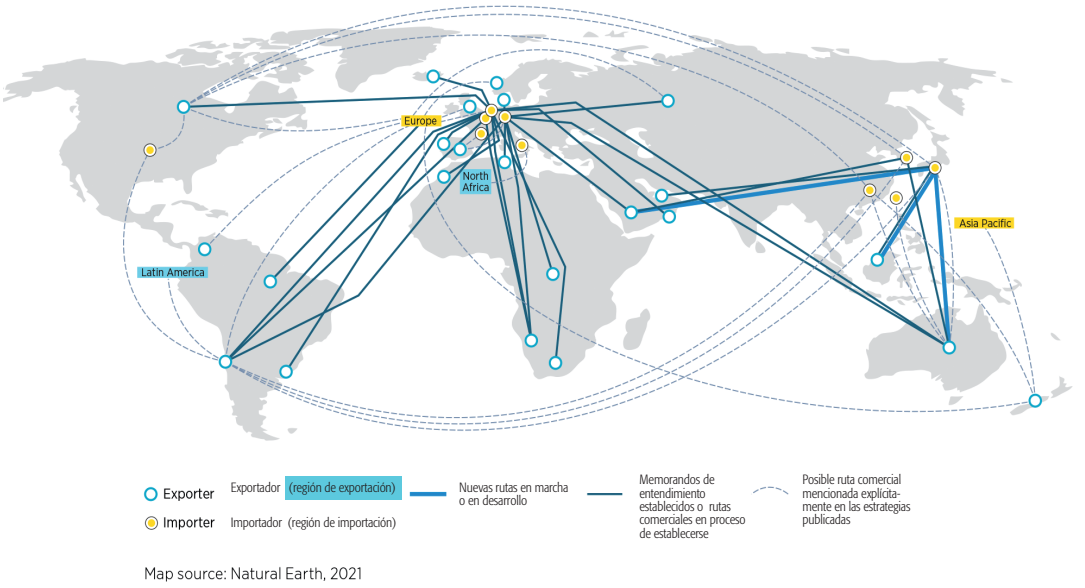
Es así como el hidrógeno implica, también, una carrera tecnológica sin precedentes. Según bases de la AIE, en 2021 se recopilaron 1.327 proyectos de hidrógeno que, en su mayoría, funcionan a partir de tecnologías convencionales, con posibles bajas eficiencias (IEA, 2021). De esta manera, la fabricación de celdas de hidrógeno, electrolizadores y demás tecnologías han puesto en la mira a China, Japón y Europa como potenciales surtidores de tecnología para garantizar la transición verde que se necesita. Sin embargo, entes cómo Irena llaman a salvaguardar y generar estabilidad en los materiales e insumos que se necesitan para estas tecnologías que eventualmente conservarían los patrones de extracción entre el globo sur y el globo norte. No es por poco su preocupación, pues se estima un mercado entre 50-60 billones de dólares de electrolizadores y 21-25 billones de dólares de celdas de energía para mitad del siglo (Irena, 2022).

Aun para el hidrógeno, existe mucha incertidumbre sobre estándares y reglas del mercado, lo que deja que el mercado se forme por sí solo de acuerdo con los movimientos que haga cada país. De igual forma, todavía no son específicas las barreras normativas, de licenciamiento, de manejo de impactos ambientales, entre otros aspectos, por la masificación que se espera para producir estas tecnologías, lo que abre una puerta a diversos riesgos en los territorios productores con potencial de hidrógeno.

En la actualidad, se producen aproximadamente 120 millones de toneladas de hidrógeno en el mundo: 2/3 partes corresponden a hidrógeno puro y 1/3, a gases mezclados. El mercado lo encabezan las naciones más industrializadas: China (23,9 Mt anuales), Estados Unidos (11,3 Mt), India (7,2 Mt), Rusia (6,4 Mt) y Unión Europea + Reino Unido (5,8 Mt). Este hecho ha marcado el inicio de un cambio geopolítico interesante. Con las rutas en lugar y en desarrollo y los memorandos de entendimientos establecidos para la importancia y exportación de hidrógeno a la fecha, el globo sur sería el principal exportador del hidrógeno (véase imagen 5) (DNV, 2022).

Esta situación se ha promovido claramente como respuesta a la guerra entre Ucrania y Rusia, cuya relación con Europa ha puesto en jaque su seguridad energética. No sorprende que el gas del que dependen países europeos como Alemania se esté pensando en cambiar por hidrógeno. Por esto, recientemente, la Comisión Europea aprobó la "Estrategia sobre el hidrógeno", que busca que se haga una inversión de hasta medio billón de euros para potenciar el hidrógeno, en particular, entre 3.000 y 18.000 millones en hidrógeno azul a partir de gas, para consolidar la madurez de las tecnologías verdes (European Commission, 2020).

Imagen 5. Red en expansión de rutas comerciales, planes y acuerdos de hidrógeno.



Fuente: Irena, 2022.

1.2. Las necesidades en política pública

Las principales barreras para fomentar el sueño del hidrógeno en la actualidad son los costos, la poca madurez tecnológica, la ineficiencia, la insuficiente capacidad eléctrica renovable, la incertidumbre regulatoria y política, la falta de estándares y certificaciones y el dilema de producir sin demanda. Esto ha hecho que el hidrógeno sea gris, en su mayoría, y, así, el auge de los otros tipos de hidrógenos se proyecte para después de 2030.

Para enfrentar estas barreras en esta década, la AIE ha propuesto lo siguiente (IEA, 2019):

- Promover la demanda comercial de hidrógeno limpio mediante la creación de instrumentos taxonómicos o el establecimiento de impuestos al carbono, para empujar la descarbonización y financiar la transición al hidrógeno.
- Abordar los riesgos de inversión con incentivos como préstamos, garantías y otras herramientas, para promover al sector privado hacia esta apuesta.

- Apoyar la Investigación y el Desarrollo, para bajar los costos y mejorar los rendimientos.
- Eliminar barreras regulatorias innecesarias y armonizar estándares, para garantizar la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad del hidrógeno.
- Promover la cooperación internacional para el intercambio de buenas prácticas y la construcción de infraestructuras transfronterizas.
- Aprovechar la infraestructura existente para fomentar el desarrollo del hidrógeno, en especial, la infraestructura de gas, que tiene mayor compatibilidad con el transporte de hidrógeno.
- Garantizar la incorporación del hidrógeno en políticas y estrategias a largo plazo en asuntos de desarrollo, cambio climático, transición energética e inversiones, entre otras políticas públicas.

1.3. Hojas de rutas y factores habilitantes del desarrollo del hidrógeno

En estos últimos años, los gobiernos reconocen la necesidad de superar barreras que tienen bloqueado el despliegue masivo del hidrógeno en cualquiera de sus colores. Superarlas creando factores habilitantes en política pública, mediante la creación de Hojas de Rutas que permitan establecer estudios de potencialidad de generación, metas de producción, designación de instrumentos económicos para su fomento y de presupuesto y aliados de cooperación para vincularse en la potencial globalización del comercio del hidrógeno. De esta manera, en la actualidad, son los países de la Unión Europea que conforman el OCDE Pacífico y Estados Unidos los que han liderado esta carrera, junto con otros que ya cuentan con hojas de ruta para el fomento del hidrógeno (véase imagen 6) (Irena, 2022)

Imagen 6. Países que cuentan con estrategias de política pública de hidrógeno o que están en preparación, octubre de 2022.

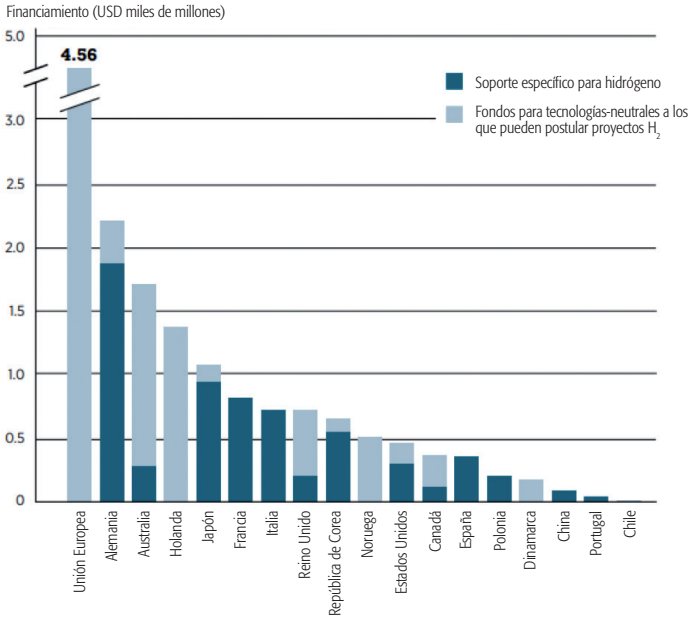


Fuente: Irena, 2022

Alemania, Australia, Japón, Francia, Italia, República de Corea, Estados Unidos, España, China y Portugal han establecido metas financieras para apoyar el despliegue del hidrógeno (véase imagen 7) (DNV, 2022). Otros países, mediante hojas de rutas y otros instrumentos, han permitido que fondos para tecnologías de transición energética puedan financiar proyectos de hidrógeno, como sucedió en 2021 con Colombia (Oswaldo, 2021).

A partir de lo anterior, en los dos últimos años, se han emprendido diversas giras internacionales de ministros y gremios con el fin de consolidar rutas de exportación e importación de hidrógeno. La perspectiva es no fallar en la transición a este vector energético, conquistando cada vez más a los países de globo sur, en especial, los que se ubican en el trópico. Estas giran ha sido lideradas, principalmente, por los gobiernos de Alemania y Corea del Sur, que han adelantado sus propuestas con Chile y Colombia.

Imagen 7. Financiación anual media por país o grupo de países, potencialmente disponible para proyectos de hidrógeno, 2021-2030.



Fuente: DNV, 2022

Por su parte, Nueva Zelanda reconoce en su hoja de ruta su potencial para importar hidrógeno. Ha estudiado criterios de selección, como la existencia del impuesto al carbono, la articulación con metas climáticas a largo plazo, la dotación existente, la distancia entre países y la demanda proyectada para 2030 (Contact, 2021).

2. Discurso empresarial y política climática internacional

2.1. ¿Quiénes promueven el hidrógeno en el mundo?

Si bien son los países los que generan los factores habilitantes de la promoción de hidrógeno, detrás de esta apuesta están empresas transnacionales que llevan el mercado en sus manos. El reconocimiento de estos factores en sus cadenas de valor y su utilidad para mejorar sus procesos internos han hecho que se despierte un interés en las empresas.

En diversos medios y redes y en alguna documentación se reconocen empresas como Shell, Siemens Energy, Angloamerican, BP (anteriormente llamado British Petroleum), BMW Group, Hyundai, Toyota, Chemours, Électricité de France, Kogas, Sasol, Iberdrola, Fertiberia, Enel, Antofagasta Mineral y otras. Muchas de ellas se alían entre sí en diferentes proyectos o conforman colectivos de empresas a nivel regional y mundial, como el Consejo del Hidrógeno (Hydrogen Council). Este último es una iniciativa mundial conducida por directores generales de 132 empresas líderes en energía, transporte, industria e inversión y se conformó en función de la economía del hidrógeno (Hydrogen Council, 2021). Las empresas que lideran estos proyectos tienen, además, inversiones en sectores como fertilizantes, combustibles fósiles, minería, automóviles, tecnología, electricidad, entre otros.

De otro lado, el sector financiero ha centrado sus ojos en el fomento del hidrógeno. Entre sus integrantes, se destacan en ello el Banco Mundial, el Banco Europeo de Inversiones y el Banco Asiático de Desarrollo (BAD). Asimismo, bancos acusados de financiar proyectos de combustibles fósiles a pesar del Acuerdo de París se han vinculado a plataformas, estudios y al desarrollo de eventos para establecer posibles flujos financieros orientados a proyectos de hidrógeno (Rainforest Action Network, 2021). Se encontraron menciones sobre las oportunidades del hidrógeno para inversiones en las páginas de bancos como MUFH Bank (Japón), RBC (Canadá), Barclays (Reino Unido), BNP Paribas (Francia), Bank of China (China), J.P. Morgan Chase, Bank of America Corp., Wells Fargo y Citigroup (Estados Unidos).

2.2. Pacto de Glasgow y otros compromisos en el contexto del Acuerdo de París

El Acuerdo de París es el marco internacional más reciente para enfrentar la crisis climática. Es mediante las Conferencias de las Partes que las naciones que han ratificado el Acuerdo deciden sobre los próximos pasos para mantener viva la meta de no superar la temperatura de 1,5°C. Sin embargo, después de cinco años, perdidos por disputas geopolíticas, y de dos años más, por la pandemia de covid-19, el Acuerdo de París aún no cumple su objetivo, en especial, cuando se habla de energía. Según el reporte de síntesis de la de Secretaría de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), aun con los compromisos hechos por todos los países y sus actualizaciones en 2020, el mundo se enfrentaría a un incremento de temperatura de 2,7°C a finales de siglo (UNFCCC, 2021).

Así, pues, luego de la Conferencia de las Partes (COP) 21, en la que se aprobó el Acuerdo de París, la COP 26 tenía la responsabilidad de que se aprobará el Libro de Reglas de Implementación, que lograra pasar el Acuerdo del discurso a la acción. No obstante, en la decisión llamada Pacto de Glasgow, surgido en la COP 26, se flexibilizó la ambición del Acuerdo con respecto a los combustibles fósiles y no se hizo el llamado que se esperaba de eliminar subsidios y dejar los combustibles fósiles bajo el suelo.

La decisión, en última medida, exhortó a las Partes a lo siguiente:

> *a que aceleren el desarrollo, el despliegue y la difusión de tecnologías y la adopción de políticas, para la transición hacia sistemas de energía de bajas emisiones, incluso aumentando rápidamente el despliegue de medidas de generación de energía limpia y eficiencia energética, incluida la aceleración de los esfuerzos hacia la reducción gradual de la energía de carbón ininterrumpida y la eliminación de los subsidios ineficientes a los combustibles fósiles, al mismo tiempo que se brinda apoyo específico a los más pobres y vulnerables de acuerdo con las circunstancias nacionales y se reconoce la necesidad de apoyo hacia una transición justa* (UNFCCC, 2021).

Esta exhortación fue poco vinculante para las necesidades de garantizar un clima seguro.

Una gran desilusión tuvieron los observadores, que vieron como los gremios de combustibles fósiles cooptaron la COP 26. El grupo de derechos humanos Global Witness, entre otras ONG, encontró que participaron 503 delegados y representantes de corporaciones relacionadas con los combustibles fósiles y que fue la delegación más grande. Superó a varios países como Brasil, que fue con 479 personas. Entre los 503 delegados, se reconocieron participaciones de más de 100 empresas de combustibles fósiles, que declararon abiertamente su afiliación a estas empresas, asistiendo a las charlas como parte de delegaciones de países (27 países los incluyeron de manera oficial) o con los grupos empresariales más poderosos del mundo (Gallego, 2021).

Es decir, lo plasmado en la decisión de la COP 26 y la participación de gremios de combustibles fósiles no fueron una coincidencia, en especial, por los compromisos que se plasmaron en la primera semana, que fue más un evento político de promesas que de negociaciones. Durante esa semana, se lanzaron iniciativas como La Alianza Financiera de Glasgow para el Cero Neto (GFANZ). Esta alianza, que reúne 108 bancos de 40 países y 450 firmas de miembros de todo el sector financiero, con activos por montos

superiores a 130 billones de dólares, tiene como fin apoyar la planificación de la transición neta cero en instituciones financieras, movilizar capital para que mercados emergentes y economías en desarrollo se descarbonicen e impulsar políticas públicas de cero neto que permitan una transición a estos escenarios (GFANZ, 2021).

Asimismo, se lanzó la iniciativa Alianza para ir Más Allá del Petróleo y el Gas Natural (BOGA, por sus siglas en inglés), conformada por Costa Rica, Dinamarca, Francia, Gales, Groenlandia, Irlanda, Quebec y Suecia como miembros núcleo; y California y Nueva Zelanda, como miembros asociados. BOGA pretende establecer una fecha de finalización de la exploración y extracción de petróleo y gas de petróleo y reducir la concesión de nuevas licencias o emprender otras medidas importantes que contribuyan al objetivo del Acuerdo de París (Latin Clima, 2021).

Paralelamente, 1.049 ciudades se comprometieron a actuar e invertir para luchar contra el cambio climático, mientras 140 países quedaban con compromisos de cero emisiones netas para después de 2050 (UN, 2021).

Entre otros anuncios, sorprendió el posible acuerdo de 20 países, incluidos Estados Unidos, Canadá, Dinamarca, Italia, Finlandia, Costa Rica, Etiopía, Gambia, Nueva Zelanda, las Islas Marshall, de comprometerse a dejar de financiar combustibles fósiles en el extranjero para finales de 2022 e invertir recursos en energías renovables (Jessop & Abnett, 2021).

Esos anuncios son cruciales en el movimiento del hidrógeno, pues, gran parte de las empresas de combustibles fósiles que participaron en la COP 26 son ahora las que tienen en las manos el negocio del hidrógeno gris y azul y su intención es llevar a cabo varios pilotos de hidrógeno verde. Por ejemplo, Shell y la Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol), que estuvieron allí con delegaciones oficiales (Shell, 2021).

De otro lado, la Alianza GFANZ reúne a los bancos que mayores inversiones han hecho a proyectos de explotación de combustibles fósiles pero que, en la actualidad, incursionan en financiar proyectos de hidrógeno. Citi Bank, por ejemplo, entregará 100 millones de dólares para el desarrollo de tecnologías innovadoras como es la captura directa del aire, hidrógeno verde, almacenamiento de energía de larga duración y combustible de aviación hipotéticamente sostenible (Citi, 2021). A esta ola de inversiones se le une también la empresa financiera J.P. Morgan Chase, que anunció su compromiso de destinar más de 2,5 billones de dólares en diez años para promover la acción climática y el desarrollo sostenible centralizando 1 billón de dólares en iniciativas ecológicas como energía renovable y tecnologías limpias (JP. Morgan Chase, 2021).

A pesar de la esperanza que generan están inversiones de centralizar los recursos financieros en hidrógeno verde (quizás, el que menores preocupaciones crea a primera vista), la Alianza GFANZ declara:

> *La alianza bancaria de cero emisiones netas no aboga por la desinversión inmediata de las posiciones existentes, ya que la desinversión limita la oportunidad de influir positivamente en los comportamientos de las empresas y [de] acelerar la transición a las tecnologías verdes* (BBVA, 2021).

Esto permite, entonces, reconocer el rol del hidrógeno como posible ralentizador en la toma de decisiones para lograr una efectiva y justa transición energética. A pesar de que se enfocan varias promesas de inversiones en proyectos en energías renovables, se incluyen también proyectos de bajas emisiones, como sería el hidrógeno azul, lo que crea el espacio ideal para perpetuar la captación de los gremios extractivistas en las políticas climáticas.

Una transición directa al hidrógeno verde llevaría a varias empresas de carbón, gas y petróleo a bancarrota, lo que acortaría el tiempo de funcionamiento de sus activos enfocados en explotar estos recursos. Por esto, el rol de empresas de energía eléctrica ha tomado, también, ventaja en esta discusión. Son los casos de Iberdrola, Enel, Duke Energy, Souther Company, entre otras, las que, de acelerarse la transición, lograrían tomar ventaja del mercado que actualmente tiene el hidrógeno azul.

Finalmente, aún es poca la evidencia que se reconoce de parte de entes como el IPCC sobre el impacto del hidrógeno en la atmósfera. La ausencia de estudios sobre el impacto del hidrógeno como GEI en periodos menores de 100 años puede estar ocultando una amarga verdad para los recursos que se están movilizando en pro de la acción climática. Esta realidad implicaría, eventualmente, la desviación de recursos climáticos a iniciativas que profundizan la crisis, en cambio de las que tienen un mayor valor social y ambiental en los territorios.

3. Proyecciones futuras

3.1. Proyecciones del mercado del hidrógeno

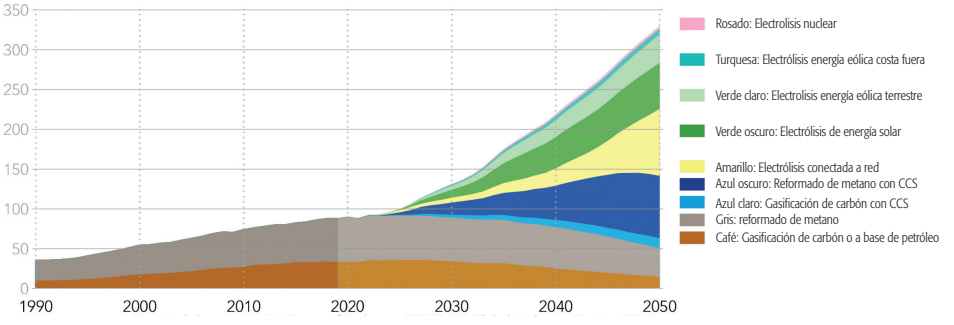
La motivación principal de apostar por el hidrógeno será descarbonizar los sectores que no pueden ser electrizados y cuya baja producción de carbono les permita mantener su nivel competitivo. A partir de esto, el hidrógeno se usará como vector energético para sustituir, gradualmente, energía con altas emisiones.

De acuerdo con la empresa consultora DNV, que construyó un escenario del hidrógeno para 2050 mezclando referencias de IEA e Irena, el hidrógeno logrará dominar el mercado después de 2040, con lo que se tendrá cada vez menor producción con altas emisiones. Para esto, en 2030, deberá surtirse 1/3 del suministro global con alternativas renovables bajas en carbono: 14%, con tecnologías Carbon Capture and Storage (CCS. En español, Sistema de Captura y almacenamiento de carbono) y 18%, con electrólisis. En 2050, alrededor del 85% del suministro mundial del hidrógeno procederá de métodos bajos en carbono, desglosado de la siguiente manera:

- 27,5 %, de energías fósiles con CCS.
- 25,5 %, de electrólisis conectada a la red.
- 17,5 %, de electrólisis basada en energía solar dedicada.
- 13 %, de electrólisis, basado en energía eólica, y,
- 1 %, de electrólisis nuclear dedicada.

Imagen 8. Producción mundial de hidrógeno por tipo de método

Unidades: MtH2/año



Fuente: DNV, 2022

Fuente de datos históricos: IEA future hyrogen (2019), IEA Global Hydrogen Review (2021). No incluye uso de hidrógeno en forma residual de procesos industriales

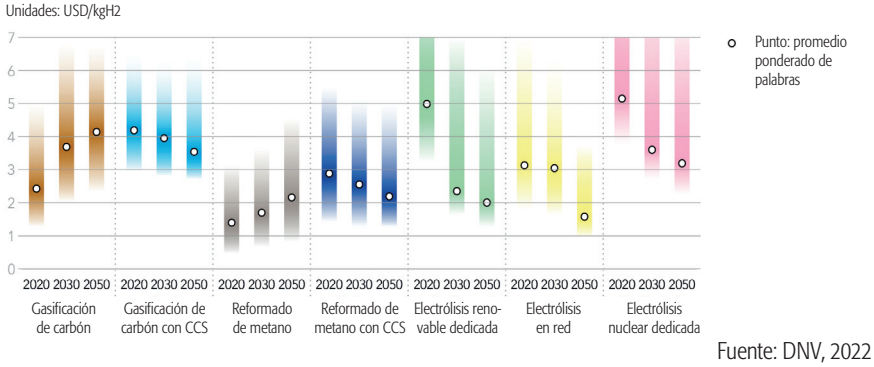
Para lograr lo anunciado para 2050, el avance del hidrógeno dependerá del costo y de la velocidad de construcción de la infraestructura necesaria para su producción y transporte. De cara a esto, el hidrógeno azul, a pesar de ser el más barato y bajo en emisiones que se produce actualmente, enfrenta el posible incremento de precios de gas para 2030. Los países importadores quedarían rezagados en relación con lo que tienen autonomía en materia de gas.

Asimismo, las tecnologías CCS que hacen este hidrógeno azul deberán demostrar un desarrollo que mitigue las preocupaciones y los futuros costos que podrían implicar su implementación, al tenerse apenas 16 proyectos en funcionamiento y 60 en desarrollo al 2020 (IEA, 2021). Las eficiencias de captura menores de 90% seguirán siendo poco estimulantes para el desarrollo de este hidrógeno, lo que cuestionará en los futuros gobiernos su apoyo al hidrógeno azul y a la posible creación de impuestos a las emisiones no capturadas. Sin embargo, por motivo de su uso en la industria, el hidrógeno azul presenta tendencias de que alcanzará puntos de equilibrio de su aplicación en producción de amoniaco y metanol. Así, su desarrollo permitirá bajar los costos de producción a partir de tecnologías CCS para 2050, lo que lo mantendrá competitivo.

En el caso del hidrógeno verde, en la actualidad, es prohibitivamente costoso, pero, se estima que para 2030 se alcance una fuerte reducción de costos a partir de la implementación de la electrólisis a causa del bajo costo de producir energía a partir de capacidad solar y eólica. Sus propulsores serán una reducción de costos entre 40% y 27% de los paneles solares y turbinas, respectivamente.

De igual manera, la tecnología podrá reducir sus costos entre un 25 y un 30% (véase imagen 9) y eso creará mayores oportunidades para producir hidrógeno a partir de centrales nucleares en el marco del hidrógeno rosa. Sin embargo, deberá cambiar los actuales factores habilitantes de estas fuentes de energía. De otro lado, los electrolizadores conectados para suministrar electricidad a la red no se verán de manera potenciada hasta después de 2030. Eso dependerá de los incentivos que generen hoy los gobiernos (DNV, 2022).

Imagen 9. Costo nivelado del hidrógeno, posterior a su método de producción.

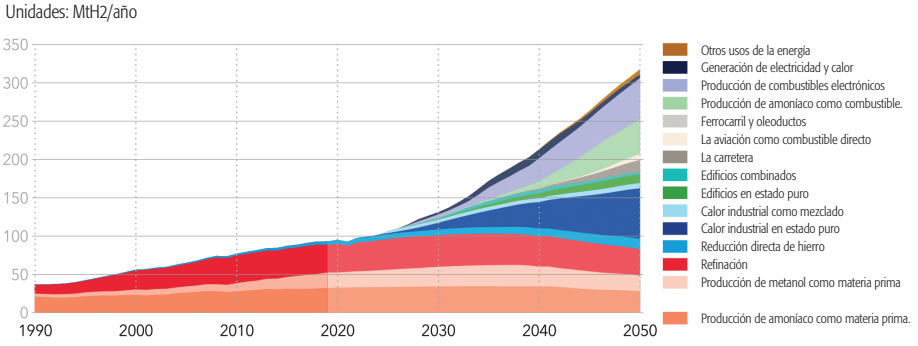


Fuente: DNV, 2022

El estudio del DNV reconoce que, para 2050, la competencia dependerá de las rutas alternativas en las que se pueda incluir el hidrógeno y la capacidad de horas con electricidad que se puedan suministrar a costos bajos (DNV, 2022). Para entonces, competirán a la par el hidrógeno azul y el verde, en espera de que el costo de electricidad permita un mayor despliegue del verde para sincronizarse con las metas climáticas a largo plazo.

Para 2050, la tendencia de usos del hidrógeno continuará en sectores industriales, refinación, producción de amoniaco y metanol. No obstante, entrarán a la demanda de hidrógeno sectores como producción de carburantes sintéticos y producción de amoniaco (véase imagen 10). De otro lado, a pesar de lo que se espera, la producción de hidrógeno negro y marrón seguirá en la matriz energética, entrando a competir con el hidrógeno azul y en mayor medida con el hidrógeno verde (DNV, 2022). El avance del hidrógeno rosa no permite considerarlo por el actual panorama relacionado con las centrales nucleares.

Imagen 10. Demanda global de hidrógeno por sector.

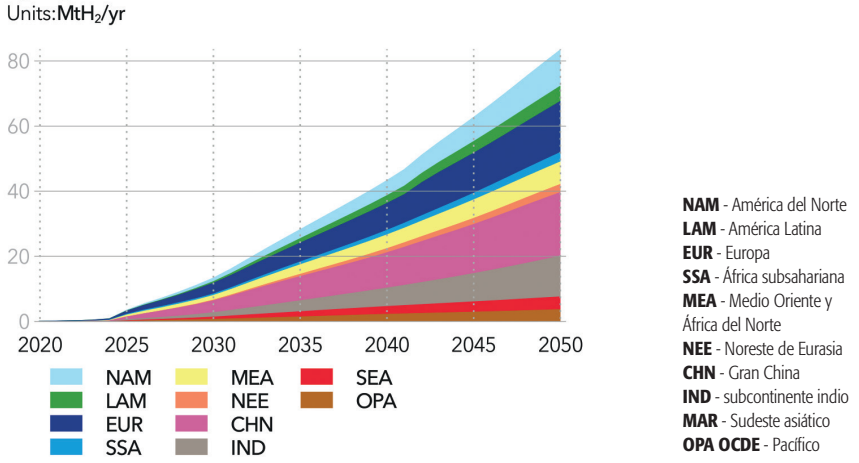


No incluye el uso de hidrógeno en forma residual de procesos industriales. Fuentes de datos históricos: IEA Future of Hydrogen (2019), IEA Global Hydrogen Review (2021), USGS Mineral Commodity Summaries (1990-2022), IFA (2022)

Fuente: DNV, 2022.

Finalmente, serán China, la Unión Europea, India y Norteamérica los mayores consumidores de hidrógeno para 2050. No obstante, los países de Latinoamérica, África Subsahariana, Medio Oriente y Norte de África y Sudoeste asiático generarán menor demanda, pero, a cambio, podrán producir mayor cantidad de hidrógeno verde, por sus potenciales solares y eólicos (véase imagen 11).

Imagen 11. Demanda global de hidrógeno en fabricación por región.



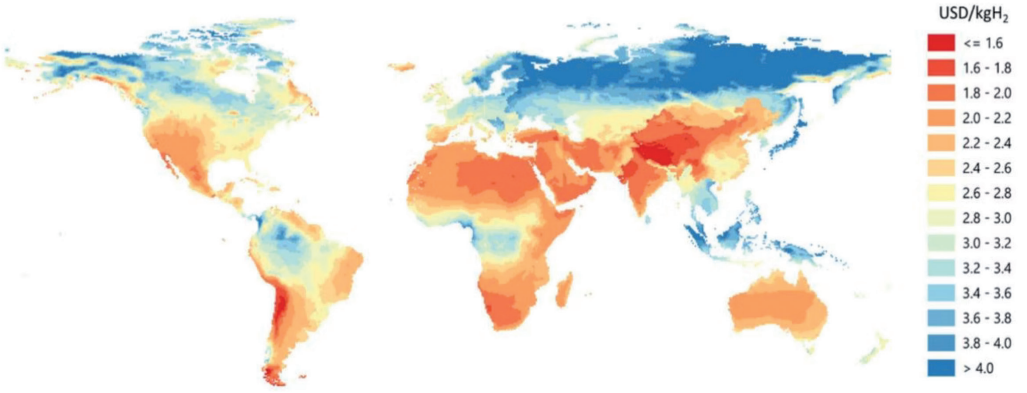
Fuente: DNV, 2022

3.2. Rol de Latinoamérica en el desarrollo del hidrógeno

En diversos textos, se ha mencionado la privilegiada posición de América Latina en el mundo. Su riqueza hídrica, solar, eólica y, en general, natural, resuena cada vez más en el escenario internacional por su capacidad de apalancar las transiciones que necesitamos para enfrentar las crisis que se intensifican cada vez más, incluida la energética. Esta riqueza potencia la posibilidad de que la región sea líder en producción de hidrógeno, sobre todo, hidrógeno verde. Su riqueza solar y eólica potencia la capacidad para ser una región que se abastezca a sí misma y genere exportaciones a países que no cuentan con estos privilegios.

En igual forma, el avance y compromiso de la región en políticas climáticas llama la atención de países desarrollados que cada vez más ven la necesidad de transitar hacia descarbonizar la matriz energética (Husar, 2022). No obstante, para la región, el impulso de este vector, por la ausencia de tecnologías que aprovechen estos potenciales energéticos primarios reduce sus oportunidades (véase imagen 12).

Imagen 12. Costes de hidrógeno de la energía solar fotovoltaica híbrida y el sistema eólico terrestre, a largo plazo.



Fuente: IEA, 2019.

En 2019, se demandaron en la región 4 Mt de hidrógeno para la producción de amoniaco, metanol, acero y productos refinados. Esta demanda alcanzó consumos superiores de gas natural de todo Chile en el mismo año y se emitió más CO_2 a la atmósfera, que todo el que emitieron los vehículos de carretera de Colombia. Asimismo, en la región, apenas se llevan a cabo tres pilotos de hidrógeno bajo en carbono: en Argentina, Chile y Costa Rica, siendo el hidrógeno negro el predominante en la actualidad (IEA, 2021).

A pesar de la necesidad de transitar a hidrógeno con menores intensidades de carbono, aun a corto plazo se limita la demanda a sectores industriales. Por ejemplo, la AIE reconoce potenciales oportunidades para abastecer la demanda de hidrógeno, con la producción del 80% de acero que producen Brasil y México y en actividades mineras en Chile y Perú para 2030 (IEA, 2021).

En esta forma, en la región y en el mundo se han dado señales para diversificar tanto las aplicaciones del hidrógeno, como sus fuentes, en espera de una seguridad tecnológica. Gobiernos de Costa Rica, Chile, Perú, México y Colombia firmaron, luego de la COP26, la alianza LAC Green Hydrogen Action con el propósito de impulsar el hidrógeno verde a corto plazo (Medinilla, 2021). Asimismo, en la actualidad, existen iniciativas como la Plataforma para el desarrollo del hidrógeno verde en Latinoamérica y el Caribe, que busca fortalecer las capacidades de los países para fomentar este tipo de proyectos, mientras se llevan a cabo múltiples conversatorios y foros regionales al respecto (H2LAC, 2022).

Entre las dinámicas del impulso al hidrógeno en la región, han estado, principalmente, entes como la Agencia Alemana de Cooperación (GI), el Banco Mundial, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal) y el programa EuroClima+, apoyando financieramente la construcción de Hojas de Ruta, como el caso de Chile, Colombia y Brasil.

Asimismo, la Unión Europea creó un fondo de 12.000 millones de euros de inversión público-privada que se destinará para el fomento del desarrollo sostenible, en especial, mediante las energías renovables. Acá, se incluye el hidrógeno como prioridad (DW, 2021).

Es así como esta Unión se ha adelantado a otras potencias para marcar una dirección sobre a dónde debe ir la política energética en el futuro de la región latinoamericana. A pesar de todas las inseguridades que se tienen con el hidrógeno, se ha propuesto como una alternativa para democratizar la participación de los países en el mercado de la energía; se ha prometido que Argentina y Brasil logren su autoabastecimiento, que no lo tienen, en sectores como el petrolero.

En ese sentido, la AIE ha planteado como necesidad que los países (IEA, 2021):

- Definan una visión a largo plazo del hidrógeno en el sistema energético.
- Identifiquen oportunidades a corto plazo que respalden la implementación de tecnologías claves.
- Apoyen esquemas de financiamiento anticipado y reduzcan riesgos de inversión.
- Se concentren en la innovación y el desarrollo para obtener del hidrógeno más beneficios que la reducción de emisiones.
- Creen esquemas de certificación para incentivar la producción de hidrógeno bajo en carbono.
- Cooperen a nivel regional e internacional para posicionar a la región en el panorama mundial de hidrógeno.

En este panorama, Chile, Perú, Brasil, México y Costa Rica adelantan iniciativas de política pública y modificaciones a leyes energéticas para el fomento del hidrógeno en sus países. De otro lado, Argentina y Colombia han hecho gestiones regulatorias y normativas en la materia para dar apertura al hidrógeno azul y al verde, sobre todo al primero, por su potencialidad de aumentar reservas de gas para los próximos años (Centro de Información sobre Empresas y Derechos Humanos, 2022).

En otra perspectiva, el impulso acelerado del hidrógeno en la región ha despertado diversas dudas, en especial, en asuntos de derechos humanos. La

ventaja del hidrógeno azul con respecto al verde en la región y en el mundo llama a los países a intensificar sus exploraciones de yacimientos de gas y petróleo. Además, con el impulso que ha generado la reactivación económica y la guerra entre Ucrania y Rusia, el carbón continúa siendo parte esencial de las exportaciones de varios países, con lo que se habilita un gran campo para la producción de hidrógeno marrón (Bloomberg, 2021). Esta situación tiene diversos dilemas que cuestionan y enfrentan derechos a la salud, a un ambiente sano y a la seguridad alimentaria, a cambio de generar una simple diversificación de subproductos a partir de combustibles fósiles.

Asimismo, la relación que tiene la actual demanda de hidrógeno y su fuente energética preocupa que habilite la aplicación de técnicas violentas como el *fracking*, cuya huella ha dejado devastados varios territorios en Argentina y donde en Colombia se ha buscado implementar junto con otras estrategias para aumentar la demanda en los próximos años, a pesar de advertencias gubernamentales de tener reservas para menos de siete años (Voces por el clima, 2021). Validando la necesidad de obtener más yacimientos, sea con *fracking* o con exploración costa afuera del país.

Por otro lado, el estrés hídrico que puede despertar el hidrógeno azul y la demanda de materiales para la transición es una preocupación que han empezado a despertar los diálogos al respecto. En territorios históricamente explotados como la Guajira, en Colombia, se ubican los principales territorios con mayor potencia energética solar y eólica. No obstante, es de los territorios con mayor estrés hídrico. Esto vincularía posibles violaciones a comunidades indígenas, que se acentúan tanto en los puntos con mayor potencialidad para producir hidrógeno verde, como con la instalación de tecnologías CCUS.

La carencia de fomento de investigación y desarrollo preocupa a organizaciones ambientalistas en relación con el desarrollo de tecnologías CCUS. La falta de evidencia de la mitigación de los posibles riesgos de estos sistemas y la baja madurez tecnológica se posicionan en la agenda como factores generadores de conflictos socioambientales en Latinoamérica.

Tercer capítulo.
El debate nacional sobre la transición energética

En 2020, el Ministerio de Minas y Energía publicó *La transición energética de Colombia*, documento en el que se consigna la perspectiva gubernamental sobre la transición energética, que tiene dos fundamentos: el rol estratégico del sector minero-energético en dicha política y la apuesta por una transición, aunque, dice el documento, es un país que en sí mismo ha consolidado una matriz energética limpia (Minenergía, 2020). Sobre la base de los mismos fundamentos, pero un año después, aparece *Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia*. Este documento presenta la "transformación cultural del Ministerio de Minas y Energía" (Minenergía. 2020, 35) como la estrategia que ha hecho posible, según el gobierno de turno, que Colombia esté a la vanguardia en la región.

En dicho panorama, el país se presenta como enchufado a la inercia creada por la necesidad insoslayable de pensar fuentes energéticas sostenibles y de bajo impacto ambiental. Visto así, se requiere entender lo que está sucediendo en la materia, los marcos institucionales sobre el tema e identificar el lugar que ocupan los hidrógenos verde y azul en la antes anunciada transición energética.

Queremos abordar, entonces, varios interrogantes sobre el escenario de la aparente sincronía y de los optimismos entre el gobierno entrante y el saliente. Sus respuestas apuntan a identificar el rol efectivo y concreto de la adopción e implementación de tecnologías asociadas a la producción de hidrógenos verde y azul como estrategias contundentes y reales para la transición en Colombia. Con lo anterior, se trata, además, de proponer cómo construir una ruta de política pública conducente a la transición energética. Veamos:

- ¿Cuáles han sido los pilares y fundamentos de la transición energética que el Estado colombiano viene anunciado y que se enmarcan en normas y documentos de Consejo Nacional de Política Económica y Social (Conpes), del Departamento Nacional de Planeación (DNP), entre otros?

- El país cuenta con una hoja de ruta que traza la estrategia a 2050 para desarrollar un sector de producción de hidrógeno y un mercado interno, así como la interconexión con el mercado mundial. Sin embargo, la lectura optimista y tecnocrática no puede desconocer la situación real de los territorios. Con el norte de esta advertencia, ¿cuál es la visión que existe sobre el hidrógeno en Colombia y cuáles, sus vacíos fundamentales?
- El hidrógeno se ha presentado como sinónimo del cambio paulatino de la matriz energética hacia a la descarbonización. ¿Se han tenido en cuenta las probables tensiones con las comunidades y los territorios donde se adelantarían proyectos en esa dirección? Lo que se ha visto en algunas experiencias con el manejo de energías alternativas es que la ausencia de diálogo con las comunidades en torno a la transición sugiere una tendencia peligrosa: hacia un debilitamiento institucional que vulnera los derechos de acceso a la tierra y al territorio.

Para precisar en qué consiste dicha tendencia, recurriremos a lo sucedido en la Guajira, en Colombia, y en la provincia de Rio Negro, en Argentina. Identificaremos los patrones comunes que hay entre ambas situaciones, dado que, en uno y otro caso, hay una relación intrínseca entre extractivismo de vieja data y la forma como se quiere construir, desde el enfoque estatal y corporativo, la transición.

1. Transición en Colombia

La Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) propuso el Plan Energético Nacional (PEN) 2020-2050 para abordar los desafíos del cambio climático y las necesidades de la implementación de una estrategia de transición energética con la perspectiva institucional del Estado colombiano. El PEN mencionado tiene como objetivo "definir una visión de largo plazo para el sector energético colombiano e identificar las posibles vías para alcanzarla" (UPME, 2020, p.18).

En ese documento indicativo, la UPME propone cinco desafíos en la transformación del sector energético y orienta a que dicho cambio sea coherente con los compromisos y medidas para enfrentar el cambio climático, incluida la forma de descarbonizarse nuestra matriz energética

El primer desafío tiene que ver con la disponibilidad de recursos energéticos para el consumo interno. La idea dominante había sido pensar el país como exportador neto, debido a la relativa abundancia de recursos, pero, señala el documento, el país es cada vez más dependiente de la energía eléctrica, por lo

que el sector que la produce debe fortalecerse mediante el mejoramiento de la infraestructura y la diversificación de fuentes de energía, para apoyar otros sectores como el de transporte y el industrial. Por lo tanto, estaríamos hablando de una producción para el consumo interno del país y enfocada en el sector transporte.

El segundo desafío se refiere a la brecha tecnológica. En este aspecto, deberían concentrarse los esfuerzos en temas de eficiencia energética y combinar la creación de un sector consumidor mejor informado, con estrategias de reconversión tecnológica.

El tercer desafío pone como líneas fundamentales de la política energética del país tanto a la *mitigación*, como a la *adaptación* al cambio climático. La UPME propone incluir enfoques interdisciplinares en la planeación y como variable de análisis a la variación climática. También, introducir estrategias para promover cambios de patrones de consumo energético en la sociedad y otras para atraer nuevos actores que aporten con una mayor diversificación de fuentes no convencionales de energía.

El cuarto desafío invita a promover una mayor descentralización de la matriz energética. Además, acompañar esa descentralización con estrategias de descarbonización y de digitalización enfocadas en la búsqueda de sustitutos de las fuentes energéticas que aportan una mayor carga de CO_2 (UPME, 2020).

El último desafío pone al covid-19 y a la incertidumbre como dos variables a incluir en la planeación energética. Esto implica que, en el corto plazo, es necesario fortalecer las inversiones atrayendo capital, pues, la pandemia implicó que ellas se redujeran. En el mediano y largo plazo, es fundamental integrar medidas de mitigación ante coyunturas que puedan afectar las cadenas de producción (UPME, 2020).

Ahora bien, según la UPME, la resolución de los desafíos identificados se dará en el largo plazo. Para entender este asunto, compara los resultados en términos energéticos, económicos, medioambientales y de riesgos de cuatro escenarios: actualización, modernización, inflexión y disrupción.

En los tres primeros (actualización, modernización e inflexión) se plantean temas relevantes sobre mejoramiento de combustibles, transformación de la matriz de consumo rural y urbano, fortalecimiento del sector gasífero y aumento de la electrificación. El cuarto escenario, que es el de interés particular en este documento, tiene contemplado que el país pueda desarrollar una oferta de hidrógeno verde y que el transporte interno implemente tecnologías de cero emisiones de CO_2 entre 2030 y 2050.

Los riesgos identificados fueron el de *lock-in* tecnológico[3], los ambientales y el de capital humano. En el primer caso, el escenario de disrupción indica que "la producción y uso de hidrógeno se encuentran en etapas incipientes de desarrollo y, por ello, es prematuro estimar los riesgos de *lock-in* de esta tecnología" (UPME, 2020, p.103), con la salvedad de que la capacidad instalada facilitaría su producción.

En relación con los riesgos ambientales, solo se hizo un análisis detallado del sector transporte. Se señaló que utilizar medios de transporte movidos por fuentes eléctricas plantea los retos de manejo de residuos asociados a la producción y disposición final de las celdas de energía de estos medios (UPME, 2020). Por último, el riesgo de capital humano se identifica como el mayor, pues "la oferta educativa, los grupos de investigación y el capital humano capacitado son escasos en áreas como el aprovechamiento de fuentes de energía alternativa (océano) y el hidrógeno (…)" (UPME, 2020, p.107); además, la investigación en el país es débil.

Identificadas las necesidades de una transición energética en Colombia, es menester resolver la pregunta sobre cuál es la matriz energética del país. Por matriz energética se entiende al conjunto de fuentes de energía (primarias y secundarias) que permiten la satisfacción de las necesidades energéticas de un determinado país (García Howell, 2021). Esta matriz contempla dos escenarios: el de la capacidad de producción energética (la oferta) y el de consumo energético (la demanda). De igual manera, la matriz permite identificar los principales aportantes a la capacidad energética y, de dicha composición, se pueden derivar las necesidades de descarbonización de la economía.

Según la UPME, la matriz energética de Colombia es relativamente diversa, como puede verse en la imagen 13, y el 69 % de la producción minero-energética se exporta: el carbón (UPME, 2015). Es un dato muy importante, pues, la tendencia política actual en países europeos y de la región latinoamericana es abandonar el carbón como fuente energética. Por esta razón, el hidrógeno azul va a tomar cierta relevancia en los próximos años, pues será el que absorba el carbón que se produzca en el ámbito nacional, mientras se va abandonando.

3. Los efectos *lock-in* o de permanencia se refieren a la inercia que genera una determinada forma de acceder a un recurso o a una determinada materia prima y que dificulta el cambio o, incluso, transformaciones en la economía de un país. En el caso de la transición energética, se habla de efectos *lock-in* del carbono para señalar la forma como las instituciones asociadas a la extracción de petróleo y energías fósiles, así como la dependencia de la matriz energética a esas energías, dificultan el desarrollo de tecnologías y de sectores energéticos distintos: la razón es que la economía es dependiente de dichas fuentes altamente generadoras de GEI, lo que entorpece la implementación de políticas de transición.

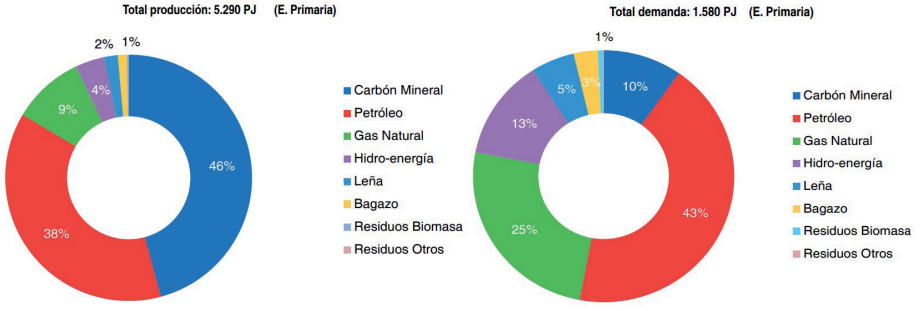
Imagen 13. Escenarios previstos por la UPME para el desarrollo del hidrógeno en Colombia.

	Escenario I: Actualización	Escenario II: Modernización	Escenario III: Inflexión	Escenario IV: Disrupción
	En sintonía con las tendencias actuales	Gasificación como paso hacia la descarbonización	Comienzo de la electrificación de la economía	Innovación para encaminar al sector hacia el carbono neutralidad
Crecimiento económico de LP	3,1 %	3,1 %	3,5 %	3,5 %
Iniciativas oferta	• Importación + YNC • Escenario de expansión de generación UPME • Mejoras en combustibles líquidos • Eficiencia en el sector de hidrocarburos	• Importación gas natural • FNCER + eólico *off* shore • Biocombustibles • Biogas • Eficiencia en plantas térmicas	• Geotermia • Pequeños reactores nucleares • *Phase out* plantas ineficientes	• Hidrógeno verde • FNCER
Iniciativas demanda	• Adopción BAT Colombia 2050 • Sustitución leña por GLP en el sector rural • Metas de electrificación vehicular actuales • Cambio de luminarias en el sector residencial	• Adopción BAT Colombia 2050 • Gas en transporte masivo e industria • Mayores participaciones de energía eléctrica en el transporte	• Adopción BAT mundo en 2040 • Cambios de estufas por gas por inducción • Leña 0 en el sector rural en 2050 • Mayor electrificación en los sectores de transporte e industria	• Adopción BAT mundo en 2030 • Uso de hidrógeno en transporte • Renovación acelerada de la flota vehicular con tecnologías de 0 y bajas emisiones

Fuente: UPME, 2020

Igual lugar relevante ocupan el petróleo y el gas. En cuanto a la energía consumida en el país, las principales fuentes son el petróleo, el gas y el carbón. Estas son consumidas en el mercado interno, sobre todo, por el sector transporte (45%), la industria (22%) y el sector residencial (19%) (UPME, 2015, p. 25. Véase imagen 14).

Imagen 14. Matriz energética de Colombia. 2018



Fuente: UPME, 2020

1.1. ¿Cómo se ha abierto paso la transición energética en las políticas, normas y proyectos?

Brasil fue el primer país de América Latina en anunciar un programa de transición energética, en el contexto de energías no renovables, asociado a la utilización del hidrógeno extraído del gas natural, la gasolina y el metanol. Ese país puso en marcha el Programa Brasileño de Sistemas de Hidrógeno y Pilas de Combustible (Procac)[4], a cargo del Ministerio de Ciencia y Tecnología (MCT). Empero, Argentina fue el primer país en regular el hidrógeno e incluirlo en su matriz energética mediante la Ley 26.123, que crea el Régimen para el desarrollo de la tecnología, producción, uso y aplicaciones del hidrógeno como combustible y vector de energía.

La ley argentina se planteó como objetivos consolidar la infraestructura técnico-científica del país, promover programas pilotos mediante incentivos fiscales dirigidos al sector privado (oferta) y articular incentivos para implementar tecnologías de hidrógeno en equipos individuales e industriales. También, cre**ó** el marco para,

> *Impulsar el estudio de la obtención del hidrógeno a partir del uso de energías renovables y no renovables [y] el montaje de plantas pilotos para la generación de energía a partir del hidrógeno mediante procesos no contaminantes* (Ley 26.123, artículo 13).

En función de implementar lo anterior, creó el Fondo Nacional de Fomento del Hidrógeno (Fonhidro) (artículo 13, Ley 26.123).

La Agencia Internacional de Energía (en inglés, International Energy Agency, IEA) identificó una alta probabilidad de que la tendencia regulatoria en América Latina se decantara por el enfoque de "tecnología neutral", que deja al mercado la decisión sobre los riesgos y sobre las tecnologías aplicables (IEA, 2019). Esta tendencia tiene tres características: al desarrollarse una legislación sobre el sector, esta tiende a dar preponderancia a la oferta y crea estímulos tributarios, arancelarios y flexibilización a estándares ambientales; en segundo lugar, tiene marcos regulatorios insuficientes o que no contemplan los hidrógenos de manera detallada (con excepción de Colombia); la tercera característica de la tendencia regulatoria es su análisis detallado de la relación entre la cadena de valor y los riesgos asociados (Escalona & Jara, 2020).

4. Véase Green Energy Plataform of German-Brazilian Aliance, en https://www.h2verdebrasil.com.br/en/brazil/

Colombia inició este proceso en 2013 y asumió la vanguardia en la región en 2021 creando la primera ley de hidrógeno. Este proceso se vio marcado por importantes retos, no superado aún y que enmarcan la toma de decisiones en la materia. Rodas Monsalve y Hernández Muñoz (2019) identificaron que, para desarrollar un sector energético asociado al hidrógeno como vector, era menester armonizar dicha política a la vocación ecológica de la Constitución Política de Colombia y a las presiones de los compromisos internacionales (Objetivos de Desarrollo del Milenio).

Igualmente, según los autores en mención, es vital hacer una actualización institucional y normativa, sintonizada con las necesidades propias de la implementación de una tecnología que no se produce localmente y que genera altos niveles de dependencia de Colombia en relación con otros países. Por último, se busca regular un mercado que todavía se encuentra en el escenario hipotético y, por eso, la regulación debería apuntar a integrar elementos sustanciales como a la evaluación de impactos y su encadenamiento con la política energética del país.

1.2. La ruta del hidrógeno

El Ministerio de Minas y Energía (Minenergía), con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) construyó una estrategia, u hoja de ruta, para coadyuvar a la implementación de los objetivos de descarbonización, trazados sobre la base de reconocer al hidrógeno como un acelerador de la aplicación de las fuentes no convencionales de energías renovables (Minenergía, 2021a).

En la estrategia se reconocen tres ventajas decisivas del país: a) tiene importantes reservas de petróleo, gas y carbón con niveles cercanos a la autosuficiencia; b) cuenta con muchos recursos hídricos, que le dan una notable ventaja en materia hidroeléctrica; c) el potencial eólico es significativo, tanto en el territorio continental, como en el mar (*offshore*).

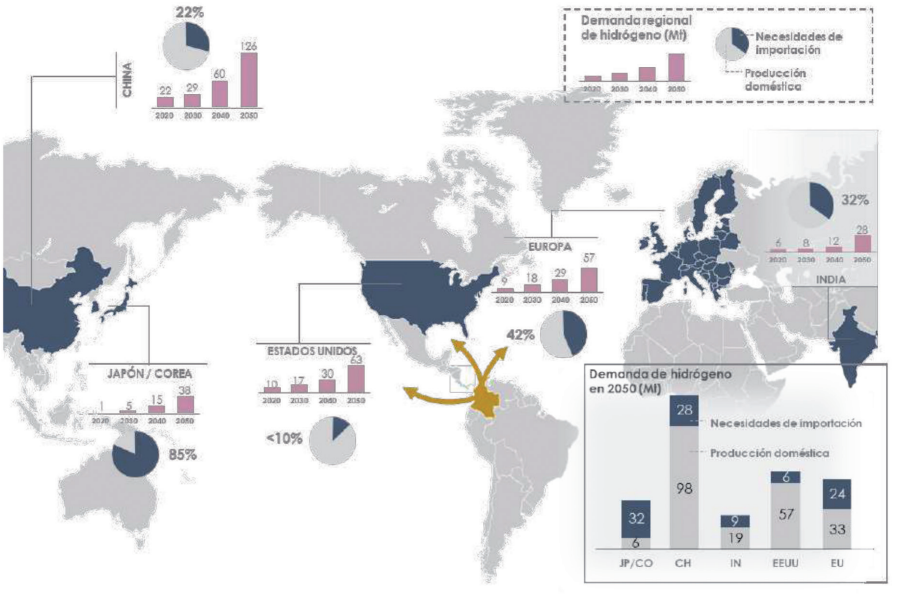
En particular, la estrategia identifica que algunas zonas costeras del norte del país como las de los departamentos de "la Guajira, Magdalena, o Atlántico poseen una combinación de recursos renovables que aseguran una producción competitiva de hidrógeno verde" (Minenergía, 2021a, p.19).

La hoja de ruta se compone de cuatro ejes de acción, 27 líneas de trabajo y 56 medidas y se orienta al desarrollo de hidrógeno de bajas emisiones de CO_2. El periodo de construcción e implementación de esta tecnología cubrirá entre 2020 y 2050. Al no existir una industria nacional consolidada, el hidrógeno de bajas emisiones debe entrar al país en tres fases:

- La fase de *aplicación en industrias existentes*, en la que se recurra principalmente al hidrógeno azul y al gris (2020-2026).

- La fase de *aplicación emergente*, en la que se buscará desarrollar la industria de los fertilizantes y reducir los costos del hidrógeno verde (2027-2035).
- Y la fase de *aplicación disruptiva*, en la que se espera que el hidrógeno verde sea más competitivo que cualquier alternativa fósil. En esta fase, se espera haber consolidado la capacidad para transportar el hidrógeno y para exportarlo (véase imagen 15).

Imagen 15. Participación de Colombia en el mercado mundial del hidrógeno, en la perspectiva de 2050.



Fuente: Minenergía, 2021a.

La estrategia u hoja de ruta se propone, también, cinco pilares: reducción de emisiones de CO_2, crecimiento económico, un gobierno nacional comprometido con el hidrógeno, un enfoque de transición justa y el reconocimiento de comunidades locales. Los primeros tres pilares dependen en gran medida de una amplia presión internacional. Los dos últimos, conviene evaluarlos con detenimiento.

El enfoque de la hoja de ruta señala que el hidrógeno "en zonas mineras y petroleras se beneficiará del aprovechamiento de las infraestructuras y capacidades profesionales existentes, lo que permitirá una transición justa y equilibrada" (Minenergía, 2021a, p.25). Lo anterior y el desarrollo normativo a corto

plazo son los únicos criterios utilizados por Minenergía para hablar de justicia energética. La estrategia no habla de cómo se evaluarán los impactos ambientales, ni de los beneficios que recibirán las comunidades o sobre cómo se prevendrán, mitigarán y remediarán los posibles impactos a los derechos humanos.

En lo referente a la participación de las comunidades, la estrategia señala que ellas estén desde el inicio del proceso. También, que en ello habrá mediación de los gobiernos nacional y local, mediante lo siguiente:

> *[U]n plan de socialización que traslade el potencial del hidrógeno, para transformar económicamente [a] 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* (Minenergía, 2021a, p.25).

Finalmente, la hoja de ruta propone dos tipos de indicadores de seguimiento para evaluar el avance del hidrógeno en el país: el primero se relaciona con la producción (oferta) y el segundo con el consumo (demanda). Ninguno de los indicadores da cuenta de factores como el estrés hídrico, las tensiones territoriales o las afectaciones sociales y ambientales.

1.3. El hidrógeno verde y el azul en Colombia

En la ciudad alemana de Bonn, se suscribió el Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (Irena, por sus siglas en inglés), que da origen oficial a la institución de ese nombre. Irena apoya, asesora y acompaña a los gobiernos que han suscrito su estatuto en materia de energías renovables. Setenta y cinco países hacen parte de esta agencia, entre ellos, Colombia.

El estatuto entró en vigor en 2010, pero, solo tres años después Colombia lo ratificó mediante la Ley 1665 de 2013. Esta ratificación introduce por primera vez en el marco normativo del país la noción de *energía renovable*, con la que llega el reconocimiento de seis posibles fuentes: la bioenergía, la energía geotérmica, la energía hidráulica, la energía marina (que incluye la energía obtenida de las mareas y de las olas y la energía térmica oceánica), la energía solar y la energía eólica. Estas dos últimas serán las de mayor promoción por parte del Estado colombiano.

Un año después de la ratificación del Estatuto del Irena, apareció la Ley 1715 de 2014 para la promoción, el desarrollo y la utilización de llamadas Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), con énfasis en aquellas de carácter renovable. La norma tiene tres ejes de acción: dos de ellos se

enfocan en la seguridad energética del país y el tercero, en el cumplimiento de compromisos internacionales:

> a) *Identifica[r] y aprovecha[r] fuentes no convencionales buscando que se integren a la red eléctrica nacional;*
> b) *fomentar la inversión, la investigación y el desarrollo de tecnologías limpias en el país, y,*
> c) *establecer la base de cumplimiento de las obligaciones adquiridas al ratificar el Estatuto del Irena relativas a la promoción de energías renovables, la gestión eficiente de la energía y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero* (Artículo 2, Ley 1715 de 2014).

Para poder generar dinámicas de aprovechamiento, esta ley introduce la figura jurídica de *Utilidad Pública*,

> *[L] a cual tendrá los efectos oportunos para su primacía en todo lo referente a ordenamiento del territorio, urbanismo, planificación ambiental, fomento económico, valoración positiva en los procedimientos administrativos de concurrencia y selección así como a efectos de la expropiación forzosa* (Ley 1715 de 2014, artículo 4).

Esta fórmula se ve aislada en esta ley y pareciera ser un artículo más. Sin embargo, su efecto jurídico tiene alcance en el ordenamiento del territorio y, en consecuencia, en varios ámbitos territoriales de toma de decisiones. En consecuencia, el poder ejecutivo nacional puede abrogarse prerrogativas que regularmente corresponden a los municipios, o en relación con la garantía de derechos, pues, con la declaratoria, se pueden afectar derechos como el de la propiedad o, incluso, el de la participación en materia ambiental.

Por lo demás, la ley en mención desarrolló diferentes escenarios energéticos y destacó los de la energía eólica y la solar. También asignó las funciones administrativas para la promoción de fuentes no convencionales renovables y creó el Fondo de Energías no Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía.

Con este cuerpo normativo como punto de partida, el Conpes se reunió dos veces (en 2018 y en 2022) y estableció las líneas generales de política pública para las energías renovables y la transición energética. Aunque en principio carecen de carácter vinculante, los documentos del Conpes son, en la práctica, los principales instrumentos de implementación de políticas públicas. A continuación, un esbozo de ambos documentos:

- Documento Conpes 3934 de 2018: este documento establece la necesidad de promover fuentes de energía no convencionales. Parte del hecho de que cerca del 70 % del país tiene como fuentes de energía las hidroeléctricas, uno de los sectores que más impactos sufre por cuenta del cambio climático.
- Documento Conpes 4075 de 2022: muestra el diagnóstico del hidrógeno en Colombia, luego de conocida la hoja de ruta. En él señala que las condiciones todavía no son favorables para adelantar un mercado del hidrógeno, toda vez que la normatividad sigue difusa.

Hemos hablado, entonces, de las leyes 1665 de 2013 y 1715 de 2014. La tercera norma de relevancia es la Ley 2099 de 2021, conocida como "Ley de transición energética". Esta norma aparece en la coyuntura de la pandemia de covid-19, por lo que su objeto es actualizar el marco normativo para la transición energética, integrando esta última a la reactivación económica de la pospandemia. Y esto se hará mediante el fortalecimiento de la matriz energética en dos componentes principales: energía eléctrica y gas.

En la Ley 2099 de 2021, se reitera la figura de *Utilidad Pública* de la Ley 1715 de 2014 a la que se agrega el marco en que puede implementarse: en los Proyectos de Interés Nacional y Estratégico (Pines). Además, se adiciona los numerales 23 y 24, en los que se consignan los conceptos de hidrógeno verde e hidrógeno azul:

> *23. Hidrógeno Verde: es el hidrógeno producido a partir de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable [FNCER], tales como la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la [energía] eólica, el calor geotérmico, la [energía] solar, los mareomotriz, entre otros; y se considera FNCER.*
> *24. Hidrógeno Azul: es el hidrógeno que se produce a partir de combustibles fósiles, especialmente, por la descomposición del metano (CH_4) y que cuenta con un sistema de: captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS), como parte de su proceso de producción y se considera FNCE* (Artículo 5, Ley 2099 de 2021).

Un segundo grupo de disposiciones relevantes de la Ley tiene que ver con la creación del Fondo de Energías No Convencionales y de Gestión Eficiente de la Energía (Fenoge) (Artículo 10, Ley 2099 de 2021). Este fondo se encarga en la actualidad de promover los proyectos pilotos de hidrógeno y de seleccionar a las empresas proponentes que desean participar en ellos, mientras compiten otras tecnologías por este fondo.

El Fenoge tiene también a su cargo un régimen de sanciones para los que infrinjan las regulaciones ambientales u oculten información en el contexto de la producción de energía geotérmica. La inclusión de estas sanciones se dirige, principalmente, al sector hidrocarburos, pues, desde marzo de 2021 ya había iniciado uno de los tres proyectos pilotos que existen en el país, a cargo de las empresas Parex Resources y Ecopetrol (Piensa en Geotermia. 2021).

Además, en la norma se incluyó un conjunto de instrumentos de promoción del fortalecimiento de capacidad instalada dirigido a la oferta de energía. Se trata de un régimen de beneficios tributarios compuesto por cinco estímulos:

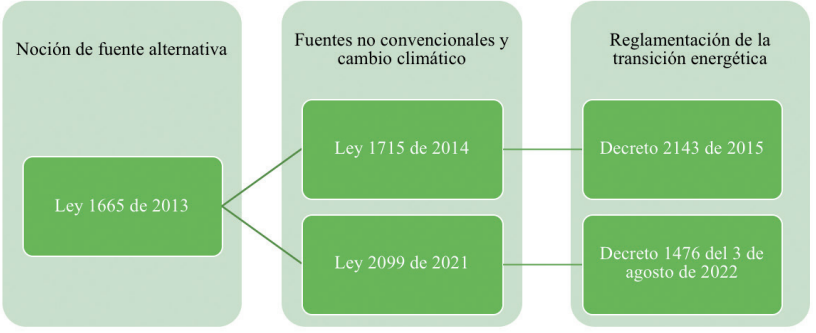
- Deducción especial en la determinación del impuesto sobre la renta (Artículo 8): se permiten, por un periodo de 15 años, deducciones de hasta el 50 % de inversión directa que se haga por parte de un agente privado relacionada con fuentes no convencionales de energía.
- Exclusión del Impuesto al Valor Agregado (IVA) en bienes y servicios. (Artículo 12): todos aquellos bienes vinculados al desarrollo de fuentes de energía no convencionales quedarán excluidos de la aplicación del IVA.
- Exención de gravámenes arancelarios (Artículo 13); se exonera del pago de cualquier derecho arancelario de importación a materiales, equipos o maquinarias utilizadas de manera exclusiva para la promoción de fuentes de energía no convencionales.
- Depreciación acelerada (Artículo 14): este estímulo permite que cualquier obra civil, maquinaria o equipo necesarios para la preinversión de proyectos de promoción de fuentes de energía no convencionales puedan ser deducibles de la declaración de renta, conforme al porcentaje de depreciación que fije la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN).
- Por último, para lograr la proporción del sector productivo del hidrógeno y fomentar su uso, la Ley 2099 de 2021 ordena al Gobierno nacional crear el mecanismo, las condiciones y los incentivos "para promover la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso de hidrógeno" (Artículo 21 de la ley 2099 de 2021), sea para la prestación de servicio eléctrico, o para otros sectores como el de hidrocarburos, la industria y el transporte.

Lo anterior incluye la posibilidad de crear incentivos para la exploración y explotación de minerales que contribuyan a "la producción, almacenamiento, acondicionamiento, distribución y reelectrificación de hidrógeno" (artículo 23 de la Ley 2099 de 2021). Esta medida debe llamar la atención, pues, se estarían

estableciendo beneficios para el sector minero que ya opera en el país en la explotación de los denominados minerales de transición.

Para dar alcance a la orden anunciada en los dos párrafos anteriores, el presidente de la Republica emitió, mediante el Minenergía, el Decreto 1476 del 3 de agosto de 2022, con el que se establecen las condiciones y lineamentos generales sobre hidrógeno en Colombia. La primera atribución que asume el Minenergía es la de crear *certificados de origen del hidrógeno,* un prerrequisito para acceder a los beneficios tributarios de la ley 2099 de 2021 (Artículo 2.2.7.1.5.). También, se vuelve obligatorio para los proyectos de hidrógeno azul tener un sistema de captura de carbono (CCUS) (artículo 2.2.7.1.3.). Además, se anuncia la creación de un *sistema de información aplicable a los agentes y actores de la cadena de valor del hidrógeno*, que podrá facilitar el trabajo de evaluación para asignar la certificación de hidrógeno.

Imagen 16. Fases del desarrollo normativo sobre transición energética e hidrógeno en Colombia



Fuente: elaboración propia

2. Tensiones en la transición y los hidrógenos

En Colombia, es reciente la implementación de proyectos significativos en materia de hidrógeno; en particular, el producido sobre la base de fuentes renovables. Pero, América Latina tiene experiencias del pasado de promesas de desarrollo basadas en extractivismo y otros escenarios productivos. Por esta razón, en el escenario de la transición energética, es preciso preguntarse cómo se implementarán los proyectos de fuentes alternativas. Para responder esta pregunta, es necesario saber a qué tecnologías se dará prioridad, cuáles hidrógenos serán implementados y en qué momentos y qué tan claras están las dificultades de implementación de esta tecnología.

El Minenergía se propuso en la hoja de ruta del hidrógeno "promover su producción competitiva aprovechando los diversos y abundantes recursos naturales del país, tanto para el caso del hidrógeno azul, como el del hidrógeno verde" (Minenergía. 2021, p. 12). Señaló, también, lo clave que es implementar "mecanismos que creen señales de mercado para incentivar al hidrógeno azul frente al gris, es decir, [que] son necesarios precios moderados u altos del CO_2" (Minenergía. 2021. Pág. 13). Este último señalamiento lo hizo teniendo en cuenta la ventaja comparativa del hidrógeno azul en relación con el gris, en cuanto al costo asociado a la captura de CO_2 (el primero se mantiene constante hacia 2030, mientras que el segundo va aumentado).

El planteamiento central de la descarbonización de la economía como un enfoque progresivo (de transición) tiene tres obstáculos relevantes:

- La producción de hidrógeno verde se deja para hacerse en el mediano o largo plazo. Queda subordinada a un prerrequisito: el tránsito del hidrógeno gris al azul, hasta que estos sean plenamente competitivos (a 30 años), de manera que la mayor parte de la financiación se concentrará en tecnología y en producción de dichos hidrógenos.
- Es imposible entender la transformación de la matriz energética en una perspectiva que ponga en cuestión la relación entre consumo y producción de energía y el acceso de la población a la energía en términos de equidad. Esa imposibilidad obedece a que la competitividad se asocia a la relación entre costos fiscales (por descarbonización) y rendimientos en el mercado asociados a costos de producción.
- No se incluyen en los costos del proceso de transición los posibles impactos, económicos, sociales y ambientales de las comunidades que viven en los territorios donde se obtienen las materias primas o se desarrollarán y desarrollan los proyectos de hidrógeno (gris, azul y verde).

El tercer obstáculo debe abordarse con mayor precisión: aunque es una tendencia global, la falta de una discusión en el caso colombiano sobre los asuntos ambientales y de derechos humanos ha sido dominante en los enfoques sobre la descarbonización y sobre la implementación del hidrógeno como motor de dicha transformación. Kitner y Ullman (2022, p. 2) señalan que en Colombia es evidente que el carbón es la materia prima principal en el corto y mediano plazo en la producción de hidrógeno, lo que hace fundamental apostar, en contraste, por el hidrógeno verde.

Las autoras mencionadas presentan un enfoque de evaluación basado el método de *Life Cycle Assessment* (LCA)[5], con el que hacen un análisis comparativo de impactos ambientales de seis métodos de producción de hidrógeno líquido (HL_2) en La Guajira:

> *(...) (1) gasificación de carbón con CCS, (2) gasificación de carbón sin CCS, (3) electrólisis, en la que se utiliza la electricidad producida por una planta de carbón térmico, (4) electrólisis, en la que se utiliza la electricidad alimentada por turbinas eólicas en la región de La Guajira y se genera con un electrolizador y una planta de licuefacción in situ, (5) electrólisis, a partir de la electricidad producida en la región de La Guajira y que se consigue mediante un electrolizador y una planta de licuefacción fuera del sitio, por aerogeneradores y (6) electrólisis, a partir de la electricidad de la red eléctrica nacional de Colombia (Sistema Interconectado Nacional, SIN), con la supuesta finalización de la presa hidroeléctrica de HidroItuango* (Kitner & Ullman. 2022. pp. 3-4; traducción propia).

Ilustran las posibles tensiones a futuro que puede implicar una transición sin el enfoque de justicia y con una mirada fragmentada de los impactos; esto último significa no interrelacionarlos a la cadena de valor y suministros. Es probable que conflictos socioambientales que se presentan en la actualidad en el escenario de la energía eólica, el gas y el carbón se transfieran a la producción de hidrógeno, si se tiene en cuenta que es grande la capacidad instalada en materia de energía eólica, así como de yacimientos de gas y carbón y que, como lo ha señalado Minenergía, la dependencia de la producción de hidrógenos para el sector industrial continuará ligada a fuentes de alta generación de emisiones de CO_2. Aún más, esos conflictos pueden agravarse, pues estarían ocultos bajo la idea de una producción verde como sinónimo de sostenible. Al respecto, Kitner & Ullman sugieren lo siguiente:

> *(…) si esta producción procede de fuentes de carbón, es probable que se produzcan otros impactos que no se señalan directamente en la Hoja de Ruta del Hidrógeno, como el aumento de las emisiones de contaminantes atmosféricos y metales traza. Estos impactos se producirían probablemente junto con mayores niveles de bloqueo de carbono, resultantes de las inversiones en infraestructuras basadas en combustibles fósiles que podrían perpetuar el uso de estos combustibles en el país mucho después de*

5. Evaluación del ciclo de vida.

> *que los avances tecnológicos apoyen la adopción a gran escala y rentable de tecnologías renovables. Tal posibilidad es especialmente destacable si se tiene en cuenta que el consumo de hidrógeno basado en el carbón provocaría, probablemente, mayores niveles de consumo de este hidrocarburo, dado que en su mayor parte, en Colombia, se exporta actualmente a otros países y, por tanto, no se consume in situ. Los futuros desarrollos de las estrategias de hidrógeno y los planes para ayudar a las comunidades mediante una transición justa deberían, por tanto, considerar estas mayores implicaciones holísticas de cualquier estrategia de producción de hidrógeno que se adopte en el futuro* (Kitner & Ullman, 2022, p. 11; traducción propia).

Por otra parte, Colombia ha anunciado la puesta en marcha de dos proyectos piloto de hidrógeno verde, ambos, en la ciudad de Cartagena e integrados a la capacidad instalada de gas y de refinación de hidrocarburos. Las dos empresas que lideran esas labores en este momento son Ecopetrol y Promigás.

En el caso de Ecopetrol, se cuenta con un eletrohidrolizador de 50 kilovatios que está alimentado por 270 paneles solares ubicados en la Refinería de Cartagena (Reficar) (Ecopetrol. 2022). Por su parte, Promigás comenzó un proyecto "piloto de producción de hidrógeno verde e inyección en redes de gas natural en Colombia" (Naturgás, 2022). Espera producir anualmente 1.574 kilogramos hidrógeno verde, que se mezclarán con la red doméstica de gas de la ciudad, lo que reducirá seis toneladas de emisiones de CO_2 cada año.

Como lo estableció la Ley 2099 de 2021, el Fenoge anunció, en su campaña *#MasHidrógenoColombia,* la selección de diez proyectos presentados por nueve empresas e instituciones académicas. Estos se concentran "en la zona centro del país, en un 42,11 %; en el Caribe, en un 28,07 %; en el Eje Cafetero, en un 10,53 % y en el resto del país, en un 19,29 %" (Fenoge, 2022). Las expectativas son altas, pero, como se señaló, para la región Caribe, mientras no se tenga en cuenta una mirada amplia que reconozca factores de riesgos e impactos, estos proyectos se enfrentarán a desafíos de continuidad y de sostenibilidad.

Tabla 4. Empresas, casa matriz y sector de las empresas seleccionadas por el Fenoge para desarrollar proyectos de hidrógeno.

Empresa	Casa matriz	Sector
Vatia	Colombia	Energías
Busscar	Colombia	Transporte
Energal BioGas	Colombia	Gas, energía solar
Solenium	Colombia	Energía solar
H2NOSTRUM	España	Hidrógeno y amónica verde
H2 Andes	Colombia	Gas
TE H2	Colombia	Tecnología y comunicaciones
Sociedad De Gestión Grupo TW Solar Colombia	Colombia	Energía solar
Universidad de Antioquia	Colombia	Educación e Investigación

Fuente: Elaboración propia

4.1. Territorios de la transición

La hoja de ruta del hidrógeno y la estrategia energética 2020-2050 ponen a El Caribe colombiano como territorio principal para la transición; de manera particular, inscriben a La Guajira como zona de desarrollo del hidrógeno verde (aunque tenga un alto estrés hídrico, factor que, sin embargo, no mencionan en sus análisis. Véase imagen 17).

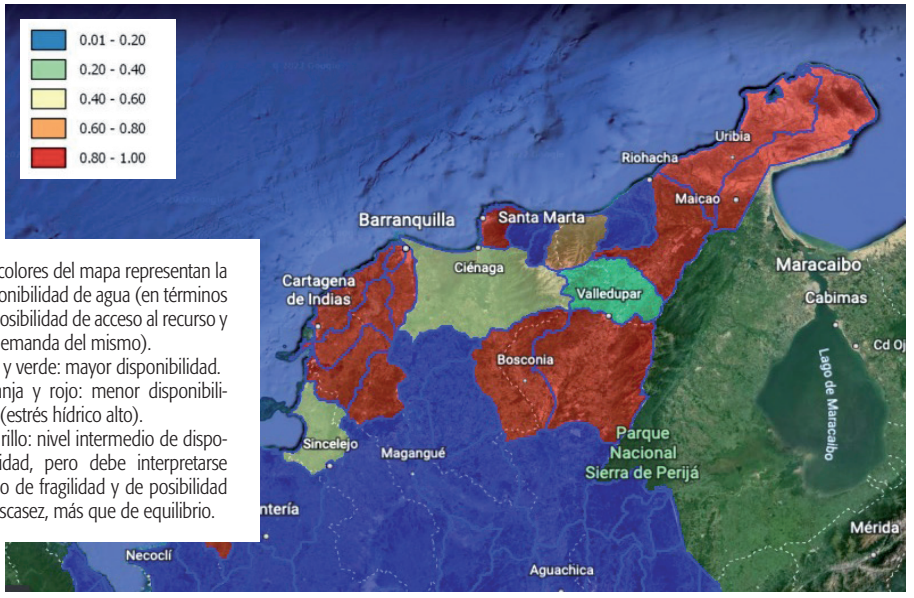
Esas decisiones estratégicas obedecen, en gran medida, a que en esa zona del país confluyen tres factores que parecieran darle ventajas comparativas:

- La capacidad instalada (Reficar) hace que no se tenga que comenzar desde cero Este hecho favoreció la selección de los dos primeros proyectos pilotos de hidrógeno verde en Colombia.
- El segundo factor tiene que ver con la disposición de materias primas. El Caribe es el territorio donde se han desarrollado los principales proyectos de energías renovables: eólicas, en la Guajira y solares, en Cesar. Adicionalmente, existen importantes yacimientos de carbón (en la perspectiva del hidrógeno azul) e, incluso, se han

encontrado dos grandes yacimientos de gas *offshore* (Uchuva-1 y Gorgon-2).

- La zona tiene infraestructura portuaria y de carga de hidrocarburos, lo que permitiría, en la perspectiva de 2030, tener la capacidad de carga para el transporte de hidrógeno.

Imagen 17. Mapa de estrés hídrico de El Caribe colombiano.



Los colores del mapa representan la disponibilidad de agua (en términos de posibilidad de acceso al recurso y de demanda del mismo).
Azul y verde: mayor disponibilidad.
Naranja y rojo: menor disponibilidad (estrés hídrico alto).
Amarillo: nivel intermedio de disponibilidad, pero debe interpretarse como de fragilidad y de posibilidad de escasez, más que de equilibrio.

Fuente: Google Maps (2022)

Sin embargo, los factores descritos implican desafíos para el desarrollo de los hidrógenos, pues, como se mencionó, la región tiene un alto estrés hídrico y esa condición no se aborda debidamente en ninguno de los instrumentos que promueven el hidrógeno en Colombia (Kitner & Ullman, 2022).

En 2008, Domínguez, Rivera, Vanegas & Moreno establecieron que, por diversas circunstancias, entre ellas, la mala utilización del suelo y la organización caótica de sectores productivos, Colombia tiende a tener problemas de escasez de agua hacia 2030, a pesar de su riqueza hídrica. Y esa tendencia se mantiene: "la demanda de agua supera [en 2030] el 50% de la oferta" (Domínguez *et al*., 2008, p. 208). Dicha perspectiva se acentúa en zonas el Caribe, donde confluyen sectores productivos que tienen al agua como un recurso que estaría en disputa, no solo entre ellos, sino con el recurso hídrico de uso doméstico.

Surge, entonces, la pregunta de si con la promoción de una fuente de energía no convencional y renovable se puede hablar de transición justa cuando esta pareciera necesitar de una zona de sacrificio para darse.

4.2. De Río Negro a la Guajira: ¿otra zona de sacrificio?

Durante los años ochenta, avanzaron los modelos extractivos en asocio con el auge del neoliberalismo en América Latina. Uno de los enfoques dominantes en esa tendencia fue la reprimarización de las economías de la región, lo que implicó la hiperespecialización de varias economías, enfocadas, en su mayoría, en la extracción de materias primas. Así, por ejemplo, Chile se inclinó por la producción exclusiva de cobre, Colombia y Venezuela por la minería y el petróleo y Argentina, por la soja y gas. En consecuencia, surgieron múltiples reflexiones sobre los impactos y alcances de esa propuesta de desarrollo: intentaron llamar la atención sobre la dependencia económica que esta estrategia económica genera frente a economías más diversificadas, sobre el debilitamiento del sector agrario, la poca generación de empleo y la baja inversión en el sector de ciencia y conocimiento no asociado al sector extractivo dominante.

Un correlato de la hiperespecialización fue que los Estados adoptaron la estrategia de utilizar el discurso de la utilidad pública, el interés general y el monopolio estatal sobre el subsuelo para imponer la obligación de sacrificio por el bien común. Sería el sacrificio de las comunidades que habitan los territorios donde se encuentran las principales reservas de las materias primas a explotar. Argumentaron la necesidad de "establecer el 'mal menor' como principio regulador, [priorizar] la producción económica y [realizar] sacrificios para ello" (Vallejo, 2012, p. 7).

Lerner, entre otros autores, conceptualizó las zonas de sacrificio. Las identificó como aquellas que "se han ampliado para incluir 'comunidades o puntos calientes de contaminación química en las que los residentes viven inmediatamente adyacentes a industrias o bases militares muy contaminadas' " (Lerner, citado por Robbins & Zografos, 2020, p. 543).

Sin embargo, las zonas de sacrificio no se restringen a las que padecen el extractivismo tradicional. De hecho, Robbins & Zografos (2020) extendieron el concepto a aquellas que se verán afectadas por proyectos que buscan la descarbonización de la economía y que se denominarán como "green sacrifice zones". Su enfoque permite abordar importantes preguntas sobre una carga desigual de las transacciones en cuanto a sus costos ambientales, sociales y económicos.

Los autores mencionados dan cuenta de dos criterios centrales que permiten identificar las zonas de sacrificio verde:

- *Cost Shifts* (cambio de costos): este criterio se refiere al desplazamiento de las externalidades negativas como forma de maximización de los beneficios, las cuales no podrían corregirse, pues, su transferencia no es unidireccional sino sistémica. Un buen ejemplo es el aumento en la fabricación de automóviles eléctricos, lo que trasladó los costos ambientales y sociales a los territorios donde hay reservas de litio, cobre y cobalto. Para entender estos costos, es fundamental incorporar enfoques de diligencia debida y respeto de derechos humanos en la cadena de valor y suministros.
- *Coloniality* (colonialidad): este criterio está asociado a la forma como se justifican los proyectos de energías renovables. Puede distinguirse por el hecho de que se recurre a ideas como la "salvación gracias a la ciencia" (cientifismo), o a la presunción de que las comunidades afectadas (por lo general, indígenas afrodescendientes y campesinas) deben someterse sin cuestionamientos, pues no comprenden el conocimiento y se "han quedado atrás" del saber occidental.

Los criterios señalados nos hablan de territorios y comunidades que pueden ser sacrificadas en tanto prescindibles. Empero, existe un tercer elemento que domina el discurso de las zonas verdes de sacrificio: *la temporalidad*. Mientras en el modelo clásico las comunidades de los territorios sacrificados deben o aceptar su destino o resistirse al modelo de desarrollo, en el modelo "verde" existe la promesa engañosa del "sacrificio temporal". Como forma de evitar resistencias y oposiciones locales, se promete a las comunidades sacrificadas que, al final, obtendrán un modelo de vida digna que compensará lo perdido. Las suyas son no solo zonas verdes, sino, temporalmente, sacrificables.

En el último capítulo se ampliarán esta idea y las implicaciones reales del supuesto carácter temporal. Por ahora, veamos lo ocurrido en dos territorios donde la promesa de una economía descarbonizada ha traído graves consecuencias para el ambiente y las comunidades.

Retomemos Argentina, primer país que legisló sobre los usos del hidrógeno como estrategia para descarbonizar su economía. Y no podemos dejar de lado la experiencia de las comunidades de Vaca muerta.

Como señalan Salgado y Scandizzo (2021, p. 16), luego del anuncio del gobierno argentino de querer promover el hidrógeno en el país, pasaron siete años para que se creara Y-Tec, "empresa cuasi-estatal de investigación y desarrollo en el sector energético, conformada por [Yacimientos Petrolíferos Fiscales] YPF (51 %) y el [Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas] Conicet (49 %)". Sin embargo, el sector de producción de hidrógeno siguió sin mayores cambios,

hasta que en 2020 se creó el consorcio H2ar[6], compuesto por más de 50 empresas, incluidas las alemanas Siemens Energy y, recientemente, Wintershall Dea.

Dicho esto, el tema en Argentina siempre ha generado expectativas y preguntas. Una de ellas, que la indeterminación sobre el tipo de hidrógeno a promover ha conducido a que el verde haya estado, siempre, relegado. La indeterminación normativa responde a dos escenarios de producción:

El primer escenario consiste en que tanto el Plan Nacional de Hidrógeno, como la más reciente propuesta de reforma a la Ley de 2006 (Proyecto 1769-D-2019[7]) hablan de producir hidrógeno con fines de exportación, en su mayoría; eso deja preguntas abiertas sobre la capacidad de almacenamiento de CO_2; aun, acerca del transporte seguro del hidrógeno.

Además, mientras Argentina se concentra en exenciones tributarias, Alemania y su programa H2Global se propone generar un paquete de subsidios para las empresas que comprarán el hidrógeno y lo venderán más barato. Incluso, ha creado la Hydrogen Intermediary Network Company, intermediaria encargada de mover el mercado del hidrógeno verde y posicionar a Alemania en el mercado global. Este enfoque privilegiará a las compañías alemanas tanto en el territorio de su casa matriz, como en Argentina, lo que provocará que las empresas que operan en el país suramericano terminen inclinándose por hidrógenos más rentables como el gris o el azul.

El segundo escenario es la dependencia del país en torno a la extracción de petróleo y gas; aun, mediante métodos no convencionales como el *fracking* y la exploración y explotación *offshore*. Nos dicen Salgado y Scandizzo (2021) que en los análisis de impacto nunca se incluye lo que ocurrirá y quiénes se verán afectados por el uso del agua; o cómo afectará la producción de hidrógeno, en particular, el verde, la capacidad eléctrica del país. Este desplazamiento de costos puede incrementar conflictos socioambientales como los de la provincia de Rio Negro, o puede expandir sectores muy cuestionados, como el del gas. Los autores plantean que, de hecho, al tener el país una amplia infraestructura asociada al gas, es probable que, en un corto y mediano plazo, el hidrógeno verde esté subordinado al hidrógeno gris y la posibilidad de implementar o no, tecnologías de captura de carbono (Salgado & Scandizzo, 2021).

En Colombia, la Costa Caribe, en particular, la Guajira, se han presentado como territorios para el desarrollo de proyectos de hidrógeno gris, azul y verde. La Guajira debe analizarse de manera detenida, pues comparte algunas características con la provincia argentina de Rio Negro. El caso argentino ilustra la manera en

6. Consultar en https://y-tec.com.ar/consorcio-h2ar/

7. Consultar en https://www.hcdn.gob.ar/proyectos/proyecto.jsp?exp=1769-D-2019

que, a pesar del impulso inicial que tuvo la generación de hidrógeno verde, la inercia desatada por sectores mejor posicionados como el del gas o el del carbón puede hacer que se abandonen estas iniciativas por aquellas más rentables.

Lo anterior, no parece un caso exclusivo de la Argentina. Es más bien un denominador común, si retomamos la idea del economista y político Alberto Acosta Espinosa, expresada en su libro *La maldición de la abundancia*. Este autor expresa el hecho de que, donde hay mayor riqueza, la desigualdad es más significativa. González y Barney (2019) se refieren al impulso extractivo en la Guajira, donde se tienen "los mejores vientos, la mayor radiación, grandes reservas de carbón, petróleo y gas" (p. 38).

Tal realidad de este departamento del norte de Colombia contrasta con el discurso general según el cual ese lugar es un desierto, que podría renacer gracias al impulso del sector energético. La Guajira no es un desierto, sino un bosque seco tropical y es el territorio del pueblo indígena Wayuu, que ha construido su cultura como "gente libre", en gran medida, por el relacionamiento con una región árida (González & Barney, 2019).

En la Guajira, los persistentes conflictos socioambientales son producto de la explotación carbonífera y, los más recientes, están asociados a las energías eólicas. González y Barney (2019) mapearon 65 escenarios posibles de tensiones que podrían afectar al territorio y a los derechos del pueblo Wayuu, vinculadas con el desarrollo de proyectos eólicos y solares.

Incluso, el autor y la autora identificaron que a las tensiones provocadas por la explotación del carbón y de las energías eólicas y solares se suman la exploración *offshore* de gas y petróleo; además, en forma más reciente, las concesiones *offshore* de proyectos con el viento afectarían las formas de vida tradicionales de los pescadores wayuu que habitan el litoral (*apalaanchi*).

González y Barney (2019) señalan que no se ve tan posible conseguir que los enfoques de la política nacional en materia de sostenibilidad y participación incluyan de una manera real y efectiva los beneficios para el pueblo Wayúu, a la vez que mitiguen y reduzcan los impactos para ese pueblo. Lo indican, pues encuentran que persiste lo siguiente:

> *El divorcio entre las políticas de desarrollo verde y las políticas de energías renovables sigue presente en documentos tan importantes como el documento Conpes 3944 de 2018 para La Guajira, aprobado el 4 de agosto de 2018, que no incluye ninguna referencia a los proyectos de inversión eólica ya en marcha, ni a sus implicaciones en empleo, ingresos, encadenamientos tecnológicos, educación o impactos ambientales, étnicos y culturales* (González y Barney, 2019, p.173).

Actualmente, la consulta previa, libre e informada no se ha respetado, ni tampoco los derechos territoriales, a la salud y otros. De hecho, González & Barney (2019) identificaron más de 240 comunidades afectadas por proyectos eólicos y solares, con impactos en la salud (pérdida de la vista), lesiones, asesinatos asociados a la oposición de personas que lideran las demandas de las comunidades y más eventos. En este punto, debe recordarse que en Colombia existen varios intentos por reglamentar la consulta previa en la dirección de reducirla a un simple procedimiento.

Los casos argentino y colombiano muestran varios factores recurrentes que permiten hablar de zonas verdes de sacrificio:

- El sector dominante en la producción de hidrógeno será el hidrocarburífero. Allí se concentrarán los esfuerzos de corto y mediano plazo para conseguir hidrógeno gris y azul, de manera que se deja para después la posibilidad de implementar proyectos de hidrógeno verde, sobre la base del principio de esperar a que la tecnología avance, pero manteniendo la producción tradicional. Es decir, los proyectos de hidrógeno, incluido el verde, seguirán atados al modelo extractivo.
- Los escenarios de producción de corto y mediano plazo plantean una producción de hidrógeno para la exportación. Eso sugiere, a partir de un criterio de diversificar para garantizar soberanía energética[8], muchas dudas sobre la relación costo-beneficio entre producir hidrógeno con o sin capacidad de absorción de CO_2 y la posibilidad de integrarlo a la matriz energética de los países del sur global.
- La percepción sobre los territorios se formula a partir de un triple discurso. Primero, ellos se definen como estratégicos por su potencial para la producción. Luego, se entiende que deben beneficiarse con nuevas propuestas de desarrollo. Por último, se señala que en dichos territorios los costos serán menores, porque sus recursos ecosistémicos son poco diversos y en ellos ya se ha consolidado una capacidad de adaptación a procesos productivos de gran escala.

8. Soberanía energética, entendida como seguridad en el suministro y acceso universal como derecho, a la vez que se reducen impactos ambientales.

Cuarto capítulo.
Reflexiones finales

1. Preguntas de justicia y democracia ambiental

A inicios del siglo XIX, el mundo occidental se sumergía en el dogma racionalista y explicaba su existencia y relación con la naturaleza desde un enfoque reduccionista y científico-centrista. A la par que se consolidaba esta forma de conocer el mundo, las relaciones entre naturaleza y cultura se entendían desde la ilusión del progreso como sinónimo de acumulación y la posibilidad del pleno dominio del ser humano sobre su entorno natural.

En aquella época, pocas voces discrepaban de esta visión, en donde se ponía al progreso científico y económico, como evidencia incuestionable de superioridad cultural, moral y, para algunos, biológica. Una de esas voces fue la de Alexander Von Humboldt, quien, a pesar de su gran renombre mundial y de ser un inspirador de teorías posteriores como la de la evolución de Charles Darwin, no logró que lo escuchado del todo. El científico alemán, tal como señala Andrea Wulf (2017), propuso en un enfoque complejo para su época. Con el *Naturgemälde* (entramado de vida o pintura de la naturaleza) que incluyó en su famoso *Essai sur la g*éographie *des plantes; accompagné d'un tableau physique des régions* équinoxiales de 1807, Humboldt se adelantó a su época planteando una mirada de la naturaleza como totalidad, afirmando que el ser humano no podía entenderse ni desconectado de su entorno y que este último estaba articulado de manera inescindible a una totalidad global.

Esta idea se fue perdiendo en el tiempo mientras crecía con mayor fuerza la de un ser humano dominador de la naturaleza y de una economía inagotable, a pesar de la escasez, gracias a la infalibilidad de la ciencia. Sin embargo, diferentes debates y hechos han cambiado esa tendencia e introducido nuevas perspectivas. De una parte, la propuesta decolonial y las miradas desde otros horizontes

culturales han traído una perspectiva más amplia de la relación naturaleza/cultura. Por otra, tal como lo evidencia Murcia (2020), otro factor para tener en cuenta es la conjunción entre instrumentos y mecanismos internacionales sobre derechos humanos y sobre ambiente y desarrollo, que es muy reciente. Entre esos instrumentos, resalta la autora mencionada la siguiente idea:

> *[A]unque el medio ambiente ha sido integrado de varias maneras en algunos instrumentos de derechos humanos, como el nivel de vida adecuado en la [Declaración Universal de los Derechos Humanos] DUDH (art. 25), el mejoramiento ambiental, como condición para garantizar el más alto nivel de salud física y mental de las personas (art. 12 Pidesc y art. 24 [Convención de los Derechos del Niño] CRC), el desarrollo progresivo de las normas económicas, sociales y sobre educación, ciencia y cultura de la [Convención Americana de Derechos Humanos] CADH (art. 26), el deber de salvaguarda del medio ambiente de los pueblos indígenas del Convenio 169 de la [Organización Internacional del Trabajo] OIT (art. 4) y el propio Protocolo adicional a la CADH conocido como Protocolo de San Salvador, que estableció el derecho a un medio ambiente sano (art. 11), lo cierto es que, ninguna de esas cláusulas ha podido desarrollarse jurisprudencialmente; es decir, su comportamiento no es el de un derecho vinculante* (Murcia, 2020, p. 7).

A pesar de la dificultad que señala, Murcia (2020) pone de presente que el punto de inflexión en donde se concatenan las preocupaciones sobre los derechos humanos de una parte y, de otra, el ambiente y el desarrollo, tiene que ver con la inclusión de la perspectiva de desastre como eje articulador, intrínsecamente ligado a la discusión y preocupaciones mundiales generadas por el reconocimiento y la cada vez mayor comprensión sobre el cambio climático.

Al respecto, la autora plantea al *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030* como un instrumento fundamental para entender como el enfoque del riesgo explica la relación inescindible entre responder al cambio climático y su correlación con la garantía de derechos humanos (incluido el ambiente), pues establece como criterios de comprensión del concepto riesgo a todos los fenómenos que, sin importar su escala, su frecuencia o su inminencia, pueden tener origen natural o humano y que representan "peligros" biológicos, tecnológicos o ambientales. Así, el riesgo se asocia a la peligrosidad de las actividades o fenómenos y esto implica que los actores que inciden en que acontezca un dominado riesgo, dependiendo su grado de influencia, tendrán una mayor o menor responsabilidad para prevenirlos, mitigarlos o repararlos.

Por lo tanto, el concepto de riesgo obliga a asumir que toda acción para garantizar derechos en el contexto del cambio climático, debe estar pensada desde el tiempo presente y como un ejercicio continuo, desde el cual toda acción decisional gubernamental e intergubernamental, no podrá estar políticamente aislada ni subordinada a la realización futura. El criterio del riesgo es clave para entender desde otra perspectiva escenarios de la relación entre la justicia ambiental y la democracia ambiental.

Por una parte, si lo que se busca con la justicia ambiental es lograr un diálogo coherente y garante de derechos entre la sustentabilidad ecológica y la justicia social (Riechmann, 2003), el primer desafío que ofrece la discusión climática es el de derrumbar el optimismo en la ciencia como forma de aplazamiento en el tiempo. Así, el principio de precaución, central para hablar de justicia ambiental, no estaría reducido a la postura de hacer o no hacer según la certitud de un posible impacto, en la fase inicial de la toma de decisiones de la gobernanza ambiental, sino que sería un instrumento de evaluación permanente. En este orden de ideas, la aprobación inicial de cualquier actividad productiva susceptible de tener impactos en el ambiente no quedaría justificada hacia el futuro, sino que estaría sometida a una permanente evaluación.

Por otra parte, el factor riesgo y la necesidad de revisión continua de las actividades humanas solo es posible si existe un diálogo continuo, honesto y crítico de cualquier asimetría de poder, puesto que el principio fundamental de realización de la democracia ambiental es el de la posibilidad materializada de una participación significativa de la sociedad en la toma de decisiones (Rodríguez Garavito, 2015). Esto implica que las personas y comunidades puedan tener acceso libre a información de calidad; puedan participar en la toma de decisiones; y puedan mantener el diálogo permanente con las instituciones estales para garantizar la exigibilidad de las leyes, así como la garantía efectiva de la reparación en caso de impactos. Pero, el principal obstáculo en este campo no sólo es el acceso a la información, sino al conocimiento, pero sobre todo a la construcción de espacios donde diferentes saberes y experiencias culturales humanas puedan construir las soluciones. El acceso al conocimiento no se reduce a obtener información, sino a participar en su construcción.

Finalmente, el riesgo permite integrar en el dialogo entre justicia y democracia ambientales a un actor al que se le asigna el mismo grado de responsabilidad que a cualquier individuo humano. El actor corporativo es fundamental pues en él se concentra un mayor grado de responsabilidad ya que este si participa de forma directa en la apropiación de recursos de la naturaleza y define la forma como esto se hace. Entender la conducta corporativa desde una

perspectiva del riesgo coadyuva a una mejor gobernanza pues implica entender que no se pueden tomar decisiones para mitigar el cambio climático, ni generar espacios de discusión con a la sociedad civil, mientras nuestro modelo de producción y consumo no tiene ningún cambio.

El hidrógeno azul permite entender este último aspecto. En a la discusión sobre los hidrógenos el motor de su desarrollo está dado por el criterio de tasa de rentabilidad, excluyendo incluso conceptos más relevantes como el de tasa de retorno (cu*á*nta energía se necesita para producir energía). Por esta razón, los esfuerzos de los últimos años han estado dirigido a consolidar tecnologías de captura de carbono, con el fin de mantener activa la industria de los hidrocarburos.

Sin embargo, como señala Howarth & Jacobosn (2021), capturar carbono implica que este será acumulado por décadas, solución aparentemente favorable para asumir al hidrógeno azul como alternativa viable en el presente, pero desconociendo que todo ese carbono será almacenado en algún lugar del planeta y como siempre, esto no ocurrirá en los lugares del mundo donde se favorezcan más de la producción energética, sino donde será producida: el sur global. Por esta razón, la discusión no puede ser aplazada en favor de la certitud futura, sino que tiene que ser un elemento rector de las decisiones frente al cambio climático, entendiendo que la justicia y la democracia ambientales son posibles, si asumen a los derechos humanos como eje articulador de la discusión y al factor riesgo, como una variable inescindible.

2. El lugar de la Diligencia Debida

Este concepto se ha desarrollado a partir de dos referentes. En primer lugar, refiere a la obligación que tienen los Estado de proteger y garantizar los derechos humanos; y en caso de ser vulnerados, la obligación de identificar a los responsables, sancionarles y de reparar a las víctimas. Por otra parte, Los principios Rectores Sobre Empresas y Derechos Humanos de 2011 llevan esta reflexión al seno de la responsabilidad de las empresas. Lo anterior, porque se reconoce que los actores empresariales pueden concentrar el poder e incluso tener más influencia que los Estados.

Así las cosas, se entiende que un actor económico influye en los territorios donde desarrolla sus actividades empresariales y por lo tanto puede llegar a violar derechos humanos. Para evitar esto, la diligencia debida exige a las empresas, tomar un conjunto de medidas agrupadas en cuatro etapas:

- *Identificar y evaluar:* Este ejercicio debe estar contenido en una política de derechos humanos, de manera clara e integrada al organigrama y a las funciones de toma de decisiones de la empresa, debe incluir análisis sobre el contexto del territorio donde desarrolla sus operaciones y un análisis sobre su cadena de valor y suministros
- *Integrar y aplicar los resultados de la evaluación:* Este aspecto plantea el desafío de mantener actualizada la política de debida diligencia y de que esta es una de las políticas que dirijan el funcionamiento corporativo
- *Seguir y supervisar la aplicación de medidas:* esta etapa plantea que la estructura corporativa debe incluir instancias que garanticen independencia imparcialidad
- *Comunicar e informar sobre las medidas:* esta comunicación de be estar fundamentada en la transparencia y en el dialogo con el Estado y las comunidades con las que se relaciona la empresa

Ahora bien, como se afirmó al inicio de este capítulo, el elemento central que vincula el cambio climático a la garantía de derechos humanos es el riesgo. Por ello, Baykara (2021) proponen un enfoque debido basada en el riesgo para que las empresas articulen un análisis preciso de identificación de impactos ambientales y de derechos humanos que pueda genera y que estén relacionados con el clima y, por otra parte, que puedan hacer coherentes sus estrategias de mitigación frente al cambio climático con un enfoque de transición justa.

Este enfoque de diligencia debida tal como señalan Baykara (2021) tiene tres pilares: Prevenir, mitigar remediar. Pero la noción de riesgo permite que estos tres se articulen y le den una importante relevancia a la fase de prevención, entendiendo que todo riesgo identificado en el pasado puede coadyuvar violaciones de derechos humanos en el presente. En conjunto este enfoca permite entender concepciones como la de acción sin daño, pues como dicen Baykara (2021):

> *Los riesgos de los impactos sobre los seres humanos que resultan de la mitigación del cambio climático están cubiertos por términos como transiciones justas, justicia climática y justicia energética. Los académicos y otros actores dentro de estos campos afirman que las prácticas de mitigación no deben plantear daños o riesgos desequilibrados, o dejar a los afectados sin poder participar plenamente en la toma de decisiones o en la planificación que impacta en sus comunidades* (Baykara, 2021, p.10, traducción propia).

Para entender el factor riesgo en la diligencia debida en el caso del hidrógeno, se proponen dos temas puntuales. En primer lugar, junto a la participación ciudadana y a la evaluación de impactos sobre el recurso hídrico, un tema que no es abordado de manera sistemática en las normatividades existentes sobre hidrógeno, tiene que ver con la forma como es identificado este elemento y el factor de riesgo real que representa su almacenamiento y transporte. Esto es señalado por el New Jersey Department of Health. (2016), institución que identificó que ha señalado dos aspectos a tener en cuenta sobre el tema: a) El hidrógeno figura en la *Right to Know Hazardous Substance List* (Lista de sustancias peligrosas del Derecho a Saber*)* ya que lo han citado los siguientes organismos: la Conferencia Estadounidense de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH), el Departamento del Transporte de los Estados Unid (DOT), el Departamento de Estado de los Estados Unido (DEP), la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (NFPA) y la Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA); y b) Esta sustancia química figura en la *Special Health Hazard Substance List* (Lista de sustancias extremadamente peligrosas para la salud). Esta información debería llamar la atención de las autoridades estatales, pues, se plantea como una solución mágica y libre de riesgos.

Para el segundo elemento a señalar, nos gustaría tomar como ejemplo a Colombia. Una revisión general de la conducta empresarial en materia de diligencia debida y respeto a los derechos humanos puede dar cuenta de las debilidades en la materia en la promoción de los hidrógenos. Lo anterior puesto que, como se ha afirmado en el capítulo anterior, se espera que el grueso del sector se enfoque en el hidrógeno gris, pero la discusión que tiene más cubrimiento mediático es la relacionada al hidrógeno verde. Entonces, es legítimo alertar que la transición energética no debería operar como forma de *greenwashing* y de *socialwashing*. La Cámara de Hidrógeno identifica la cadena de valor del hidrógeno gris en Colombia, con base en 36 empresas como las principales interesadas en el sector, veamos que se dice sobre la conducta responsable en materia ambiental y de derechos humanos de algunas de ellas:

Empresa	Sector	Casa matriz
Aes Colombia (Parte de AES)	Energía	Estados Unidos

Esta empresa opera en varios países del mundo y en América tiene operaciones en Colombia, Ecuador, Chile, Argentina, Panamá, Canadá y los Estados Unidos. En 2021 que la sucursal de Aes en Chile (AES Andes S.A) fue denunciada por utilizar los servicios de una consultora para vigila de manera ilegal e

infiltrar las comunicaciones de activistas ambientales que se oponían al proyecto hidroeléctrico Alto Maipo. En el caso de Colombia, en el año 2020, grupos paramilitares han amenazado a un miembro del pueblo Wayuu que se opone a dos proyectos de energías eólicas (Casa Eléctrica y Apotolorru). Además, se ha denunciado el incumplimiento de la consulta previa y la falta de información por parte de la empresa en detrimento de los derechos del pueblo Wayúu[9].

Empresa	Sector	Casa matriz
Cenit (Parte de Ecopetrol)	Petróleo, gas y carbón	Colombia

En 2021, tienen lugar varias protestas en el municipio de Bolívar (Santander) por el incumplimiento reiterado de compromisos laborales adquiridos por la empresa con la comunidad. En las protestas, murió el joven Michelsen Vargas y se registraron tres arrestos y varios casos de jóvenes heridos[10].

Empresa	Sector	Casa matriz
Drummond	Petróleo, gas y carbón	Estados Unidos

Esta empresa opera en diferentes países del mundo, desarrollando el grueso de sus operaciones en Colombia, Perú, Ecuador, Brasil, Argentina y Estados Unidos. Las principales acusaciones que existen contra esta empresa están asociadas a temas laborales (Libertad de asociación), ambientales, asesinatos y complicidad con actores ilegales (paramilitares). Esta empresa registra más de 11 ataques contra personas defensoras de derechos humanos. Sobre esta empresa existen dos casos judiciales de relevancia. En primer lugar, el juicio contra Jaime Blanco Maya, excontratista de la empresa, quien con el apoyo del Bloque Norte de las Autodefensas Unidas de Colombia (AUC) participó como autor intelectual de los asesinatos de Víctor Orcasita y Valmore Lorcano, sindicalistas de Sintraminergética. El segundo caso tiene que ver con a la vinculación de José Miguel Linares (presidente de la empresa en Colombia en 2020) y Augusto Jiménez (expresidente) como presuntos financiadores y promotores de la creación de las Autodefensas Unidas de Colombia entre 1996 y 2001[11].

9. Para conocer este perfil de caso de manera más detallada, sugerimos consultar el siguiente enlace: https://www.business-humanrights.org/es/empresas/aes/#associated_responses
10. Para conocer este perfil de caso de forma más detallada, sugerimos consultar el siguiente enlace: https://www.business-humanrights.org/es/empresas/cenit-transporte-parte-de-ecopetrol/
11. Para conocer este perfil de caso de forma más detallada, sugerimos consultar el siguiente enlace: https://www.business-humanrights.org/es/empresas/drummond/

Empresa	Sector	Casa matriz
EPM	Energía	Colombia

Esta empresa pública colombiana ha sido señalada por diferentes organizaciones sociales del país por diferentes casos, vinculados a la violación de derechos como el de consulta previa libre e informada, derecho a la vida, al territorio y el acceso al agua. Dos casos permiten evaluar la conducta empresarial responsable de EPM. En primer lugar, su participación en proyectos de energías eólicas y su desconocimiento de la consulta previa, en particular en el caso del parque de Jepírachi, donde se incluyeron cláusulas de exclusividad para el uso de la tierra en la zona en favor de la empresa. Por otra parte, en 2018 se han señalado varios asesinatos contra activistas que se oponía al proyecto Hidroituango. Adicionalmente, este caso puso de presente que, para la construcción de la represa, se inundaron zonas donde presuntamente se encontraban fosas comunes de la violencia paramilitar en la región, que se destruyeron por cuenta de la inundación provocada[12].

Empresa	Sector	Casa matriz
Celsia (Parte del Grupo Argos)	Energía eólica, Energía renovable	Colombia

Esta empresa se mencionó en el informe *El viento del este llega con revoluciones*, producido por el Instituto para el Desarrollo y la Paz (Indepaz) en 2019. La principal preocupación radicaba, en su momento, en la posibilidad de abandono de proyectos eólicos por parte de la empresa, por cuenta de la posible desinversión del Grupo Argos en el sector, lo que podría traducirse en incumplimientos a los compromisos de remediación y prevención de impactos ambientales y de derechos humanos. Sin embargo, la empresa se ha venido consolidando en el sector. Por último, debe señalarse que Celsia, antes de adquirirla el Grupo Argos, se llamaba Begonia Power, empresa que tras una convención con la empresa austriaca Renovatio tenía a cargo el trámite de cuatro parques eólicos[13].

12. Para conocer este perfil de caso de forma más detallada, sugerimos consultar el siguiente enlace: https://www.business-humanrights.org/es/empresas/epm-empresas-p%C3%BAblicas-de-medell%C3%ADn/
13. Para conocer este perfil de caso de forma más detallada, sugerimos consultar el siguiente enlace: https://www.business-humanrights.org/es/empresas/celsia-part-or-grupo-argos/

Empresa	Sector	Casa matriz
Tebsa	Energía	Colombia

Esta empresa gestiona un generador térmico a base de gas del país que, según la propia empresa, representa 12% de la demanda de energía del país. En un estudio del año 2007, se identificó a la planta térmica de Tebsa como la principal emisora de óxidos de azufre, de material particulado, de óxidos de nitrógeno y al mismo tiempo la principal consumidora de gas (López & Sánchez. 2007). Estos datos plantean como necesidad, la implementación de modelos más eficientes y con menor impacto ambiental.

Empresa	Sector	Casa matriz
Vanti	Petróleo, gas y carbón	Colombia

En 2018, el grupo Brookfield adquiere la empresa Gas Natural-Unión Fenosa. Por esta razón, la empresa Vanti adquiere un pasivo en derechos humanos que se debe señalar. En el caso mexicano, esta empresa ha sido señalada de favorecerse de hostigamientos y amenazas contra opositores a sus proyectos eólicos en Oaxaca, lo que implicó un entorpecimiento de los procesos de consulta previa en esa región del país[14].

Empresa	Sector	Casa matriz
Ecopetrol	Petróleo, gas y carbón	Colombia

Ecopetrol es una empresa de capital mixto pero que en su mayoría está bajo control estatal. Se relacionan 17 casos de hostigamientos y abusos de derechos contra personas defensoras de derechos humanos en los que la empresa podría haber participado o se habría beneficiado. También se le relaciona con malas prácticas en materia ambiental, violaciones de derechos laborales, aprovechamiento del conflicto armado y vínculos con grupos armados estatales para obtener protección en detrimento de personas de las comunidades con las que sostienen conflictos[15].

Otras empresas que hacen parte de la cadena de valor y suministros del hidrógeno gris son: Gulf, Air Liquid, Linde, Air Products, Enel, Terpel, Gas del Oriente, MetroGás, Promigás, ProGaSur, Techint, Gases de Occidente, Promioriente,

14. Para conocer este perfil de caso de forma más detallada, sugerimos consultar el siguiente enlace: https://www.business-humanrights.org/es/empresas/gas-natural/

15. Para conocer este perfil de caso de forma más detallada, sugerimos consultar el siguiente enlace: https://www.business-humanrights.org/es/empresas/ecopetrol/

Haceb, Alcanos, Surtigás, Hino, Basf, Transmetano, TGI, Monómeros, Fanalca, Alfa, Corona, CMS, Refinería de Cartagena y Siemens Energy.

En conclusión, teniendo en cuenta que los escenarios globales ponen al hidrógeno gris y azul, como los vectores energéticos de mayor interés en el corto plazo, la observancia de la conducta empresarial responsables debería ser un requisito *sine quo non* para poder participar de beneficios tributarios, exenciones y subsidios. De lo contrario, estas empresas podrían extender la conflictividad socioambiental a los escenarios de las energías no convencionales renovables e incluso perpetuar contexto de vulneraciones y abusos a los derechosos humanos, lo que tendrían graves consecuencia en múltiples comunidades y deslegitimaría la necesidad de buscar fuentes alternativas de energía.

3. Los posibles impactos sobre los derechos humanos

La antigua dicotomía entre derechos humanos y ambiente es un tema que ha perdido toda pertinencia y coherencia con el estado actual de la cuestión. Para la Relatoría Especial de Derechos Económicos, Sociales, Culturales y Ambientales (Redesca) de la Comisión Interamericana de Derechos Humanos (CIDH), le marco normativo del Sistema Interamericano da cuenta de la existencia de un:

> *estrecho vínculo entre la subsistencia del ser humano y la preservación de un medio ambiente sano, y advierte que la degradación del medio ambiente puede afectar negativamente el acceso al agua y el disfrute de varios derechos humanos como los derechos a la vida, a la salud, al desarrollo o a la libre determinación.* (Redesca, 2020, p. 121)

De hecho, con ocasión del huracán Dorian y los impactos sufridos por el pueblo de Bahamas, en 2019 la CIDH y su Redesca manifestó que la correlación entre el aumento en la frecuencia de desastres naturales y el cambio climático y como este hecho *"amenazan el ejercicio de varios derechos humanos, incluyendo la generación del desplazamiento forzado de personas y el aumento de la desigualdad y la pobreza*" (CIDH, 2019).

En ese orden de ideas, los Estados y los actores de poder deben propender por desarrollar e implementar mecanismo y soluciones que hagan frente a la crisis climática. Empero, esto no debe entenderse como una *carta blanca*

para implementar cualquier solución aparentemente favorable para reducir los impactos del cambio climático, sin asumir un enfoque de diligencia debida en materia de derechos humanos, tal como se señaló en el acápite anterior.

Un enfoque de derechos humanos es necesario porque el cambio climático es un fenómeno que opera como amplificador de impactos en los derechos. Pero ¿Cómo puede afectar una solución frente al cambio climático los derechos humanos? La respuesta es simple. Ninguna política pública, tecnología, sector productivo o empresa se encuentran desconectados del conjunto de la sociedad.

Si pensamos en la producción de hidrógeno azul o gris, como camino parcial de descarbonización de la economía, el siguiente paso es identificar de donde salen las materias primas, donde se produce el hidrógeno y que actores participan en el proceso. Para estos casos, identificar los impactos de sectores como el carbonífero o gasífero es relativamente sencillo, pues estos sectores son conocidos ampliamente por sus altos impactos socioambientales, a tal punto que la obtención de licencias para extraer dichos recursos está ampliamente reglada por los Estados.

Y, si hacemos referencia al hidrógeno verde, ¿cómo podría tener estos impactos negativos en los derechos humanos si su producción se fundamenta en principios como el de sostenibilidad? De hecho, existe un aparente consenso amplio según el cual, el único camino para descarbonizar la economía, este trazado por el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de fuentes de energía renovables. Es precisamente esa presunción de sustentabilidad, la que debe invitar a la sociedad civil, la academia, las empresas y los estados a observar los presuntos impactos en los derechos humanos en contextos de actividades empresariales del sector de renovables.

De hecho, desde un enfoque economicista, el hidrógeno verde como vector energético sigue presentando desafíos de costos, los cuales no lograran equipararse a los del hidrógeno azul o gris hasta el 2030. Por lo tanto, seguirán preexistiendo impactos asociados a viejos extractivismos y se generarán nuevos. Schneider (2021) identifica cuatro posibles riesgos (interacción entre impactos y costos) asociados al hidrógeno verde, los cuales deberían tenerse en cuenta al desarrollar legislaciones, programas pilotos e incentivos al mercado del hidrógeno verde. En la tabla 5, se detallan dichos riesgos y se incluyen algunos posibles impactos.

Tabla 5. Riesgos, características e impactos del hidrógeno verde.

Riesgos	Características	Impactos
Riesgos a la salud y seguridad	El hidrógeno es volátil y es altamente inflamable. Su producción está asociada a la del amoniaco el cual es altamente corrosivo e inflamable.	Existen métodos de prevención y control de riesgos ya desarrollados, pues el hidrógeno industrial tiene una larga historia, asociada a las refinerías de hidrocarburos. Sin embargo, siguen existiendo posibles impactos a la salud
Riesgos financieros	Al ser un mercado que tiene una proyección de reducción de costos a largo plazo, existe una alta dependencia del apoyo económico estatal, que puede frenarse por la inexistencia de sistemas de garantías de origen, normatividades ambiguas, adopción de estándares del gas o del sistema eléctrico que son obsoletos e, incluso, enfoques de financiación incoherentes o desfavorables.	Abandono de proyectos, endeudamiento público no retribuido, tendencia a generar monopolios pues la relación costo-beneficio sólo sería rentable para grandes capitales. Es probable que varios proyectos busquen financiación de organismos multilaterales, lo cual pude afectar la financiación de otros escenarios como el de la sociedad civil, debilitando la capacidad de veeduría y control ciudadano de estos proyectos.
Riesgos normativos e institucionales	Salvo países como Argentina, Chile o Colombia, la regulación del hidrógeno es todavía deficitaria.	Adopción de estándares descontextualizados o incluso débiles para regular un sector. Debilitamiento de estándares ambientales y de mecanismo de participación ambiental, como forma de estimular el sector.
Riesgos ambientales	Schneider (2021) identifica cuatro riesgos: a) Vertidos y consumo de agua; b) Generación de residuos; c) Afecciones sobre la fauna y la flora; y d) Producción de ruidos y vibraciones.	En contextos de escases hídrica, se debe tener en cuenta que del total del agua utilizada en la electrólisis, solamente el 50% se retorna, por lo que puede generar conflictos importantes; b) debe incluirse el tratamiento de las aguas residuales y el reciclaje de equipos y materiales utilizados, pues se constituirían en residuos peligrosos; c) tanto las eólicas como las solares que estarían asociadas al hidrógeno verde, pueden afectar aves, impactando en los procesos de polinización y de diversidad biológica, generando impactos ecosistémicos; y d) se conoce que las eólicas generan ruido, el cual es considerado una forma de contaminación.

Fuente: Elaboración propia a partir de Schneider (2021)

Algunos autores han establecido que el análisis de la cadena de valor del hidrógeno como estrategia para identificar impactos en los derechos humanos, no es suficiente, por lo que se requieren lecturas amplias de contexto de cada país (Heinemann & Mendelevitch, 2021).

Para evaluar la cadena de valor del hidrógeno, estos autores sugieren identificar, cuando menos seis tópicos de evaluación de impactos: a) Los ataques a las personas defensoras de derechos humanos. De hecho, estos autores señalan (tomando como referente el trabajo del Centro de Información Sobre Empresas y Derechos Humanos) que, durante 2019, las energías renovables fueron el cuarto sector con más ataques a personas defensoras. Estos ataques incluyen intimidaciones, la utilización el indebida del derecho para silenciar a opositores, las campañas de desprestigio y el aprovechamiento de grupos armados ilegales y estatales; b) Las energías renovables son susceptibles de afectar el derecho a la tierra pues tienden a ocupar grandes extensiones aunque puede variar; c) el derecho al agua puede ser vulnerado en la producción de energías renovables pues estas están en tensión, con el consumo local de agua y el estrés hídrico de los territorios, dada su alta dependencia a este recurso; d) los derecho a la alimentación y a la subsistencias se verían afectados desde el momento en que el acceso al agua sea limitado, en este sentido si no se evalúa la capacidad hídrica de un territorio, un proyecto de energía renovable podría destruir formas ancestrales de vida; e) el hecho de que varios de los proyectos de energías renovables, incluyendo a los de hidrógeno, están relacionados a la existencia de otras industrias, la disponibilidad de energía puede verse limitada, incluso excluyendo a los pobladores locales del consumo de la energía producida en sus territorios. Según Heinemann & Mendelevitch (2021), el contexto de las energías renovables y los lugares donde suelen adelantarse proyectos de esta clase tienden a afectar de manera preponderante a pueblos indígenas.

Otras experiencias de análisis de impactos a los derechos humanos en el sector de la energía renovables han identificado impactos diferenciales adicionales, además de otros derechos vulnerados. Una coalición de 28 organizaciones de México realizó un monitoreo durante los años 2020 y 2021 a proyectos relacionados con energía solar y eólica (Alianza Mexicana contra el *Fracking et al*., 2021). De ese estudio, deberían ser tenidos en cuenta los hallazgos sobre los impactos en los derechos de las mujeres:

- Estereotipos y roles de género: estos aumentan los impactos diferenciados al cambio climático, pues determinan formas culturales locales de acceso a recursos como el agua y suelos fértiles.

- En muchos territorios, las mujeres han tenido un rol significativo en la siembra. La llegada de proyectos como las eólicas o las solares, pude limitar su acceso a la tierra y limitado sus posibilidades de acceder a recursos estratégicos como el crédito
- La participación en la toma de decisión en las instituciones públicas y comunitarias se ve seriamente afectada tanto por los estereotipos como pro las desigualdades estructurales
- Finalmente, en el mercado laboral del sector de las renovables, las mujeres tienen más obstáculos para acceder y permanecer, por las violencias institucionales y simbólica que las cuestiona pro ocupar escenarios pensados como de exclusividad para hombres

El Centro de Información sobre Empresas y Derechos Humanos, recurriendo a la base de datos del New Energy Finance Database de Bloomberg, sistematizó varios datos asociados a los derechos humanos y a la conducta empresarial de las principales empresas del sector de energías renovables. Su informe al respecto presenta el siguiente escenario:

> *La crisis climática no se evitará a menos que se produzca una rápida expansión del sector de la energía renovable. Sin embargo, un futuro de carbono cero neto puede y debe ir de la mano del desarrollo sostenible, de la reducción de la pobreza y de la disminución de las desigualdades. Situar a las personas y a sus derechos en el centro de la industria de la energía renovable permitirá que no dejemos a nadie atrás* (Centro de Información Sobre Empresa y Derechos Humanos, 2020b, p. 2)

Durante tres años, este estudio monitoreó la conducta de las 16 principales empresas del sector de energías renovables en el contexto mundial, mediante dos bloques de indicadores. El primer bloque corresponde a indicadores básicos de los Principios Rectores sobre Empresas y Derechos Humanos de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y reúne tres conjuntos de ellos:

- Gobernanza y compromisos políticos.
- Incorporación del respeto y de la debida diligencia en materia de derechos humanos.
- Reparación y mecanismos de reclamación.

El segundo bloque, llamado *indicadores específicos*, contiene los siguientes derechos y temas:

- Derechos de los pueblos indígenas y de las comunidades afectadas.
- Derechos sobre la tierra y el territorio.
- Seguridad y contextos de alto riesgo.
- Personas defensoras de los derechos humanos y del medio ambiente.
- Trabajo, salud y seguridad.
- Derecho a un medio ambiente limpio y saludable.
- Transparencia y anticorrupción.
- Igualdad e inclusión.

El informe dio cuenta de un significativo déficit, pues, ninguna empresa de las evaluadas cumplió plenamente con un enfoque de responsabilidad en el respeto a los derechos humanos. La puntuación promedio fue de 22 % y se evidencia que las empresas que carecen de política de derechos humanos suelen estar relacionadas a un significativo número de denuncias por abusos a los derechos humanos.

Por último, el estudio ofrece información pertinente sobre conducta empresarial en territorios donde persisten conflictos armados: ninguna de las 16 empresas recibió puntuación alguna por identificar y evaluar los riesgos e impactos en los derechos humanos de sus cadenas de suministro de minerales (Centro de Información Sobre Empresa y Derechos Humanos, 2020b, p. 14). Las empresas son: Acciona, Blackrock, Brookfiel, China General Nuclear Power Corp, E. ON SE, EDF Energy, EDP - Energias de Portugal S. A, Enel, Engie S.A, Iberdrola S.A., Jinko Solar, NextEra, Orsted, PowerChina, RWE AG y The Southern Company.

4. ¿Cómo ha sido la toma de decisiones y cómo está diseñada para proyectos puntuales?

De todos los hidrógenos, el verde se ha presentado como el único coherente con las estrategias de descarbonización. Pero, una tecnología no puede entenderse como algo aislado de las políticas que pretenden implementarla. Es decir, ¿qué tan verdes son las políticas de promoción del hidrógeno verde?

Para responder esa pregunta, Cheng & Lee (2022) proponen tres tipos de estrategias: a) Cero rigores regulatorios; b) escalar primero y limpiar después y c) hidrógeno verde ahora. Para clasificar las diferentes políticas analizadas, los autores sugieren cuatro criterios de evaluación: a) sanciones por combustibles fósiles, b) certificaciones de hidrógeno, c) la habilitación de la innovación y d) la dimensión temporal de la eliminación del carbón. En su análisis de 28 países[16], la tendencia global se sitúa en la estrategia de escalar primero y limpiar después.

Desde el punto de vista del rigor regulatorio, las estrategias mencionadas varían de unos países a otros: están aquellos que tienen proyectado desplegar a los sectores de hidrocarburos y nuclear haciendo una transición incremental (bajo rigor regulatorio); el grupo de los que promueven como estrategia tecnológica principal los sistemas de captura de carbono, fundamentada en el principio de neutralidad tecnológica (la mayoría de países industrializados) y, finalmente, pocos países promueven un estándar alto de descarbonización; en este grupo, Portugal es, ahora, el único con una estrategia de hidrógeno verde.

En América Latina, los países que lideran las estrategias de descarbonización con el panorama de un Net Zero a 2050 son Colombia, Chile y Costa Rica (Olade, 2015). Los tres han asumido estrategias distintas.

Costa Rica estableció en 2010 un estímulo tributario dirigido al sector que importara materiales para la construcción de capacidad instalada de tecnologías de descarbonización (Ley 8829 de 2010). En 2022, se encuentra en debate en la Asamblea Legislativa el proyecto de ley para la Promoción e Implementación de una Economía de Hidrógeno Verde en este país.

En 2004, Chile introdujo una regulación sobre mercados *spot* o de contado basados en energías no convencionales (Ley 19.940 de 2004). Este país también creó una hoja de ruta sobre el hidrógeno, desde cuya perspectiva se ha solicitado incluir al hidrógeno como fuente energética. Finalmente, Colombia es el único de los tres países que tiene una ley de transición energética que contempla al hidrógeno como una fuente no convencional de energía renovable y que durante 2022 ha reglamentado el desarrollo de este sector.

Un último desafío a superar es la tensión entre la entrada de tecnologías de producción de energías renovables y los objetivos de seguridad energética de los países (Pistonesi, Bravo & Contreras Lisperguer, 2019). En primer lugar, porque existe una clara asimetría entre aquellos países que controlan

16. Australia, Canadá, Chile, Colombia, la República Checa, la Unión Europea (UE, a nivel regional) Finlandia, Francia, Alemania, Hungría, India, Italia, Japón, Marruecos, Países Bajos, Nueva Zelanda, Noruega, Paraguay, Polonia, Portugal, República de Corea, Rusia, Eslovaquia, España, Ucrania, los Emiratos Árabes Unidos (EAU), el Reino Unido (RU) y los Estados Unidos (EE. UU.)

el desarrollo tecnológico y los que serían simples proveedores del hidrógeno como materia prima. En el escenario actual, se discute sobre dónde desarrollar proyectos, pero poco acerca de quién posee la tecnología y cuál es la influencia en las políticas energéticas de los países, el uso del mercado de estas tecnologías y las barreras que se impongan allí para acceder a ellas (Cheng & Lee, 2022).

Finamente, Pistonesi, Bravo & Contreras Lisperguer (2019) consideran como un escenario relevante para la consolidación de una estrategia regional de descarbonización aquel en el que haya una mayor interconexión y cooperación entre los países de la región.

5. ¿Qué conexiones tiene el hidrógeno con el extractivismo?

El optimismo que se deriva de la posibilidad de descarbonizar la economía y de implementar tecnologías de producción de hidrógeno no ha logrado resolver otras de las grandes inquietudes: ¿qué tan verde es la transición y cuáles podrían ser sus vínculos con modelos altamente contaminantes como los extractivos?

Lo que subyace a estas preguntas tiene que ver, en último término, con la necesidad de entender que tan sostenible y justa puede llegar a ser la transición; la sostenibilidad está asociada al tiempo y a la capacidad para llevarla a cabo (Dillmam, Heinonen, & Jukka, 2022). La justicia está relacionada con las formas como se puede prever, mitigar y reparar a las personas y comunidades que se llegaren a afectar de manera negativa con dicha transición.

La transición, como proceso en el tiempo, lleva implícita la idea de una paulatina implementación de medidas y tecnologías para dicho propósito, lo que trae tres consecuencias inmediatas:

- La continuidad de modelos energéticos y productivos extractivos, en razón a su importante tasa de retorno energética y al nivel de dependencia del modelo económico en relación con ellos.
- La búsqueda de nuevas fuentes energéticas que permitan mantener el actual estilo de vida y la capacidad productiva, sin cuestionar nada ni abrir el debate público acerca de lo siguiente: ni formas de consumo y modelos de acumulación de recursos y capital, ni desigualdades estructurales relacionadas con el acceso a la energía y los derechos de comunidades de los territorios donde opera la infraestructura energética.

- La presunción de sostenibilidad, equidad y garantía de derechos de la producción de energía de fuentes renovables, sobre la base de asumir que estas *per se* son ambientalmente sostenibles. Tal perspectiva oculta el extractivismo que se encuentra en la cadena de suministro de muchas de las fuentes renovables, lo que se traduce en una menor participación de las comunidades que habitan los territorios donde se desarrollan proyectos para extraer materias primas como los minerales de transición[17].

Desde un enfoque de justicia, la transición interroga a los principales actores que la impulsan sobre quienes serán los principales beneficiarios, quiénes soportarán los posibles impactos negativos y quiénes y cómo podrán participar en la toma de decisiones.

Sobre los beneficiarios, como ya se señaló antes, el sector hidrocarburos es, precisamente, el que ha estado haciendo un importante *lobby* para la promoción de hidrógenos como el azul y el gris, en el pasado, y, más recientemente, con el verde. En este último caso, debe destacarse la acción decidida del sector transporte y el de tecnología. Sobre los impactos, la dinámica de la transición promovida por los poderes europeos, norteamericanos y chinos indica una tendencia a trasladar los costos a los territorios que proveerían la materia prima para producir hidrógeno. La última pregunta implica otras consideraciones.

En primer lugar, el acceso a la energía implica un cierto grado de asequibilidad al recurso. De nuevo, la tendencia deja algunas preocupaciones, pues, en las hojas de ruta del hidrógeno de países como Chile, Argentina, Colombia y Brasil, la estrategia de producción de hidrógeno verde se pensaba para que se dirija, primero a las exportaciones y, en el largo plazo, al consumo interno. En lo referente al hidrógeno azul, se ha previsto para el consumo interno de los países. Esta mirada, sumada a la brecha tecnológica, interpela a los actores decisionales de la gobernanza energética, puesto que se evidencia una tendencia a la dependencia tecnológica y a convertir el hidrógeno en una materia prima más, lo que reproduciría el modelo de dependencia estructural.

En segundo lugar, tratar el acceso a la energía con un enfoque de justicia conlleva desafíos referidos al carácter confiable de dicho acceso. Tal condición es posible si, por una parte, los actores decisionales hacen de manera clara y precisa un análisis de riesgos, impactos y mecanismos de prevención, mitigación y

17. Para conocer más sobre los minerales de transición, invitamos a consultar el Transicional Mineral Tracker, del Centro de Información sobre Empresas y Derechos Humanos, en el que se hace seguimiento de las implicaciones en materia de derechos humanos del auge de los minerales que impulsa la transición a una economía de carbono neto cero: https://www.business-humanrights.org/en/from-us/transition-minerals-tracker/

reparación; esto es la garantía del derecho de acceso a la información. Además, se hace necesario que la sociedad en su conjunto, con el debido acceso a la información, pueda participar en la toma de decisiones. En el contexto actual, el déficit de acceso a la energía es precisamente uno de los mayores déficits de la promoción del hidrógeno como vector energético y motor de la transición.

Varios elementos han marcado el impulso del hidrógeno en América Latina, elementos que debilitan la democracia ambiental. Ejemplos como el colombiano, el argentino o el brasilero muestran que en los intentos pro-regulación nunca se ha consultado con las comunidades o poblaciones. En particular, en Colombia, el Artículo 6 de la ley 21 de 1991 establece de manera expresa que toda ley susceptible de afectar a pueblos indígenas tendrá que consultarse con las comunidades implicadas. Este requisito no se cumplió con la Ley 2099 de 2022, lo que ha llevado a varias organizaciones a interponer una Acción Pública de Inconstitucionalidad, para que la Corte Constitucional Colombiana estudie, por vicios de forma, la ley de transición energética.

Dicho déficit democrático vicia la posibilidad de hacer un efectivo control y evaluación de impactos socioambientales, pues, las empresas se constituyen en el único actor de interlocución con el Estado para el desarrollo de las políticas públicas en materia de energía. Incluso,

> *(…) existe un serio riesgo de que "la revolución del H_2 verde" implique que este ocupe el lugar de las energías fósiles, pero con la misma gobernanza ambiental (o la falta de esta), similares actores, concentración en la propiedad y estructura impositiva, así como nulos avances en la participación de la ciudadanía en la toma de decisiones* (Proaño, 2021, p. 80).

Además, existe otro factor que debería llamar la atención de la sociedad en su conjunto: la totalidad de proyectos y marcos regulatorios de América Latina incluyen la figura de declaratoria de utilidad pública (DUP) de los proyectos de hidrógeno (verde, azul, gris, etc.) como mecanismo para garantizar la seguridad jurídica de los actores económicos que estarían invirtiendo en proyectos de este tipo. De comienzo, es comprensible que esta figura haga parte del marco normativo, pues, acompañada de incentivos tributarios, buscaría estimular la inversión en el sector. Sin embargo, la evidencia de la utilización de la DUP en el sector minero y el de hidrocarburos ha significado la reducción de espacios democráticos de deliberación y en significativo debilitamiento de la gobernanza ambiental.

Dora Lucy Arias y el Grupo Utilidad Pública en América Latina (2021) encontraron lo siguiente en una serie de casos asociados a temas de extracción minera, hidrocarburos, producción hidroeléctrica y de infraestructura:

> *[R]esulta evidente que hay un desequilibrio entre la utilidad pública como fundamento de expropiaciones y explotación de recursos y la utilidad pública para fortalecer esos otros elementos reconocidos constitucionalmente como de utilidad pública o interés social* (p. 118).

Estos hallazgos, según las autoras mencionadas, se traducen en la perpetuación de estructuras de poder coloniales revestidas de la imposición del desarrollismo como generador de bienestar y de la razón del Estado. De esa manera, se aceleran procesos de centralización territorial y decisional, el debilitamiento de gobiernos propios y del principio contramayoritario; finalmente, al operar como una presunción legal, las comunidades y personas que pretendan hacer defensa de sus derechos y territorios, se verán enfrentadas a una nueva barrera de acceso a la justica.

Para precisar qué tan justa es la transición que se viene impulsando y el aporte que podría implicar la producción de hidrógeno, particularmente el verde, veamos ahora la manera en que una coyuntura geopolítica con epicentro en Europa está reconfigurando la transición hacia una forma de retorno y legitimación del extractivismo.

Varios medios de comunicación están anunciando, por ejemplo, las pretensiones de Alemania de acelerar la transición energética. La Deutsche Welle (DW) resalta la autocrítica del canciller alemán Olaf Scholz en relación con la dependencia de su país a los hidrocarburos provenientes de Rusia: "La política energética no es sólo una cuestión de precio. La política energética es también una política de seguridad […] Es por eso por lo que ahora tenemos que acelerar la expansión de las energías renovables (DW, 2022a).

Se habla, también, de que la guerra ha inclinado la balanza en favor del hidrógeno verde sobre el azul en el contexto europeo (Reuters, 2022). La razón, se dice, es que el principal insumo para el azul es el gas y la situación de la guerra, aunada a las medidas económicas tomadas contra Rusia, hacen que su ventaja sobre el hidrógeno verde (menor precio por disponibilidad de materias primas y mayor tasa de retorno energética) sea relativa y se vea afectada por aumentos significativos de los costos asociados a la posible escasez de gas.

Empero, aunque Europa no tenía contemplado retornar a energías como el gas y el carbón, desde inicios de 2022, varias organizaciones de la sociedad civil han llamado la atención sobre la intención de gobiernos como el alemán de reabrir plantas termoeléctricas basadas en carbón, pero no del proveniente de la antigua mina de Bochum o de Prosper-Haniel (Cuenca del Ruhr), sino del producido en minas como la del Cerrejón (Colombia), con las implicaciones que tendría en este país suramericano.

Debe señalarse que el Centro de información sobre Empresas y Derechos Humanos ha reportado 24 casos de ataques contra personas defensoras de derechos humanos, sin contar con otras violaciones a derechos como el del ambiente sano, la consulta previa, libre e informada, la libertad de asociación y el derecho al territorio[18], todos relacionados con la extracción de carbón de empresas como Cerrejón (former joint venture Anglo American, BHP & Glencore; actualmente bajo control de Glencore). Por lo tanto, reactivar la demanda europea de carbón puede incrementar los riesgos en territorios como la Guajira y Cesar (Colombia), asociados a violaciones de derechos humanos.

Entonces, para resolver su actual escasez energética, países europeos que se consideraban abanderados de la transición energética estarían abriendo la posibilidad de transferir sus costos a países de la periferia; con ello, renunciarían a la posibilidad de una transición justa y a incentivar la propia transición con modelos extractivos de alto impacto, pero con efectos fuera de su territorio. Más de 165 organizaciones ambientalistas y personas defensoras de derechos humanos han denunciado esta nueva postura (véase la campaña **#VIDANOCARBON,** RFI, 2022).

Tal escenario puede verse desde la perspectiva de la transferencia de costos (Robbins & Zografos, 2020) y desde los efectos *lock-in* o de permanecía (Healy & Barry, 2017). Los efectos *lock-in*, como se dijo en el capítulo precedente, se caracterizan por un alto grado de injusticia ambiental, pues, representan el traslado de los impactos negativos de un territorio a otro. Esa acción es posible solamente por el grado de asimetría de poder que ejercen los actores que controlan la tecnología y el conocimiento en detrimento de aquellos territorios y actores que cuentan, únicamente, con las materias primas.

Ahora bien, los efectos *lock-in* están ligados a la promesa de retornar "temporalmente" a fuentes energéticas aportantes de altas cantidades de GEI. Pero, el problema radica en que ningún actor empresarial estaría dispuesto a invertir en estos sectores por un corto plazo, pues su taza de ganancia se vería afectada. En la actualidad, como se ha mostrado, la extracción de carbón y gas (en función de producir hidrógeno azul) tiene costos menores a los de generar energía solar o eólica (con las que se tendría hidrógeno verde). Además, la tasa de retorno del hidrógeno verde es menor que la del hidrógeno azul. El efecto de permanencia haría elegir, como opción más económicamente favorable, aquella que ofrezca mayores márgenes de ganancia.

El aplazamiento al mediano y largo plazo de la producción de hidrógeno verde y la relación de este último con el mercado de las eólicas y las solares tendrían

18. Para conocer este perfil de caso en forma más detallada, sugerimos consultar el siguiente enlace: https://www.business-humanrights.org/es/empresas/cerrej%C3%B3n-coal-joint-venture-anglo-american-bhp-glencore/

como consecuencia que este sector se contraiga, lo que puede significar, incluso, el incumplimiento del deber de remediar y reparar por sus actividades con impactos negativos, en el presente.

Por último, si tenemos en cuenta que transferir costos y generar efectos de permanencia implica que ambos escenarios se convertirán en resultados no esperados, o, como se conocen desde hace más de un siglo, en *externalidades,* ni el uno ni el otro son suficientes para entender la relaciones y correspondencias entre el extractivismo y los hidrógenos. Se propone, entonces, una tercera categoría de análisis: los efectos de inercia. Estos se presentan cuando el Estado tiene que intervenir en la regulación de los sesgos e inequidades originados en los mercados y que obedecen a las asimetrías que se derivan de los traslados de costos y del efecto de permanencia.

En forma constante, los Estados intervienen en la economía para regular los efectos no esperados, también llamados externalidades. En el pensamiento dominante de la economía capitalista actual, se utiliza esta intervención como el último recurso. Coase (1960) sostiene que toda intervención de las autoridades debe pensarse como *ultima ratio*, pues toda decisión que se adopte en un tema determinado debe propender por aquellos escenarios de bajo costo y con menores alternativas de resultado, en busca de aquellos más simplificados. El mismo autor dice, también, que cuando se pretende evaluar una intervención estatal, debe considerarse que la misma sea menos costosa que la no intervención, pues, las relaciones sociales operan como los mercados, en el sentido de que la interpretación de las reglas de juego tenderá a ser más eficiente en la asignación de recurso, cuanto menos se intente regular de manera específica un determinado fenómeno (Coase, 1960, p. 99).

Es en el escenario de *ultima ratio* donde se expresa la inercia. En materia ambiental, la intervención se encaminaría a redistribuir los costos de la manera más eficiente, para lo cual se recurre a beneficios tributarios, acompañados de instrumentos pigouvianos (el que contamina, paga). Esta fórmula trae consigo tres consecuencias preocupantes:

- La propia externalidad se convierte en un mercado. Así, los actores económicos pueden recurrir a los beneficios tributarios haciendo simples adecuaciones (implementando tecnologías de captura de carbono o de uso de hidrógeno) para favorecer el conjunto de su actividad (lo que se conoce como *greenwashing*).
- Luego de que se genera un efecto *lock-in*, en el que se retorna a una actividad extractiva para sostener financieramente una producción de fuentes de energía renovable, el merado obligará a otros actores a tomar la misma decisión, de modo que se aumenta la escala del impacto de dicho retroceso.
- El retorno a la actividad extractiva no descarbonizada implica que esta absorberá nuevamente los recursos para el desarrollo de tecnología y

capacidades, lo que se traduce en una desaceleración del desarrollo de tecnologías para la producción de fuentes de energía renovable.

En la tabla 6 se presentan las tres perspectivas o escenarios, aplicados a Colombia.

Tabla 6. Colombia Impactos del desarrollo del hidrógeno por sus vínculos con el sector extractivo.

	***Cost shift* o transferencia de costos**	**Efectos *lock-in***	**Efectos de inercia**
Hidrógeno azul	Incrementar la producción de carbón y gas en el país puede incentivar la implementación de métodos no convencionales como el fracking o incrementar los impactos sociales y ambientales ligados al carbón. Los impactos reales de esto se verán en los territorios de donde se extraen las materias primas, mientras que Europa recibirá hidrógeno libre de costos socioambientales.	Luego de que Europa anunciara su descarbonización, Colombia proyectó su propia estrategia: puso al año 2030 como el momento de cierre de la extracción carbonífera y al 2050 como el de su total desmantelamiento. Desacelerar ese proceso implica que la transición se prolongue en el tiempo, pues ninguna empresa minera invertiría en ese sector de manera temporal.	La tecnología asociada al hidrógeno azul es más económica. Incluso, articula la capacidad instalada. Adicionalmente, si Europa está reconsiderando retornar al carbón y al gas, los principales productores terminarán concentrando todos sus esfuerzos en este sector.
Hidrógeno verde	Uno de los principales costos identificados tiene que ver con el estrés hídrico. De hecho, en Colombia, el desarrollo de la infraestructura eólica (Guajira) y solar (Cesar) se ha dado en una de las regiones con mayor estrés hídrico del país, generado, entre otras razones, por la utilización del bien hídrico por parte de sectores mineros y de hidrocarburos.	Puesto que la producción de hidrógeno verde depende de la energía eólica y de la solar, los proyectos actuales de dicho sector, que tienen serios cuestionamientos por no garantizar el derecho a la consulta previa, libre e informada ni por favorecer los escenarios de participación en materia ambiental, se encontrarían legitimados por la necesidad de descarbonizar la economía.	Se reforzará la tendencia a pensar que el prefijo "verde" se traduce inmediatamente en sostenibilidad socioambiental. Se convertiría en una tarea imposible controvertir los proyectos de desarrollo basados en fuentes renovables, incluido el hidrógeno, pues la idea de lo sostenible prevalecería y, de nuevo, los parques eólicos de la Guajira no podrían ser cuestionados sobre su aporte real a la descarbonización y al a justicia ambiental del pueblo Wayúu.

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

En la actualidad, es claro que el cambio climático trasciende los debates ecosistémicos y de conservación. Sus impactos profundizan las desigualdades estructurales de cada país y es amplio el reconocimiento de que los impactos más significativos ocurren las poblaciones más vulnerables e históricamente olvidadas.

En un contexto tan desafiante, aparecen preguntas que interpelan las formas colectivas de producir y generar riqueza. Sin importar el origen ideológico o cultural de quienes evalúan la matriz energética de los diferentes países, sabemos que la mayor parte de las economías del planeta es muy dependiente de los hidrocarburos, situación que estrecha los espacios de toma de decisiones para frenar el avance del cambio climático y de la subsecuente crisis multisistémica.

En ese contexto, como resultado de los diálogos que dieron origen al Acuerdo de París en 2015, se lanzó la estrategia urgente y global de la descarbonización de las economías. En ella, se sitúa la propuesta de descubrir y desarrollar nuevas fuentes y tecnologías de producción de energía, de manera que sea suficiente y eficiente y deje en el pasado los hidrocarburos, principales aportantes de GEI, y los conflictos que generan sus derivados.

No obstante, a pesar de las formalidades y estructuras de esos instrumentos, está lejos de lograrse la meta de evitar el incremento de temperatura por encima de los 1.5°C con respecto a los niveles preindustriales. En menos de un año, la narrativa de mantener viva la meta se convirtió en la de tener que resistir la crisis, como lo han proyectado la evidencia territorial y científica. El negacionismo y los responsables de esta crisis (las empresas extractivas) se mantienen de pie, mientras el derecho al desarrollo de las naciones más pobres sigue en disputa, poniendo en vilo el futuro de las siguientes generaciones.

Sin duda, el trilema energético cuestiona a nuestras sociedades cada vez más. Nuevamente, el hidrógeno, a pesar de sus fallidos intentos en anteriores décadas, se presenta como oportunidad para cerrar las brechas de la transición

energética entre combustibles fósiles y energías renovables. Pero, aun con ese sueño, todavía es muy incierto su aporte en esta transición. Persiste la duda sobre si es efectivo para en esa ruta o si, en cambio, es solo una diversificación de productos de la industria extractiva.

De otro lado, entender de dónde se obtiene el hidrógeno y cómo se relaciona con los demás recursos en su cromática implica considerar enfoques diferenciales sobre la manera en que nos relacionamos con la energía y sobre su propósito. El posible aporte del hidrógeno en profundizar la crisis climática, intensificar el estrés hídrico, hacer competir los diferentes usos del uso, reducir la calidad del aire de nuestros territorios, acidificar nuestros océanos, contaminar acuíferos, generar impactos a perpetuidad y en otros impactos puede estarnos enfrentando a otra fuente desencadenadora de conflictos socioambientales.

Asimismo, en momentos en los que necesitamos hacer las transiciones para subsistir como especie, es importante cuestionarnos los criterios de hacia dónde queremos orientar la transición energética. Si bien las proyecciones sobre el hidrógeno llaman a un despliegue gigantesco de energías renovables que nos permitirían tener autonomía energética y reducir nuestra generación de emisiones, su uso se enfocaría en conectarse a las redes de transmisión existentes, dependería en gran medida de combustibles fósiles y se produciría para suministrar la energía que no está dispuesto a extraer el globo norte; eso transformaría el interés del mundo por los países que nos ubicamos en el trópico, como Colombia.

La geopolítica de la energía está cambiando en forma acelerada y coincide con las inversiones actuales para promover al hidrógeno como el próximo vector energético. No obstante, se observan en estas masivas inversiones los mismos nombres de los que, a pesar de todos los esfuerzos de otros actores, proyectan mantener los combustibles fósiles entre los sistemas energéticos. Esto señala diversos dilemas, pues, serían, entonces, el hidrógeno y tecnologías como las CCUS los espacios donde estas inversiones y empresas podrían extender el uso de sus activos, a pesar de los llamados de la naturaleza y de las comunidades más vulnerables para transitar a otras formas de relacionarnos con la energía.

La demanda de energía, los incrementos de la población y del consumo, las guerras, las pandemias, nuestras vulnerabilidades y la crisis climática serían factores para relacionar el hidrógeno en su respuesta y en sus consecuencias. Preocupa que países latinoamericanos estén abriendo las puertas a estas tecnologías sin considerar instrumentos de impacto ambiental y posibles vulneraciones a los derechos humanos. Otra situación que crea una alerta es que las inversiones y los proyectos se estén acordando a espaldas de las comunidades. En muchos casos, para la realidad latinoamericana, se trata de aquellas que viven en los territorios que, históricamente, se han explotado con fines energéticos.

El sentido de urgencia de la crisis climática y de la transición energética implica hondas reflexiones sobre lo que estamos dispuestos a sostener y lo que, en definitiva, no queremos repetir. No es justo ni con las presentes ni con las futuras generaciones guardar nuestras emisiones "debajo de la alfombra", como se podría entender con tecnologías como las CCUS. El hidrógeno debe verse con enfoques de justicia ambiental y climática.

En consecuencia, el hidrógeno, sobre todo, el verde, no puede entenderse ni como una solución definitiva, ni con desconfianza *prima facie*. Lo que sí es preciso es lanzar múltiples cuestionamientos sobre los modelos y estructuras que les subyacen y salen de la esfera de la ciencia, para evitar, como dice Mary Shelly en su metáfora del Frankenstein, "que la forma como se instrumentaliza el conocimiento (…) termine siendo nuestro propio 'monstruo'; nuestro verdugo implacable".

En la tabla 7, quedan dos posibles áreas de discusión: las promesas para descarbonizar la economía que ofrecen los hidrógenos (sin dejar de lados las discusiones sobre justicia energética y ambiental) y las cuestiones que dejan generan dudas y necesitan resolverse en el corto y en el mediano plazo para que este vector energético no termine alimentando un nuevo extractivismo.

Tabla 7. Promesas y desafíos en torno al hidrógeno

Aspecto	Promesas	Desafíos
Sostenibilidad financiera	Se habla del hidrógeno verde como una alternativa energética que no afectaría la generación de riqueza, ni el crecimiento económico, pues, se está trabajando en que pueda brindar las mismas utilidades de los hidrocarburos. Por otra parte, al tener la producción de hidrógeno verde costos elevados, se ha hablado de financiar e incentivar con recursos públicos proyectos para garantizar la sostenibilidad.	Alta asimetría entre la financiación en países que buscan comprar el hidrógeno como materia prima y aquellos que lo producirían. Esto se deriva de los límites en el acceso a conocimiento y tecnología, que harían dependientes a los productores. También deben llamar la atención las alianzas privadas que pretenden alcanzar financiación en los denominados fondos climáticos. Esto podría generar un debilitamiento de la sociedad civil, que se vería excluida de acceder a dichos fondos por la tendencia de priorizar la generación de conocimiento técnico-científico y no capacidades de resiliencia y recuperación ante las vulnerabilidades socio-climáticas.

Continúa...

... viene

		Se deben considerar criterios diferenciadores de financiamiento sobre los tipos de hidrógeno y su contribución en emisiones. Por ejemplo, el hidrógeno azul, que depende de combustibles fósiles.
Desarrollo tecnológico y económico	Se ve confiable una estrategia de transición escalonada, es decir, aquella en la que se recurrirá a los hidrocarburos en el corto y en el mediano plazo para producir hidrógeno gris y azul, con el propósito que estos impulsen financiera y tecnológicamente la producción del hidrógeno verde en el largo plazo. La producción de hidrógenos implica una transferencia tecnológica en la que se podrían desarrollar ejercicios de ingeniería inversa, para dar, en el largo plazo, mayor autonomía a los futuros países productores de hidrógeno como vector energético.	Existen dos desafíos: evitar efectos lock-in que perpetúen el extractivismo, como el del carbón, el de gas y el de petróleo, en caso de no lograr reducir costos de tecnologías asociadas al hidrógeno verde. El segundo desafío consiste en compensar los cost shift y como incluir en ellos todos los impactos ambientales y sociales que se generarán en el corto y en el mediano plazo. Persiste una alta incertidumbre tecnológica ligada a altas expectativas sobre los próximos desarrollos científicos que pueden dar como resultado una desestimación de producción de energías de fuentes no convencionales renovables.
Oportunidades en favor de la justicia energética y climática	La posibilidad de desarrollar una tecnología que recurra a uno de los elementos más abundantes hasta ahora conocido (el hidrógeno) se ha propuesto como una oportunidad para pensar en fuentes y vectores energéticos de acceso universal, bajos en o emisiones cero de CO2 y de otros GEI.	Todavía no se ha contemplado la manera en que se van a resolver posibles tensiones entre estas tecnologías y sus impactos en los recursos naturales y en los territorios. Todavía no se ha contemplado la manera en que se van a resolver posibles tensiones entre estas tecnologías y sus impactos en los recursos naturales y en los territorios. Además, se observa que con los argumentos de "fuente renovable de energía" y "tema de alta complejidad técnico-científica" se pueden llegar a desconocer derechos como el de la participación y la consulta previa, libre e informada. Se hace necesario estudiar el hidrógeno como gas indirecto de la crisis climática y la contaminación del aire y las implicaciones que tendría su despliegue a corto, mediano y largo plazo en términos de garantizar un clima seguro, de acuerdo con las proyecciones de producción y demanda.

continúa...

... viene

Debida diligencia ambiental y de derechos humanos	Se ha propuesto que el desarrollo de proyectos de hidrógeno gris, azul o verde, introduzcan el enfoque de respeto y garantía de los derechos humanos en los sectores del petróleo, gas, carbón y renovables no convencionales. Estos se han resistido de manera sistemática a reconocer sus impactos negativos en el ambiente y a asumir otros criterios de la transición energética.	Es una tarea pendiente superar el dogma de que el adjetivo "verde" quiere decir que no genera impactos y que cualquier sector que se lo adjudique es, en sí mismo, ambientalmente favorable y no debe ser sujeto de requerimientos técnicos y legales de impacto ambiental, por su fomento. Es claro que el desarrollo del hidrógeno estará permeado por importantes discusiones de derechos humanos. Pero, persisten preocupaciones con respecto a que sectores como el del petróleo, gas y carbón o el de los agroquímicos utilicen tecnologías de captura de carbono y de promoción del hidrógeno verde como forma de hacer greenwashing y socialwashing de sus impactos en la totalidad del portafolio donde desarrollan sus actividades empresariales.
Un marco de análisis de riesgos	Algunas normatividades del globo norte han incluido al hidrógeno como sustancia peligrosa, en atención a la dificultad de almacenamiento y a su volatilidad. También se reconocen las debilidades tecnológicas asociadas a ser un sector emergente, por lo que planes estratégicos de diferentes países lo entienden como un objetivo al que hay que llegar, pero que no se debe aplazar. Así, se ha evidenciado la financiación de proyectos piloto en el presente, en busca de que sea sostenible en el mediano plazo.	La producción de hidrógeno se sigue analizando desde una perspectiva puramente técnica. Existen grandes vacíos sobre formas de identificar riesgos en el ambiente desde una perspectiva integral. Más aún, las preguntas sobre los impactos en los derechos humanos son inexistentes en la mayor parte de documentos de política pública sobre el tema. Pareciera que se ha venido imponiendo la idea de consolidar territorios como zonas verdes de sacrificio, incluso, la de ofrecer esta posibilidad como transitoria. Faltan estudios sobre los posibles conflictos que podrían generar los diversos tipos de hidrógeno y los territorios considerados para producirlos.

Referencias

Algarra, N. (2021, 18 de agosto). Ley de Transición Energética. *Asuntos Legales*. Consultado en https://www.asuntoslegales.com.co/consultorio/ley-de-transicion-energetica-3218406#:~:text=Siguen%20las%20buenas%20noticias%20en,como%20Ley%20de%20Transici%C3%B3n%20Energ%C3%A9tica

Alianza Mexicana contra el Fracking (AMCF), Centro de Capacitación en Ecología y Salud para Campesinos (CCESC), Centro de Colaboración Cívica (CCC) y otros. (2021). *Derechos humanos para una transición energética justa. Informe de monitoreo con recomendaciones*. México: Taller Hojarasca.

Ángel, A. (2019, 23 de octubre). Impactos a perpetuidad. El legado de la minería. *Ideas Verdes 20*. Consultado en https://co.boell.org/es/2019/10/23/impactos-perpetuidad-el-legado-de-la-mineria

Area, J., Lardini, F., Sánchez, C., Fernández, J., & Ferrer, I. (2019). El hidrógeno como vector energético: mucho hecho, pero casi todo por hacer. *Encuentros Multidisciplinares 62*, Mayo-Agosto. Consultado en http://www.encuentros-multidisciplinares.org/revista-62/jose-ares_y_otros.pdf

Arias, D, L. (coord.) & Grupo Utilidad Pública en América Latina. (2021, octubre). *Utilidad privada, despojo público. Utilidad Pública y conceptos análogos relacionados con actividades minero-energéticas Análisis en Bolivia, Brasil, Ecuador, Colombia, Honduras, Chile, México y Perú*. Grupo Utilidad Pública en América Latina. Consultado en https://semillas.org.co/apc-aa-files/5d99b14191c59782eab3da99d8f95126/informe-regional-utilidad-privada-despojo-publico.pdf

Banchón, M. (2021, 16 de diciembre). Fondos verdes de la UE para Latinoamérica: ¿solo ventajas? *Deutsche Welle*. Consultado en https://www.dw.com/es/fondos-verdes-de-la-ue-para-latinoam%C3%A9rica-solo-ventajas/a-60074870

Banco Bilbao Vizcaya Argentaria (BBVA). (2021). BBVA cumple un año como miembro fundador de la alianza bancaria de cero emisiones netas de la ONU. *BBVA*. Consultado en https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/bbva-cumple-un-ano-como-miembro-fundador-de-la-alianza-bancaria-de-cero-emisiones-netas-de-la-onu/

Banco Bilbao Vizcaya Argentaria (BBVA). (2021, 30 de noviembre). Hidrógeno, el gas de doble filo en el cambio climático. *OpenMind BBVA*. Consultado en https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/medioambiente/hidrógeno-gas-doble-filo-cambio-climatico/

Baykara, S. (2018). Hydrogen: A brief overview on its sources, production and environmental impact. *International Journal of Hydrogen Energy, 43, 23*, pp. 10605-10614. Consultado en: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.022

Belinchón, F. (2021, 22 de mayo). El ocaso del petróleo: quizás no tan cerca como la revolución verde indica. *El País Economía*. Consultado en https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/05/14/mercados/1620993999_111899.html

Benjumea, F. (2020). Vector energético. *Glosario*. Consultado en https://felipebenjumeallorente.com/glosario/vector-energetico/

Bright, C.; Buhmann, K. (2021). Risk-Based Due Diligence, Climate Change, Human Rights and the Just Transition. *Sustainability* 2021, 13, 18. Consultado en https://doi.org/10.3390/su131810454

Centro de Información sobre Empresas y Derechos Humanos, CIEDH. (2020). *Chile: AES Andes S.A. contrata servicios de vigilancia contra personas defensoras de derechos ambientales críticas de su proyecto hidroeléctrico Alto Maipó*. Consultado en https://www.business-humanrights.org/es/%C3%BAltimas-noticias/chile-aes-andes-sa-contrata-servicios-de-vigilancia-en-contra-de-personas-defensoras-de-derechos-medioambientales-cr%C3%ADticos-con-su-proyecto-hidroel%C3%A9ctrico-alto-maipo/

Centro de Información sobre Empresas y Derechos Humanos, CIEDH. (2020a). *Colombia: Indígenas que no han sido consultados en proyectos eólicos en sus territorios reciben amenazas*. Consultado en https://www.business-humanrights.org/es/%C3%BAltimas-noticias/colombia-ind%C3%ADgenas-que-no-han-sido-consultados-en-proyectos-e%C3%B3licos-en-sus-territorios-reciben-amenazas/

Centro de Información sobre Empresas y Derechos Humanos, CIEDH. (2020b) Índice de energía renovable y derechos humanos Resultados de los sectores eólico y solar. Consultado en https://media.business-humanrights.org/media/documents/files/%C3%8DNDICE_DE_ENERG%C3%8DA_RENOVABLE_Y_DERECHOS_HUMANOS_2020.pdf

Centro de Información sobre Empresas y Derechos Humanos, CIEDH. (2021). Colombia: Michelsen Vargas, joven que protestaba contra Cenit, de Ecopetrol, muere tras recibir disparo de la policía. Consultado en https://www.business-humanrights.org/es/%C3%BAltimas-noticias/colombia-michelsen-vargas-joven-que-protestaba-contra-cenit-de-ecopetrol-muere-tras-recibir-disparo-de-la-polic%C3%ADa/

Centro de Información sobre Empresas y Derechos Humanos, CIEDH. (2022). *Reflexiones sobre el hidrógeno como vector energético en el contexto de una transición justa*. Documento de análisis, sin publicar. Bogotá.

Centro Nacional del Hidrógeno. (2022). ¿Qué es el hidrógeno? *El hidrógeno*. Consultado en https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/

Cervantes, V. (2013, 20 de junio). Los vectores energéticos. *O3zono. Energía en un mundo global*. Consultado en http://o3zono.blogspot.com/2013/06/los-vectores-energeticos.html

Cheng, W. & Lee, S. (2022). How Green Are the National Hydrogen Strategies? *Sustainability* 2022, 14, 1930. Consultado en https://doi.org/10.3390/su14031930

Chevalier, S. (2022, 22 de marzo). ¿Qué países corren mayor riesgo de quedarse sin agua? *Statista*. Consultado en https://es.statista.com/grafico/23730/vulnerabilidad-al-estres-hidrico-alrededor-del-mundo/

Citi. (2021, 2 de noviembre). Citi Joins Breakthrough Energy Catalyst as Anchor Partner to Accelerate the Clean Energy Transition With $100 Million Commitment. *Citi*.Consultado en https://www.citigroup.com/citi/news/2021/211102a.htm

Coase, R. (1960). El problema del costo social. *The Journal of Law and* Economics. Traducción del Centro de Estudios Públicos, de Chile. Consultado en https://www.cepchile.cl/cep/site/artic/20160303/asocfile/20160303184107/rev45_coase.pdf

Comisión Interamericana de Derechos Humanos, CIDH. (2019) CIDH y su Redesca expresan solidaridad al pueblo de Bahamas por los daños ocasionados por el huracán Dorian y llaman a urgente implementación de respuesta basada en los derechos humanos. Comunicado de prensa. Consultado en https://www.oas.org/es/cidh/prensa/comunicados/2019/237.asp

Consejo Nacional de Política Económica y Social, Conpes-Departamento Nacional de Planeación, DNP. (2022, 29 de marzo). *Documento Conpes 4975*. Consultado en https://www.dnp.gov.co/CONPES/documentos-conpes/conpes-economicos

Crowcon. (2021, 22 de enero). Los peligros del hidrógeno. *Crowcon*. Consultado en https://www.crowcon.com/es/blog/the-dangers-of-hydrogen/

Cuéllar, A. & Fischer, A. (2022, 26 de abril). Del petróleo a los minerales: la nueva dependencia de la transición energética. *Diálogo Chino*. Consultado en https://dialogochino.net/es/sin-categorizar/53160-del-petroleo-a-los-minerales-la-nueva-dependencia-de-la-transicion-energetica/#:~:text=%C2%BFCu%C3%A1les%20son%20los%20minerales%20de,las%20tierras%20raras%2C%20entre%20otros

Det Norske Veritas, DNV. (2022). *Hydrogen forecast to 2050*. Consultado en https://www.naucher.com/wp-content/uploads/2022/06/DNV_Hydrogen_Forecast_2022.pdf

Deutsche Welle, DW. (2022a, 6 de julio). Germany's Scholz: Ukraine war calls for faster energy transition — as it happened. *Deutsche Welle*. Publicado el 6 de julio de 2022. Consultado en https://www.dw.com/en/germanys-scholz-ukraine-war-calls-for-faster-energy-transition-as-it-happened/a-62375351

Dillman, K & Heinonen, Jukka, A. (2022, octubre) 'Just' Hydrogen Economy: A Normative Energy Justice Assessment of the Hydrogen Economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 167, 112648*. Consultado en https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112648

Domínguez, E., Rivera, H., Sarmiento, R., Moreno, P. y otros. (2008) Demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico colombiano. *Revista Academia Colombiana de Ciencias. 32. 195-212*.

El periódico de la energía. (2020, 22 de enero). El hidrógeno verde es el combustible del futuro. *El periódico de la energía*. Consultado en https://elperiodicodelaenergia.com/el-hidrogeno-verde-es-el-combustible-del-futuro/

Empresa Colombiana de Petróleos, Ecopetrol. (2022). El Grupo Ecopetrol inició la producción de hidrógeno verde en Colombia. *Ecopetrol*. Consultado en https://acortar.link/Ko10l6

Encabo, I., Carrión, F. & Ordóñez, R. (2022, 18 de junio). El debate que divide Europa: ¿Es el gas una energía verde? *El Independiente*. Consultado en https://www.elindependiente.com/economia/2022/06/18/el-debate-que-divide-europa-es-el-gas-una-energia-verde/

Endesa. (2022, 16 de febrero). Si el futuro va a ser eléctrico ¿será más barata la energía? *Endesa*. Consultado en https://www.endesa.com/es/la-cara-e/sector-energetico/cual-es-el-futuro-de-la-electricidad-energia-mas-barata

Environmental Defense Fund. (EDF). (2022, 20 de julio). Clean or dirty: Is hydrogen the climate-friendly energy solution we need? *EDF*. Consultado en

https://www.edf.org/hydrogen-climate-friendly-energy-solution-we-need?utm_source=%7bSOCIAL_NETWORK%7d&utm_medium=%7bNETWORK_NAME%7d&utm_content=1658408527

Escalona, E. & Jara, N. (2020, 19 de octubre). Desafíos regulatorios para el desarrollo del hidrógeno verde en Sudamérica. *Philipi, Prietocarizosa, Ferrero DU & Uría*. Consultado en https://www.ppulegal.com/insights/prensa/desafios-regulatorios-desarrollo-hidrógeno-verde/

European Commission. (2020). *EU Hydrogen Strategy*. Consultado en https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_1296

Fibras y Normas Colombia S.A.S (2019) Agua potable. Las plantas desalinizadoras y su impacto ambiental. *Blog Fibras y Normas de Colombia*. Consultado en https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/las-plantas-desalinizadoras-impacto-ambiental/

Fundación Renovables. (2021, 6 de octubre). *El papel del hidrógeno en la transición energética*. Consultado en https://fundacionrenovables.org/wp-content/uploads/2021/10/20211006-El-papel-del-hidrogeno-en-la-transicion-energetica.pdf

Gallego, D. (2021, 8 de noviembre). El número de delegados del sector de los combustibles fósiles superó al de cualquier país en la COP26. *Anadolu Agency (AA)*. Consultado en https://www.aa.com.tr/es/mundo/el-n%C3%BAmero-de-delegados-del-sector-de-los-combustibles-f%C3%B3siles-super%C3%B3-al-de-cualquier-pa%C3%ADs-en-la-cop26/2415287

García Howell, D. (2021) *Are we advancing in the transition of the energy matrix in Latin America? Analysis and considerations. Konrad Adenauer Stintung & Asociación Peruana de Derecho Ambiental*. Consultado en https://www.kas.de/documents/273477/5442457/Are+we+advancing+in+the+transition+of+the+energy+matrix+in+Latin+America.pdf/811ae7f5-86f6-1b45-6d27-987a42389406?version=1.0&t=1611057887948#:~:text=The%20term%20%E2%80%9Cenergy%20matrix%E2%80%9D%20can,sources%20(Miciula%2C%202019)

Glasgow Financial Alliance for Net Zero (GFANZ). (2021).*About us*. Consultado en https://www.gfanzero.com/about/

Global CCS Institute. (2018). *Pre-combustion CO_2 Capture*. Consultado en https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2018/12/Pre-Combustion-Capture.png

Global CCS Institute. (2022a). *Carbon Capture And Storage Images*. Consultado en https://www.globalccsinstitute.com/resources/ccs-image-library/

Global CCS Institute. (2022b). *CCS in the latest IPCC report "Mitigation of Climate Change"*. Consultado en https://www.globalccsinstitute.com/wp-con-

tent/uploads/2022/04/CCS-in-the-latest-IPCC-report-%E2%80%9C-Mitigation-of-Climate-Change%E2%80%9D-April-2022-1.pdf

González, C. & Barney, J. (2019) *El viento del este llega con revoluciones. Multinacionales y transición con energía eólica en territorio Wayuu*. Colombia: Indepaz.

Google Maps (2022, 30 de junio). Índice de estrés hídrico. 30 de junio de 2022, Consultado en https://www.google.com/maps/d/embed?mid=1PJX-j4wGnnQvFxSZctTNjNqHEX5tk2ZWP

Groizard, J., Howarth , R. & Jacobson, M. (2022). *Debates para un futuro sostenible: los grandes temas medioambientales afrontados por dos expertos desde diferentes puntos de vista*. Consultado en https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/debates/hidrógeno-verde-transicion-energetica

Groll, S. (2021). Energía para un futuro neutro desde el punto de vista climático. 15 datos sobre el hidrógeno. *Böll Datos*. Heinrich-Böll-Stiftung. Consultado en https://co.boell.org/es/2022/07/29/energia-para-un-futuro-neutro-desde-el-punto-de-vista-climatico

Groll, S. (2021, 27 de octubre). *Diez cosas que debe saber sobre el hidrógeno ahora*.. Heinrich-Böll-Stiftung. Consultado en https://co.boell.org/es/2021/10/27/diez-cosas-que-debe-saber-sobre-el-hidrógeno-ahora

Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas (GEEDS)-Universidad de Valladolid (Uva). (2021, 28 de septiembre). *Comentarios de GEEDS-UVa a la iniciativa España 2050*. Consultado en https://geeds.es/news/comentarios-de-geeds-uva-a-la-iniciativa-espana-2050/

Hamburg, S. & Ocko, I. (2022, 7 de marzo). For hydrogen to be a climate solution, leaks must be tackled. *Environmental Defense Fund*. Consultado en https://www.edf.org/blog/2022/03/07/hydrogen-climate-solution-leaks-must-be-tackled

Hamburg, S., & Ocko, I. (2022, 20 de julio). Climate consequences of hydrogen emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics, 22, 14*. Consultado en https://acp.copernicus.org/articles/22/9349/2022/acp-22-9349-2022-discussion.html

Hay, R. (2022, 31 de marzo). Hydrogen's civil war reveals its winner. *Reuters*. Consultado en https://www.reuters.com/article/us-energy-hydrogen-breakingviews-idDEKCN2LS18T

Healy, N. y Barry, J. (2017). Politicizing energy justice and energy system transitions: Fossil fuel divestment and a "just transition". *Energy Policy, 108*. pp 451–59. Consultado en https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.06.014

Heinemann, C. & Mendelevitch, R. (2021, diciembre). Sustainability dimensions of imported hydrogen. Working Paper 8/2021 Öko-Institut e.V.

/ Oeko-Institut e.V. Consultado en www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-imported-hydrogen.pdf

Howarth, RW & Jacobson, MZ. (2021) How green is blue hydrogen? Energy Sci Eng. 2021; 9: 1676– 1687. https://doi.org/10.1002/ese3.956

Hurst, L. (2021). El mundo regresó a los combustibles fósiles tras la pandemia, según datos de BP. *Bloomberg* Línea. Consultado en https://www.bloomberglinea.com/2022/06/28/el-mundo-regreso-a-los-combustibles-fosiles-tras-la-pandemia-segun-datos-de-bp/

Husar, J. (2022). Hidrógeno bajo en carbono en América Latina: El rol de los hacedores de política pública en el impulso a la producción de este combustible limpio. Consultado en https://h2lac.org/noticias/hidrógeno-bajo-en-carbono-en-america-latina-el-rol-de-los-hacedores-de-politica-publica-en-el-impulso-a-la-produccion-de-este-combustible-limpio/

Hydrogen Council. (2021). The Hydrogen Council – An introduction. Consultado en https://hydrogencouncil.com/en/

Iberdrola. (2022). Iberdrola instala la mayor planta de hidrógeno verde para uso industrial en Europa. Consultado en https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde/puertollano-planta-hidrogeno-verde

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis*. Consultado en https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-3-6.html

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Consultado en https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/

International Energy Agency, IEA. (2019, junio). *The future of hydrogen. Seizing today's opportunities*. Report prepared by the IEA for the G20, Japan. Consultado https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf

International Energy Agency, IEA. (2021a, agosto). *Hydrogen in Latin America. From near-term opportunities to large-scale deployment*. Consultado en https://iea.blob.core.windows.net/assets/65d4d887-c04d-4a1b-8d4c-2bec908a1737/IEA_HydrogeninLatinAmerica_Fullreport.pdf

International Energy Agency, IEA. (2021b, octubre). *Hydrogen Projects Database*. Consultado en https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database

International Energy Agency, IEA. (2021c, noviembre). *Hydrogen*. Consultado en https://www.iea.org/reports/hydrogen

International Renewable Energy Agency, Irena. (2022a, enero). *Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor*. Consultado en https://irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen

International Renewable Energy Agency, Irena. (2022b, 15 de enero). *La economía del hidrógeno apunta a una nueva dinámica de poder mundial. Comunicado de prensa.* Consultado en https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Press-Release/2022/Jan/Geo-Hydrogen/Press-Release---Geopolitics_ES.pdf?la=en&hash=2890276A64B69EC7028D83225AAE05F65BDDB868

Jacobo, J. (2020, 13 de diciembre). Why green hydrogen is the renewable energy source to watch in 2021. *Abc News*. Consultado en https://abcnews.go.com/Technology/green-hydrogen-renewable-energy-source-watch-2021/story?id=74128340

Jano, S. (2022, 19 de abril). Los daños ambientales irreversibles que pueden generar las plantas desalinizadoras. *Ladera Sur*. Consultado en https://laderasur.com/articulo/los-danos-ambientales-irreversibles-que-pueden-generar-las-plantas-desalinizadoras/

Jessop, S. & Abnett, K. (2021, 4 de noviembre). U.S., Canada among 20 countries to commit to stop financing fossil fuels abroad. *Reuters*. Consultado en https://www.reuters.com/business/cop/19-countries-plan-cop26-deal-end-financing-fossil-fuels-abroad-sources-2021-11-03/

Jorquera, C. (2021, 1º de julio) 3 proyectos piloto de energía geotérmica desarrollados en Colombia. *Piensa en geotermia*. Consultado en https://www.piensageotermia.com/3-proyectos-piloto-de-energia-geotermica-desarrollados-en-colombia/

JP. Morgan Chase. (2021). JPMorgan Chase Targets More Than $2.5 Trillion over 10 Years to Advance Climate Action and Sustainable Development. *News. JP. Morgan Chase*. Consultado en https://www.jpmorganchase.com/news-stories/jpmc-to-advance-climate-action-and-sustainable-dev-goals

Junta de Castilla y León. (2022a). El hidrógeno y las pilas de combustible. *Energía y Minería en Castilla y León*. Consultado en https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/unidad-hidrogeno-pilas-combustible.html

Junta de Castilla y León. (2022b). Almacenamiento, transporte y distribución del hidrógeno. *Energía y Minería en Castilla y León*. Consultado en https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/almacenamiento-transporte-distribucion.html

Latin Clima. Red de Comunicación en Cambio Climático (2021, 11 de noviembre). Diez gobiernos nacionales y subnacionales lanzan alianza para eliminación gradual de petróleo y gas. *Latin Clima*. Consultado en https://latinclima.org/articulos/diez-gobiernos-nacionales-y-subnacionales-lanzan-alianza-para-eliminacion-gradual-de

Linares, J., Moratilla, Y. & Pinilla, E. (2020). *El papel del hidrógeno dorado en la descarbonización del sector residencial*. Consultado en https://www.comillas.edu/images/catedras/catedra-rafael-marino/2021-2022/Comunicacion_Linares-Moratilla-Arenas_FINAL.pdf

Mapfre Global Risks. (2021). *La seguridad en la industria del hidrógeno verde*. Consultado en https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/articulos/la-seguridad-en-la-industria-del-hidrógeno-verde/

Medinilla, M. (2021, 6 de noviembre). Países de la región se alían para impulsar el hidrógeno verde en Latinoamérica. Consultado en Países de la región se alían para impulsar el hidrógeno verde en Latinoamérica. *Energía Estratégica*. Consultado en https://www.energiaestrategica.com/varios-paises-de-la-region-se-alian-para-impulsar-el-hidrogeno-verde-en-latinoamerica/

Mendoza, A. (2006, marzo-junio). El hidrógeno y la energía. *Ciencia Ergo Sum, 13, 1*, pp. 99-104 Consultado en Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal: https://www.redalyc.org/pdf/104/10413113.pdf

Meridian Energy & Contact Energy (Contact) and McKinsey & Company. (2021, julio). *The New Zealand hydrogen opportunity. A perspective on New Zealand's potential role in the emerging global hydrogen economy*. Consultado en https://www.datocms-assets.com/49051/1626295071-the-nz-hydrogen-opportunity.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS. (2020). *NDC de Colombia*. Consultado en https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/05/NDC_Libro_final_digital-1.pdf

Ministerio de Minas y Energía (Minenergía)-Fondo de Energías No Convencionales y de Gestión Eficiente de la Energía (Fenoge). (2022, 18 de julio). El gobierno a través de Fenoge financiará 10 proyectos de la primera convocatoria de hidrógeno verde y azul en Colombia, por una suma de $ 6.500 millones de pesos. *Minenergía-Fenoge*. Consultado en https://fenoge.gov.co/wp-content/uploads/2022/07/18-JUL-22-Comunicado-final-Presentacio%CC%81n-de-Resultados-H2-Colombia-FENOGE.pdf

Ministerio de Minas y Energía, Minenergía (2021). *Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia*. Consultado en https://

www.minenergia.gov.co/static/legado_transicion_energetica/src/document/TRANSICION%20ENERGETICA%20COLOMBIA%20BID-MINENERGIA-2403.pdf

Ministerio de Minas y Energía, Minenergía. (2020). *La transición energética de Colombia. Memorias al Congreso*. Consultado en https://www.minenergia.gov.co/documents/5744/Memorias_al_Congreso_2019-2020.pdf

Ministerio de Minas y Energía, Minenergía. (2021a). *Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia*. Consultado en https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrógeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrógeno%20Colombia_2810.pdf

Mulero, A. (2018). Temas 3: Combustibles y energía renovables. Consultado en https://www.yumpu.com/es/document/view/14726157/tema-3-combustibles-y-energias-renovables

Murcia, D. (2020). *Estándares sobre cambio climático y ambiente y derechos humanos. Documento de referencia para el trabajo en derechos humanos y ambiente*. Bogotá: Centro de Información Sobre Empresas y Derechos Humanos.

Naciones Unidas. (2015). Objetivo 14: Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos. *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Consultado en https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/oceans/#:~:text=Los%20oc%C3%A9anos%20sirven%20como%20la,de%20200%20millones%20de%20personas

Naciones Unidas-Acción por el Clima. (2022). *Llegar a las emisiones netas cero: el mundo se compromete a tomar medidas*. Consultado en https://www.un.org/es/climatechange/net-zero-coalition#:~:text=cero%20en%202050.-,2030,con%20los%20niveles%20de%202010

Naciones Unidas-Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. (2019, 17 de junio). *La población mundial sigue en aumento, aunque sea cada vez más vieja*. Consultado en https://www.un.org/development/desa/es/news/population/world-population-prospects-2019.html#:~:text=La%20poblaci%C3%B3n%20mundial%20aumentar%C3%A1%20en,informe%20de%20las%20Naciones%20Unidas

Naciones Unidas-Noticias ONU (2021, 11 de noviembre). *COP26: Las promesas "suenan huecas" cuando los combustibles fósiles siguen recibiendo billones en subvenciones, dice Guterres*. Consultado en https://news.un.org/es/story/2021/11/1499902

Naturgás. (2022, 18 de marzo). *Promigas pone en marcha piloto de producción de hidrógeno verde e inyección en redes de gas natural en Colombia*. Consultado en https://naturgas.com.co/wp-content/uploads/2022/03/promigas-comunicado-inauguracion-estacion-hidrógeno.pdf

New Jersey Department of Health. (2016). *Hoja informativa sobre sustancias peligrosas: hidrógeno. Derecho a saber*. Traducción: marzo de 2017. Consultado en https://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1010sp.pdf

Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, UNDRR. (s.f.). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*. Consultado en https://www.unisdr.org/files/43291_spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf

Ojea, L. (2021, 2 de mayo). El "arcoíris del hidrógeno": guía para no perderse en la energía del futuro. *Invertia*. Consultado en https://www.elespanol.com/invertia/empresas/energia/20210502/arcoiris-hidrógeno-guia-no-perderse-energia-futuro/577942591_0.html

Organización Latinoamericana de Energía, Olade. (2015). *Riesgos de la explotación de los hidrocarburos no convencionales en América Latina y el Caribe*. Consultado en https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0340.pdf

Organización Latinoamericana de Energía, Olade. (2021) *Panorama energético de América Latina y el Caribe*. Consultado en https://www.olade.org/publicaciones/panorama-energetico-de-america-latina-y-el-caribe-2021/

Orozco, J. & Mariani, P. (2022, 1º de agosto). German MP says Colombian open pit mine hurts local environment amid Berlin's plans to buy coal. *France 24*. Consultado en https://www.france24.com/en/americas/20220801-german-mp-says-colombian-open-pit-mine-hurts-local-environment-amid-berlin-s-plans-to-buy-coal

Parra, M. (2020). *Procesos de obtención de hidrógeno y sus posibilidades presentes y futuras*. Consultado en https://www.linkedin.com/pulse/procesos-de-obtenci%C3%B3n-hidr%C3%B3geno-y-sus-posibilidades-manuel/?originalSubdomain=es

Pellow, M., Emott, C., Barnhart, C. & Benson, S. (2015, 18 de abril). Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis. *Energy Environ. Sci., 2015, 8*. Consultado en https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2015/ee/c4ee04041d

Pérez, A. (2022, 12 de junio). Las mil caras del hidrógeno: del color marrón al dorado. *elEconomista.es*. Consultado en https://www.eleconomista.es/energia/noticias/11813705/06/22/Las-mil-caras-del-hidrógeno-del-color-marron-al-dorado.html

Pérez, A. (2022, 29 de junio). Expertos: Exportar más carbón de Colombia a Europa aumentará ecocidio y violaciones a DDHH. *Radio Francia Internacional, RFI*. Consultado en https://www.rfi.fr/es/am%C3%A9ricas/20220629-importar-carb%C3%B3n-de-colombia-aumentar%C3%A1-el-ecocidio-anticipan-expertos

Pieper, Oliver. (2022, 26 de mayo). Germany's dirty Colombian coal. *Deutsche Welle.* Consultado en https://www.dw.com/en/germanys-dirty-colombian-coal/a-61935515

Pistonesi, H., Bravo, G. & Contreras Lisperguer, R. (2019). *Mapeo situacional de la planificación energética regional y desafíos en la integración de energías renovables: hacia una planificación sostenible para la integración energética regional*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Cepal. Consultado en https://www.cepal.org/es/publicaciones/44937-mapeo-situacional-la-planificacion-energetica-regional-desafios-la-integracion

Plataforma para el Desarrollo del Hidrógeno Verde en Latinoamérica y el Caribe, H2LAC. (2022). *H2LAC Review*. Consultado en https://h2lac.org/h2lac-review/

Pollos, J. & Armiño, B. (2021, enero). Episodio 1. ¿Por qué el hidrógeno? *El Pódcast del hidrógeno*. Consultado en https://open.spotify.com/episode/07F0D3nD2m0JUy6lapAdr2?si=51b78fa0a5ca4ae0&nd=1

Proaño, M. (2021, diciembre). Hidrógeno verde. ¿Una oportunidad para la transición energética justa, democrática y popular en Latinoamérica? *Energía Mundo, 3, pp 76-82*, Consultado en https://co.boell.org/sites/default/files/2021-12/E_y_E_2021-N3_Energia_Mundo.pdf#page=77

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD. (2022). *Energía*. Consultado en https://climatepromise.undp.org/es/what-we-do/areas-of-work/energia

Rainforest Action Network. (2021). *Banking on climate chaos*. Consultado en https://www.bankingonclimatechaos.org/bankingonclimatechaos2021/

Relatoría Especial sobre Derechos Económicos, Sociales, Culturales y Ambientales, Redesca-Comisión Interamericana de Derechos Humanos. (2019, 1º de noviembre). *Empresas y derechos humanos. Estándares interamericanos*. OEA/Ser.L/V/II CIDH/REDESCA/INF.1/19. Consultado en http://www.oas.org/es/cidh/informes/pdfs/EmpresasDDHH.pdf

Research Coordination Network (RCN) on Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS). (2022). What is CCUS? American Institute of Chemical Engineers. Consultado en https://www.aiche.org/ccusnetwork/what-ccus

Riechmann, J. (2003) Tres principios básicos de justicia ambiental. *Revista Internacional de Filosofía Política, 21, p. 103-120*.

Rodas, J, C. & Hernández, M, J. (2019) Las energías renovables no convencionales y sus desafíos regulatorios en Colombia. En Güiza, L., Rodas, J, C., Cifuentes-Guerrero, J. & González, P. (2019). *Energías renovables no convencionales y cambio climático: un análisis para Colombia*. Bogotá: Editorial Universidad de Rosario.

Rodríguez, C (2015). Las nuevas fronteras de la justicia constitucional: la democracia ambiental y las consultas populares en conflictos socioambientales. En C. d. judicial (Ed.), *Memorias Encuentro Constitucional por la Tierra*. Ibagué 17,18 y 19 de septiembre de 2014. Bogotá: Universidad del Rosario. Pp. 407-422.

Salgado, L. & Scandizzo, H. (2021) ¿Humo Verde? Notas y comentarios sobre la promoción del hidrógeno como vector energético (y los negocios en tiempos de transición). *Observatorio Petrolero Sur*. Argentina. Consultado en https://opsur.org.ar/wp-content/uploads/2021/11/Hidrógeno-Verde-informe-final.pdf

Scandizzo, H. (2022, 13 de junio). Por una transición energética justa, popular y sostenible. *Observatorio Petrolero Sur*. Consultado en https://opsur.org.ar/por-una-transicion-energetica-justa-popular-y-sostenible/

Schneider, H. (2019). *Hidrógeno verde en América Latina: posibilidades, barreras y oportunidades*. Konrad Adenauer Stiftung. Consultado en https://www.kas.de/documents/273477/14464285/HIDRÓGENO+VERDE+EN+AMÉRICA+LATINA.pdf/876ad1e8-7989-6a16-174e-9f42f3e53910?version=1.0&t=1631648470139

Shell. (2021). *My hopes for COP26*. Consultado en https://www.shell.com/inside-energy/my-hopes-for-cop26.html

Ullman, A. & Kittner, N. (2022) Environmental impacts associated with hydrogen production in La Guajira, Colombia. *Environ. Res. Commun*. 4, 055003. Consultado en https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac68c8

Unidad de Planeación Minero-Energética, UPME. (2010) *Plan energético nacional 2020- 2050*. Consultado en: https://www1.upme.gov.co/Documents/PEN_IdearioEnergetico2050.pdf

Unidad de Planeación Minero-Energética, UPME. (2015) *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. CONVENIO ATN/FM-12825-CO. Con el financiamiento no reembolsable del Fondo para el Medio Ambiente Mundial - FMAM a través del Banco Interamericano de Desarrollo – BID como agencia implementadora de la cooperación técnica en Inversiones catalizadoras para energía geotérmica: Componente I*. Consultado en http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf

Unidad de Planeación Minero-Energética, UPME. (2020). *Plan Energético Nacional 2020-2050. La transformación energética que habilita el desarrollo sostenible. Colombia*. Consultado en: https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/PEN.aspx#:~:text=Plan%20Energ%C3%A9tico%20Nacional%20PEN%202020,los%20posibles%20caminos%20para%20alcanzarla.

United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC. (2022, 8 de marzo). *Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement on its third session, held in Glasgow from 31 October to 13 November 2021*. FCCC/PA/CMA/2021/10/Add.1. Consultado en https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_10_add1_adv.pdf

United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC. (2021, 16 de septiembre). *Informe de síntesis completo de las NDC: algunos avances, pero todavía una gran preocupación*. Consultado en https://unfccc.int/es/news/informe-de-sintesis-completo-de-las-ndc-algunos-avances-pero-todavia-una-gran-preocupacion

Vallejo, J. & Liberona, F. (Eds.). (2012). *Bahía de Quintero: Zona de Sacrificio. Una Perspectiva desde la Justicia Ambiental*. Fundación Terram APP Nº 54.

Vásquez, R. & Salinas, F. (2018). *Tecnologías de hidrógeno y perspectivas para Chile*. Consultado en https://4echile.cl/wp-content/uploads/2020/07/LIBRO-TECNOLOGIAS-H2-Y-PERSPECTIVAS-CHILE.pdf

Verne, J. (1875). *La isla misteriosa*. Consultado en https://biblioteca.org.ar/libros/133575.pdf

Viñas, M. (2019). Los océanos, el almacén mundial de CO_2. *National Geographic-España*. Consultado en https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/oceanos-almacen-mundial-co2_14206#:~:text=Ya%20se%20est%C3%A1n%20observando%20las,las%20distintas%20formas%20de%20contaminaci%C3%B3n

Voces por el clima. (2021). Concepto de diversas organizaciones de sociedad civil al proyecto de ley no. 365 de 2020 del Senado – 565 de 2021 de la Cámara. Consultado en https://co.boell.org/es/2021/06/16/concepto-de-diversas-organizaciones-de-sociedad-civil-al-proyecto-de-ley-no-365-de-2020.

Webber, M. (2007). The water intensity of the transitional hydrogen economy. Consultado en https://www.researchgate.net/publication/231002547_The_water_intensity_of_the_transitional_hydrogen_economy

World Energy Council. (2020). *Trilema energético*. Consultado en https://wecpanama.org/acerca/trilema-energetico/

Yoldi, M. (2022, 22 de julio). Las piedras en el camino de las renovables. *CincoDías. El País Economía*. Consultado en https://cincodias.elpais.com/cincodias/2022/07/20/companias/1658321188_558919.html

Zografos, C. & Robbins, P. (2020). Green Sacrifice Zones, or Why a Green New Deal Cannot Ignore the Cost Shifts of Just Transitions, *One Earth, 3, 5*. Consultado en https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.012

Zschimmer & Schwarz. (2020, 7 de enero). ¿Qué es el hidrógeno? 5 cosas que no sabías sobre este elemento químico. Consultado en https://www.zschimmer-schwarz.es/noticias/que-es-el-hidrógeno-5-cosas-que-no-sabias-de-este-elemento-quimico/#:~:text=El%20hidr%C3%B3geno%20fue%20descubierto%20por,de%20que%20existiera%20el%20fuego

Decretos y leyes

Decreto 1476 del 3 de agosto de 2022. *Por el cual se reglamentan los artículos 21 y 23 de la Ley 2099 de 2021 y se adiciona el Titulo VII a la Parle 2 del Libro 2 del Decreto 1073 de 2015, con el fin de adoptar disposiciones dirigidas a promover la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno*. Presidencia de la República de Colombia. Consultado en https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=191408

Ley 26.123 del 2 de agosto de 2006. *Promoción del hidrógeno*. Senado y Cámara de Diputados de la Nación Argentina.

Ley 1665 del 16 de julio de 2013. *Por medio de la cual se aprueba el "Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (Irena)*. Congreso de la República de Colombia. Diario Oficial No. 48.853.

Ley 1715 del 13 de mayo de 2014. *Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional*. Congreso de la República de Colombia. Diario Oficial No. 49.150.

Ley 2099 del 21 de junio 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*. Congreso de la República de Colombia. Diario Oficial No. 52052.

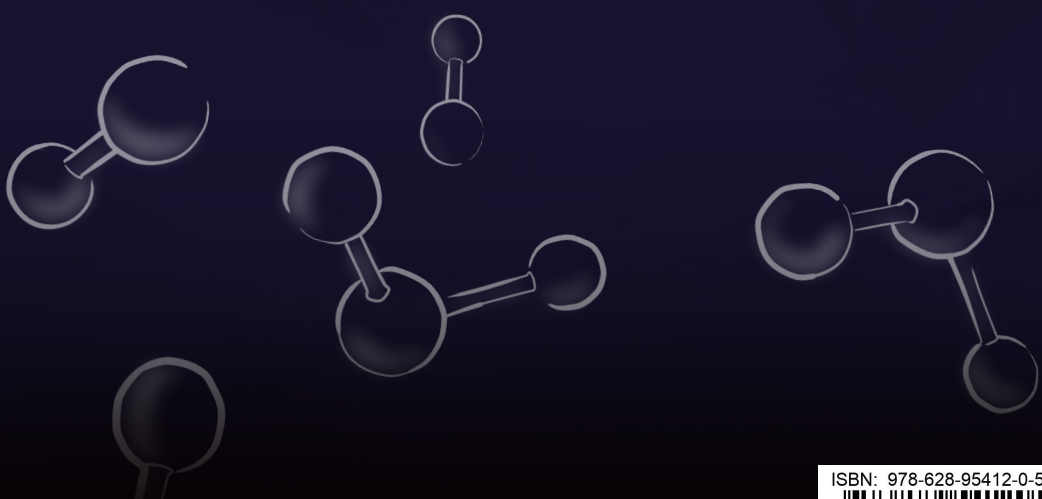
Hidrógeno en Colombia
SI SE HACE MAL, PODRÍA SER PEOR.
Reflexiones sobre su apuesta



HEINRICH BÖLL STIFTUNG
BOGOTÁ
Colombia

El hidrógeno tiene, en un futuro, la posibilidad de modificar toda la geopolítica energética del mundo y quitar el mercado a los que lo poseen, actualmente. Sin embargo, varias preocupaciones aparecen a medida que se observa al hidrógeno como vector energético; en especial, porque, a cambio, puede, más bien, profundizar el monopolio de los que concentran la energía, generar mayor gasto energético y acentuar la crisis climática.

Este libro se construye con el fin de entender el hidrógeno como elemento y como vector energético y para reflexionar sobre cómo se le incluiría y potenciaría en la cadena de valor de los sistemas energéticos presentes y futuros, en los ámbitos global, regional y nacional. Además, para indagar en el rol que tendría Colombia en esta transición y sobre los dilemas que despertaría en materia de los enfoques de democracia y justicia ambiental.



HEINRICH BÖLL STIFTUNG
BOGOTÁ
Colombia

ISBN: 978-628-95412-0-5