

# MANUAL DEL HIDRÓGENO VERDE

Manual ilustrado para entender los  
conceptos básicos fundamentales del  
**Hidrógeno Verde.**



## Sobre el manual

Este manual representa un recurso de difusión y educación elaborado en el marco del proyecto Alianza Estratégica Hidrógeno Verde para el Biobío, una plataforma de acción local para fomentar el desarrollo de la industria del hidrógeno verde en la región del Biobío y macrozona centro-sur de Chile. Su principal objetivo es informar a la comunidad acerca de los conocimientos fundamentales básicos sobre el hidrógeno verde y el rol que este cumple en la descarbonización de la matriz energética. A través de gráficos, mapas e infografías pretendemos brindar a los lectores una alternativa más ilustrativa a las fuentes de información tradicionales. El manual se compone de 6 capítulos, donde se resumen diversos aspectos de la cadena de valor del hidrógeno, incluyendo los métodos de producción, los desafíos de almacenamiento y distribución, las fuentes de demanda y competencia del mercado y mecanismos de financiamientos para proyectos de hidrógeno verde.

Esperamos que este material sea una herramienta útil y visual que permita sensibilizar y capacitar a la ciudadanía sobre la importancia de las energías renovables, invitándolos a involucrarse en los desafíos actuales que enfrentan sus comunidades.

## Agradecimientos

Este manual es una adaptación de un material de formación más profundo desarrollado por la consultora Hincio en el marco del proyecto Alianza estratégica hidrógeno verde para el Biobío.



**Fue elaborado por** la Dra. Javiera Ziehe, Dra. Karin Walter, Tatiana Oliva, Paola Cárdenas y Juan Pablo González, integrantes del equipo de la Alianza Estratégica Hidrógeno Verde para el Biobío. Agradecimiento especial por su apoyo en la redacción, edición y retroalimentación general a Juan Pablo Zuñiga (Hincio), Hans Kulenkampff (Hincio), Dra. Ximena García (UDEC), Dra. Marcela Angulo (UDEC) y Dr. Alejandro Karelovic (UDEC).

Agradecemos también al apoyo financiero brindado por el Gobierno Regional del Biobío a través del Fondo de Innovación para la Competitividad regional (FIC-R).

**Diseño y diagramación:** María José Cid Giacaman

**Ilustración portada:** Constanza Hermsilla



**Imágenes:** Las imágenes usadas en esta publicación corresponden a adaptaciones propias basadas en los originales cuya referencia aparece bajo cada figura y a imágenes libres de derechos extraídas del sitio web [www.shutterstock.com](http://www.shutterstock.com).

**Manual disponible para descarga online:** [www.ah2vbiobio.cl/recursos](http://www.ah2vbiobio.cl/recursos)

**Para preguntas y/o comentarios:** [ah2vbiobio@udec.cl](mailto:ah2vbiobio@udec.cl)

A menos que se especifique lo contrario, el material de esta publicación puede ser distribuido, copiado y exhibido por terceros si se muestra en los créditos. No puede ser utilizado para obtener ningún beneficio comercial.

## 1. INTRODUCCIÓN

Calentamiento global y cambio climático	6
¿Qué es el hidrógeno?	7
¿Cómo puede el hidrógeno ayudar a combatir el calentamiento global?	8

## 2. CADENA DE VALOR HIDRÓGENO VERDE

Electricidad y Producción	10
Conversión y almacenamiento	11
Transporte y distribución, reconversión y usos	12

## 3. ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO VERDE

Costos de Producción	14
Costos infraestructura	15
Brechas existentes entre H <sub>2</sub> gris y H <sub>2</sub> verde	16

## 4. MERCADO DEL HIDRÓGENO VERDE

Mercado global del Hidrógeno verde	18
Estrategias Nacionales	19
Estrategia Hidrógeno verde en Chile	20

## 5. HIDRÓGENO VERDE PARA LA REVALORIZACION DE CO<sub>2</sub>

Industria carbono neutral	22
Captura de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	23
Utilización de dióxido de carbono	24
Utilización de dióxido de carbono e hidrógeno para agregar valor	25

## 6. POLÍTICAS PÚBLICAS Y ESTRATEGIAS DE FINANCIAMIENTO

Tipología de instrumentos de apoyo en el ciclo de innovación inversión	27
Subsidios a investigación, desarrollo, innovación e inversión temprana	28
Mecanismos de financiamiento	29

# ABREVIACIONES

<b>BoP:</b>	Balance de planta (Balance of plant)
<b>BTX:</b>	Benceno, tolueno y xileno
<b>BUSD:</b>	Billones de dólares estadounidenses
<b>CAPEX:</b>	Inversión en bienes de capital (Capital expenditure)
<b>CGH<sub>2</sub>:</b>	Hidrógeno gaseoso comprimido (Compressed gaseous hydrogen)
<b>CO<sub>2</sub>:</b>	Dióxido de carbono
<b>CO<sub>2</sub>eq:</b>	Dióxido de carbono equivalente
<b>FT:</b>	Síntesis de Fischer Tropsch
<b>GT:</b>	Gigatoneladas
<b>GW:</b>	Gigavatios
<b>HHV:</b>	Poder calorífico superior (High heating value)
<b>H<sub>2</sub>:</b>	Hidrógeno molecular o dihidrógeno
<b>HRS:</b>	Estación de carga de hidrógeno (Hydrogen Refueling Station)
<b>I+D+i:</b>	Investigación, desarrollo e innovación
<b>I+D:</b>	Investigación y desarrollo
<b>JCM:</b>	Mecanismo de Acreditación Conjunta (Joint Crediting Mechanism)
<b>kWh:</b>	Kilovatio hora
<b>LH<sub>2</sub>:</b>	Hidrógeno líquido (Liquid hydrogen)
<b>LCOH:</b>	Costo nivelado del hidrógeno (Levelized cost of hydrogen)
<b>LCHC:</b>	Portadores químicos de hidrógeno en fase líquida (Liquid phase chemical hydrogen carriers)
<b>LCOE:</b>	Costo nivelado de la electricidad (Levelized cost of electricity)
<b>LHV:</b>	Poder calorífico inferior (Low heating value)
<b>LOHC:</b>	Portador de hidrógeno mediante líquidos orgánicos (Liquid organic hydrogen carriers)
<b>MCH:</b>	Metil-ciclohexano
<b>MW:</b>	Megavatios
<b>MWh:</b>	Megavatios hora
<b>MMBTU:</b>	Un millón de unidades térmicas británicas (Million british thermal units)
<b>MRV:</b>	Medición, reporte y verificación
<b>MOFs:</b>	Estructuras metal-orgánicas (Metal organic frameworks)
<b>MTO:</b>	Metanol a olefinas
<b>Mton:</b>	Megatonelada
<b>Nm<sup>3</sup>:</b>	Normal metro cúbico
<b>NDC:</b>	Contribución determinada a nivel nacional (Nationally Determined Contributions)
<b>OPEX:</b>	Gasto operativo (Operational expenditures)
<b>PIB:</b>	Producto interno bruto
<b>SMR:</b>	Reformado de metano con vapor (Steam methane reforming)
<b>T&amp;D:</b>	Transporte y distribución
<b>TCO:</b>	Costo total de propiedad (Total cost of ownership)
<b>TRL:</b>	Technology Readiness Levels / Nivel de madurez tecnológica
<b>Ton:</b>	Tonelada
<b>TWh:</b>	Teravatio hora
<b>USD:</b>	Dólar estadounidense
<b>%vol.:</b>	Porcentaje en volumen
<b>WACC:</b>	Coste medio ponderado del capital (Weighted Average Cost of Capital)

# 1. Introducción

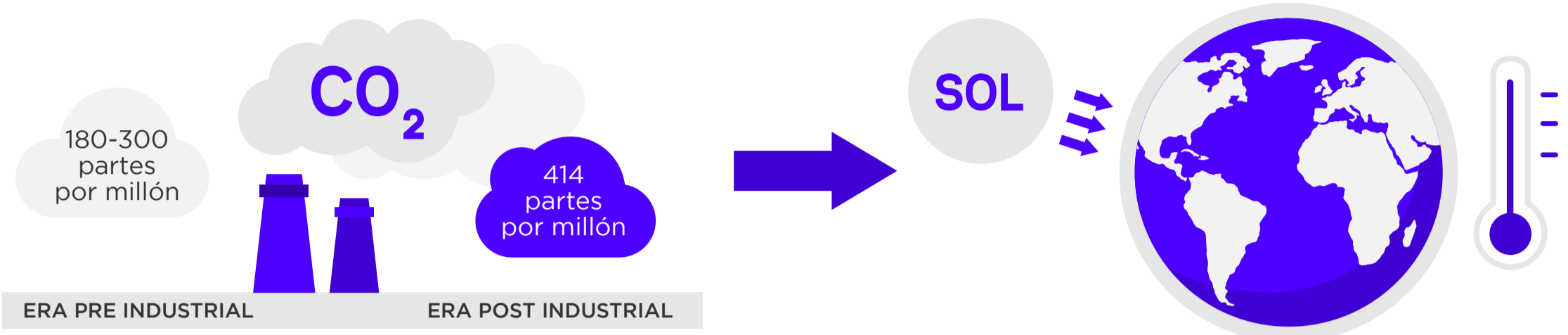


## MENSAJES CLAVES

- El explosivo aumento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera ha elevado la temperatura del planeta provocando el calentamiento global con efectos devastadores sobre el medio ambiente. Para mitigar estos efectos, se debe mantener el aumento de la temperatura global promedio por debajo de los 2°C, y perseguir esfuerzos para limitar el aumento a 1.5°C. Para lograr esta meta, las concentraciones de CO<sub>2</sub> deben disminuir drásticamente.
- El hidrógeno verde es un portador de energía no contaminante que se produce a través de la electrólisis del agua utilizando recursos energéticos renovables como energía eólica o solar y se puede oxidar (reaccionar con oxígeno) para producir calor y/o electricidad sin emitir CO<sub>2</sub>.
- Es un vector energético muy versátil ya que puede transformarse en electricidad o combustibles sintéticos y utilizarse con fines domésticos, comerciales, industriales o de movilidad. Es una solución energética que conecta a distintos sistemas energéticos y presenta una oportunidad particularmente importante para sectores difíciles de descarbonizar como el transporte pesado, los procesos de alta temperatura en la industria y la aviación, donde no se dispone de una solución eléctrica y todavía se necesita un combustible sostenible.
- Chile tiene condiciones privilegiadas para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde ya que es rico en energías renovables necesarias para su producción. Posee fuertes vientos de norte a sur para desarrollar la energía eólica y la radiación solar más alta del mundo en el desierto de Atacama. Estas ventajas podrían convertir a Chile en el productor más eficiente y competitivo de hidrógeno verde en el mundo.

# Cambio Climático y Calentamiento Global

Incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera ha generado un aumento de la temperatura global.



Desde la revolución industrial, las **concentraciones de CO<sub>2</sub> han aumentado más de un 30%** y se encuentran en el nivel más alto que en cualquier momento en al menos los últimos **800.000 años.**

La gran concentración de **CO<sub>2</sub> en la atmósfera** absorbe radiación solar elevando la temperatura de la tierra produciendo:

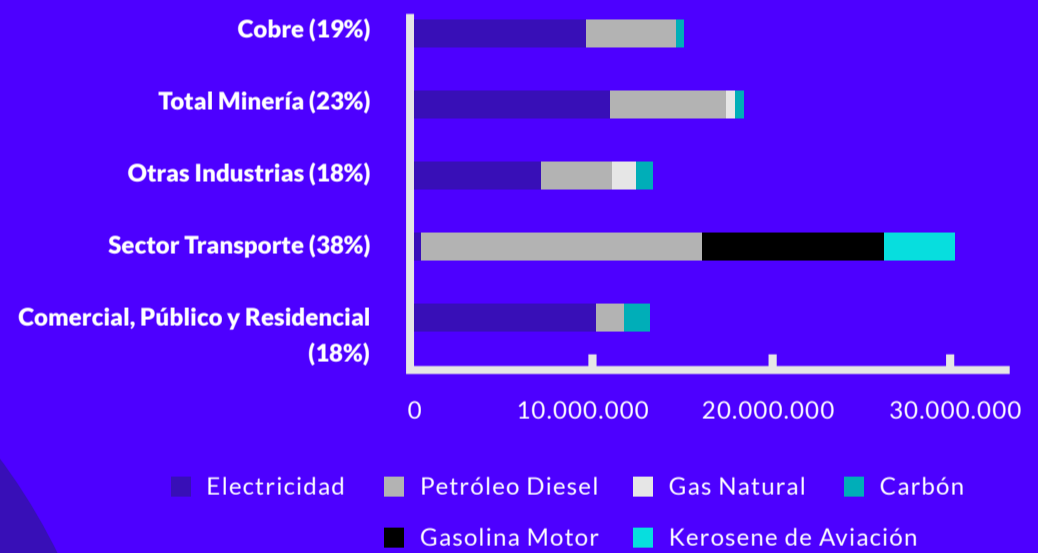
## El calentamiento global.

### ¿De dónde proviene este CO<sub>2</sub>?

Mundialmente, se emiten 52 mil millones de toneladas (=52 giga toneladas) de CO<sub>2</sub> a la atmósfera al año que proviene de los siguientes sectores:



**Chile** contribuye con aproximadamente un 0.1% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>.



Fuente: Generado con datos del Balance Nacional de Energía, 2017.

### Consecuencias del aumento de temperatura

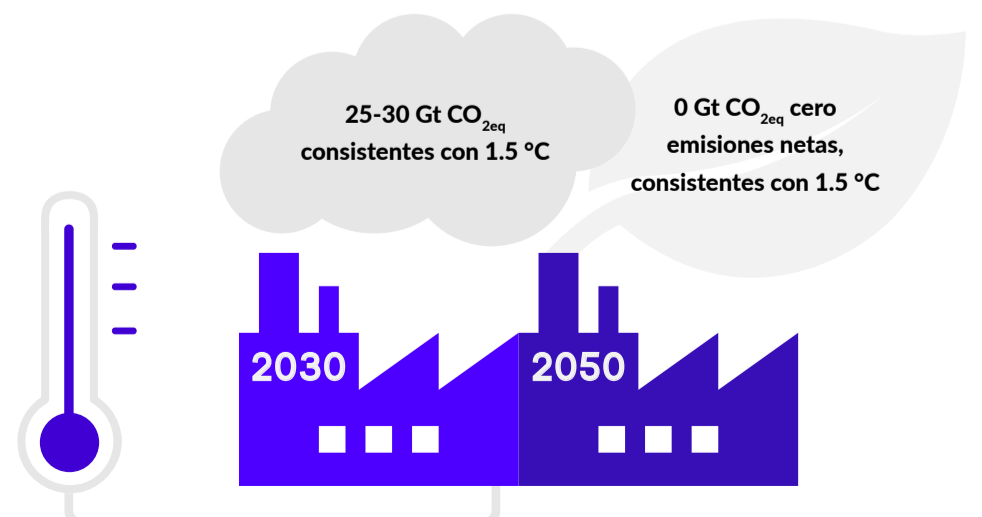
- Clima Severo** (Icon: Cloud with lightning)
- Aumento nivel del mar** (Icon: Waves)
- Disminución en el rendimiento de cultivos** (Icon: Plant)
- Disminución disponibilidad de agua fresca** (Icon: Water drop)
- Blanqueamiento de corales** (Icon: Coral)

Para lograr esta meta, las **emisiones de CO<sub>2</sub> deben disminuir al 2030 en alrededor de 45%** comparado con los niveles de 2010 y **llegar a emisiones netas cero al 2050.**

### ¿Qué podemos hacer para frenar las consecuencias?

#### Acuerdo de París

Primer acuerdo universal para frenar los efectos del cambio climático. El acuerdo busca mantener el aumento de la temperatura global promedio por debajo de los **2°C**, y perseguir esfuerzos para limitar el aumento a **1.5°C**.



# ¿Qué es el Hidrógeno?

## Propiedades



### El más abundante y liviano

Es el primer elemento en la tabla periódica. El más liviano y el más abundante del universo.

### Nunca solo



Se encuentra principalmente en forma de molécula diatómica (H<sub>2</sub>) en estado gaseoso. En la tierra encontramos muy poco hidrógeno libre, y generalmente se encuentra acoplado a otras moléculas, como agua y compuestos de carbono.

### Vector Energético

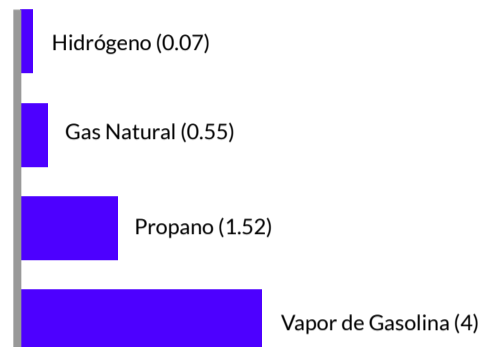


Permite que la energía sea transportada y luego convertida nuevamente en cualquier otra forma de energía. El gas hidrógeno se puede oxidar (reaccionar con oxígeno) para producir calor y/o electricidad sin emitir CO<sub>2</sub>.

### Densidad Relativa



Relativa al Aire

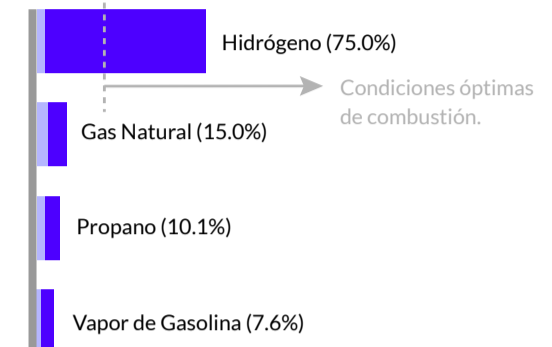


La baja densidad del hidrógeno hace que tenga una **muy alta flotabilidad** comparada con otros combustibles.

### Rango Inflamabilidad



% en Volumen mezcla gas y aire



Establecen la proporción de gas y aire necesario para que se produzca la combustión. **El H<sub>2</sub> presenta un rango más amplio que otros combustibles.**

### Comparación del poder calorífico del H<sub>2</sub> con otros combustibles

El poder calorífico es la cantidad de energía que se puede desprender al producirse una reacción química de oxidación (combustión).



	MJ/kg	MJ/L
Gasolina	43	32
Propano	46	22.8
Gas Natural	47	7.2
<b>Hidrógeno</b>	<b>120</b>	<b>8</b>

El H<sub>2</sub> contiene **gran cantidad de energía por unidad de masa** comparado con los combustibles de uso común.

Sin embargo, en términos de densidad energética volumétrica, es significativamente menor. Por esta razón **su uso para el transporte y aplicaciones de movilidad se realiza a altas presiones.**

## ¿Cómo y de dónde se obtiene?

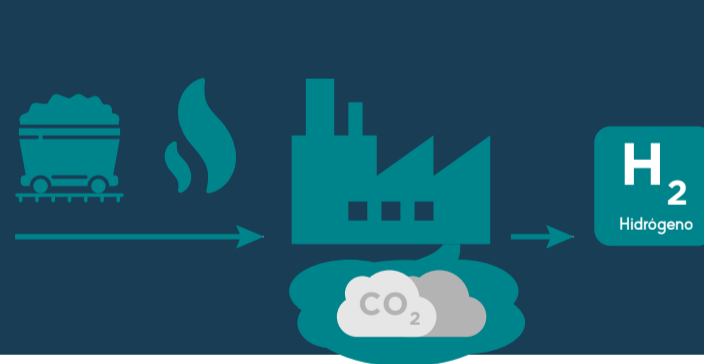
### HIDRÓGENO GRIS

- La mayoría del hidrógeno producido actualmente es gris, derivado de combustibles fósiles.
- Se obtiene a partir del reformado de gas natural o la gasificación del carbón, liberando CO<sub>2</sub> como subproducto.



### HIDRÓGENO AZUL

- Se obtiene utilizando combustibles fósiles a través de los mismos métodos que el hidrógeno gris.
- Su producción considera la captura y almacenamiento del CO<sub>2</sub> liberado en el proceso.



### HIDRÓGENO VERDE

- Se produce a través de la electrólisis del agua, utilizando energía renovables.
- Su producción no genera CO<sub>2</sub>, y el único subproducto generado es oxígeno gaseoso (O<sub>2</sub>).



## Datos físicos, técnicos y noción de proporciones

### DATOS FÍSICOS



#### 1 kg de H<sub>2</sub>

Tiene un LHV de 33KWh  
Equivale a 3,77 L de gasolina  
Alta densidad energética en masa



#### 1 Nm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>

Equivale a 0,34 L de gasolina  
Baja densidad energética volumétrica

### HIDRÓGENO EN LA MOVILIDAD



#### 5-6 kg en el tanque

Dan una autonomía de 500 km en un vehículo liviano  
El tanque está a 700 bar



#### 35-40 kg en el tanque

Dan una autonomía de 450 km en un bus  
El tanque está a 350 bar

### ELECTRÓLISIS DEL AGUA



#### 1 MW de Electrolizador

Genera = 18kg/h de H<sub>2</sub>, es decir, 200 Nm<sup>3</sup>/h. Considerando una eficiencia de 55,5 kWh/kgH<sub>2</sub>.



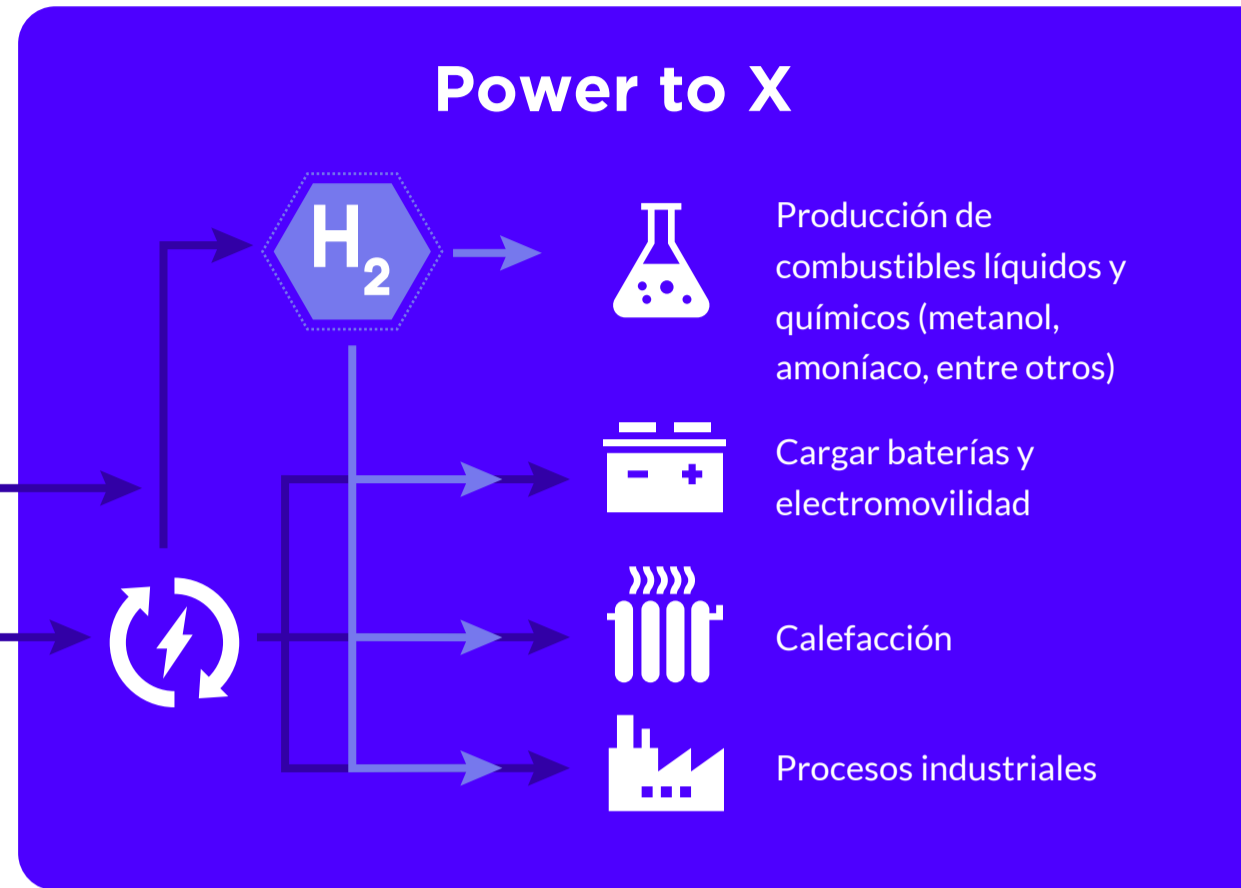
#### 11-12 L de H<sub>2</sub>O

Para producir 1 kg.

# ¿Cómo puede el hidrógeno ayudar a combatir el calentamiento global?

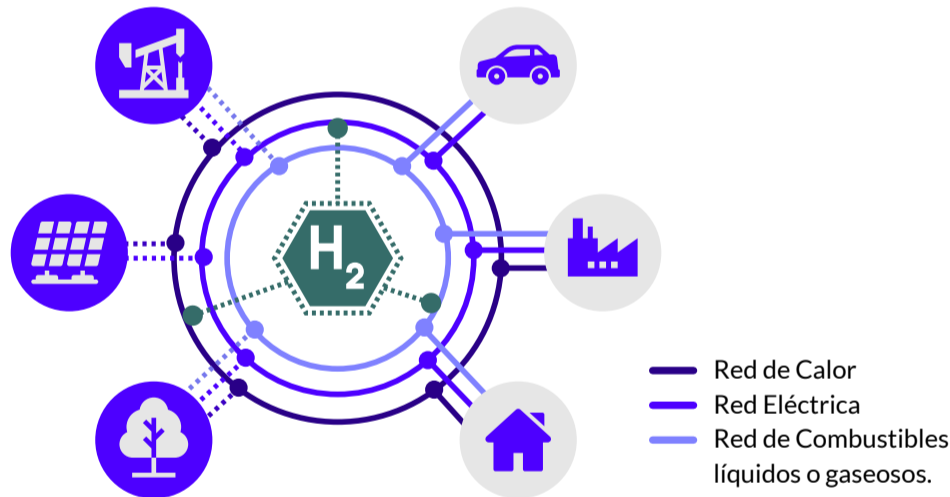
## 3 pasos para la transición energética

Para frenar los efectos del calentamiento global se necesita urgente cambiar el sistema energético basado en combustibles fósiles a uno de bajas emisiones o sin emisiones de CO<sub>2</sub>, basado en fuentes renovables. Este cambio se denomina transición energética o descarbonización de la matriz energética. Este proceso involucra distintos cambios que pueden resumirse en los siguientes pasos:



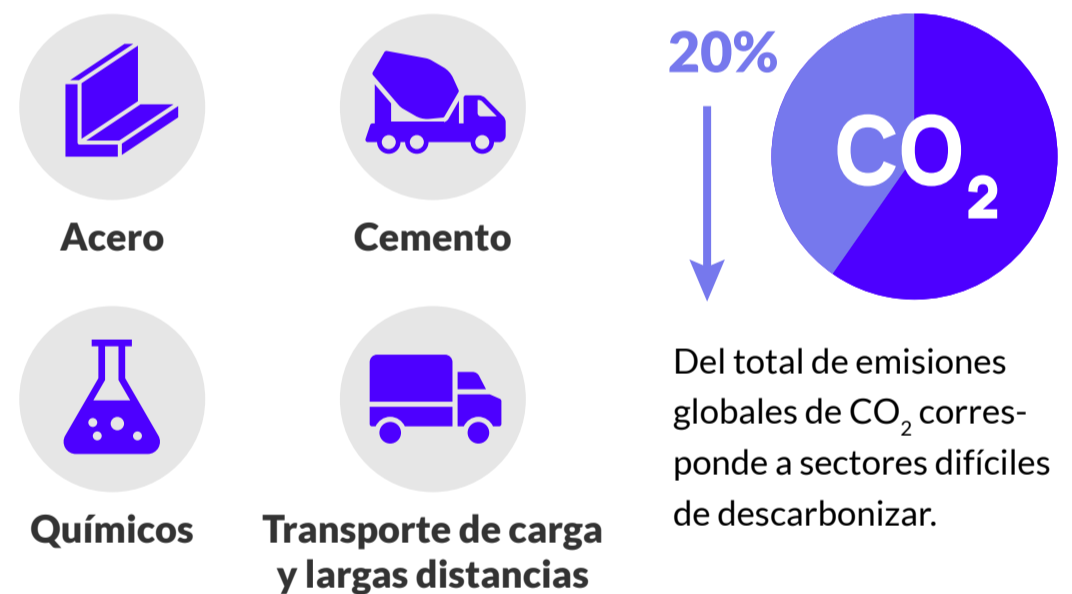
## Permite la descarbonización multisectorial

El hidrógeno es una solución multipropósito que conecta a distintos sistemas energéticos.

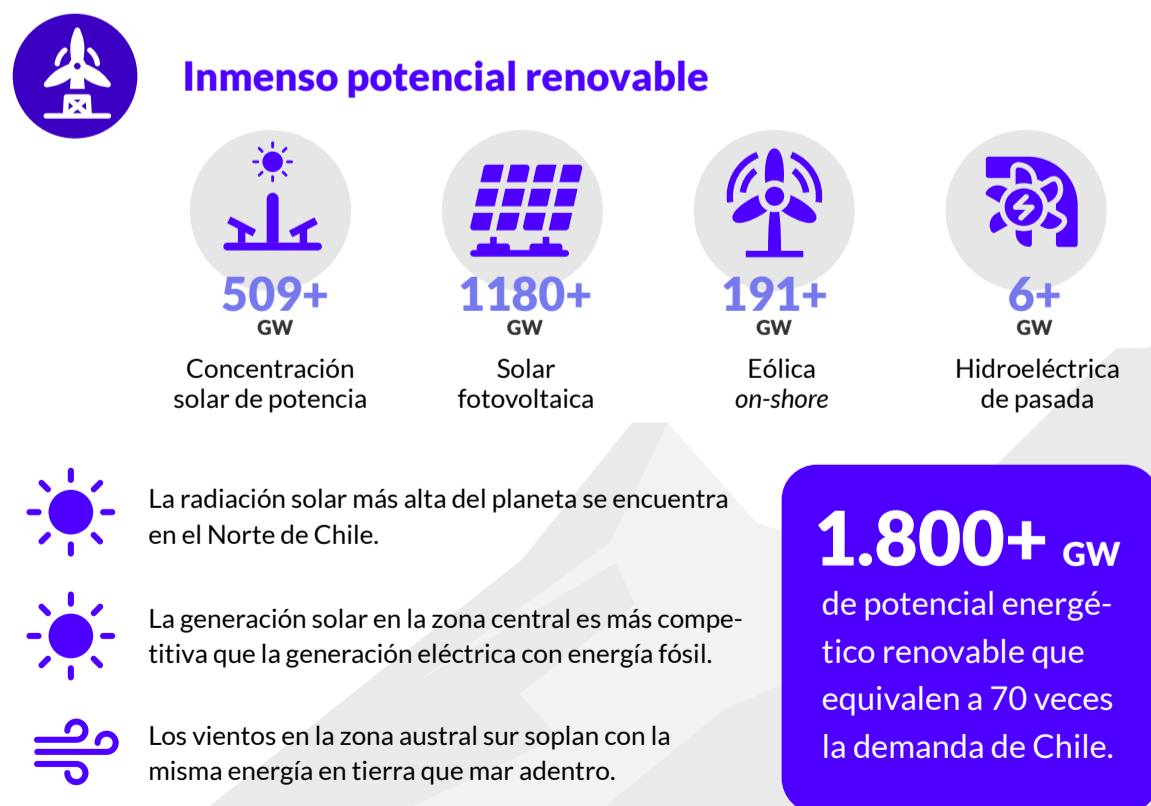


Fuente: Adaptado de Agencia Internacional de Energía, IEA (2017)

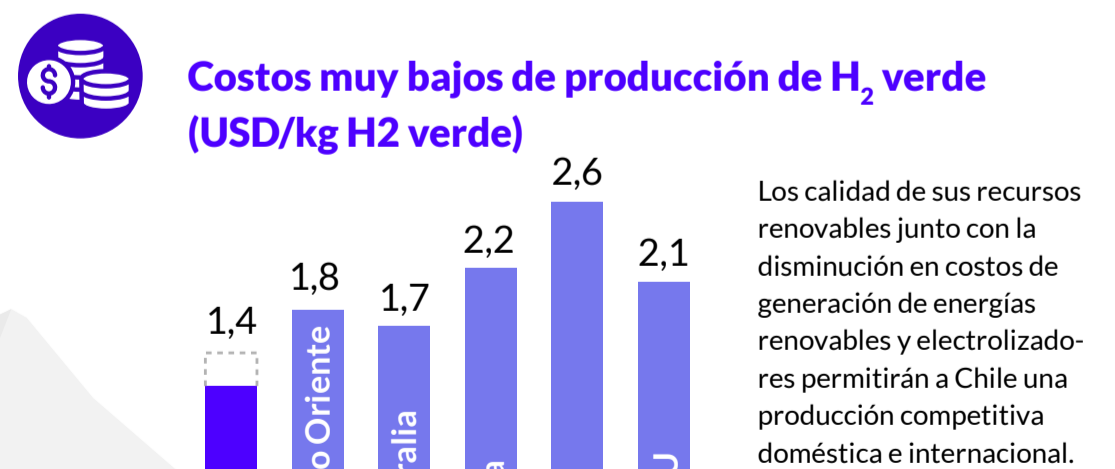
El H<sub>2</sub> verde es clave para la transición energética de sectores difíciles de descarbonizar.



## Fortalezas que hacen de Chile uno de los países más competitivos del mundo



Fuente: Ministerio de Energía



Fuente: Estrategia Nacional de Hidrógeno verde

# 2. Cadena de Valor Hidrógeno Verde



## MENSAJES CLAVES

- La cadena de valor del hidrógeno verde es función de la aplicación final deseada y puede contemplar algunas o todas las siguientes actividades:  
**Generación de electricidad / Producción de hidrógeno verde / Acondicionamiento Almacenamiento / Transporte y distribución / Re-conversión / Uso final**
- La electricidad requerida para la producción de hidrógeno verde puede provenir de diversas fuentes de energía renovable, dentro de ellas las más empleadas en Chile corresponden a la energía solar fotovoltaica y la energía eólica on-shore.
- La producción del hidrógeno verde se lleva usualmente a cabo en un proceso conocido como electrólisis, donde se utiliza energía eléctrica para dissociar la molécula de agua generando gas hidrógeno ( $H_2$ ) y gas oxígeno ( $O_2$ ).
- La selección de la estrategia de acondicionamiento, almacenamiento, transporte y distribución depende del uso final, lo que contempla: para qué (tipo), cuándo (temporalidad), cuánto (volumen) y dónde (distancia) se utilizará este hidrógeno. Esta estrategia puede involucrar procesos de compresión, licuefacción, adsorción física, almacenamiento en hidruros o conversión en portadores químicos de hidrógeno. El  $H_2$  puede ser almacenado en diferentes tipos de sistemas de almacenamientos (estanques, tuberías, cavernas subterráneas, entre otros) y distribuido mediante múltiples medios de transporte (camiones, buques, tuberías, etc). Dependiendo del formato de transporte seleccionado, en ocasiones se requiere un proceso de reconversión para su uso final, lo cual puede involucrar procesos químicos según el carrier elegido.
- Una de las características más interesantes del hidrógeno como vector energético es su versatilidad. Lo anterior se ve reflejado en los múltiples usos posibles en las áreas de: movilidad de carga y de pasajeros, almacenamiento de energía y re-electrificación, calor de alta y baja entalpía, mezcla en gasoductos existentes de gas, reducción de óxidos para la industria del acero o de cobre, entre otros.

# Cadena de Valor del Hidrógeno



## Electricidad

La energía eléctrica necesaria para producir hidrógeno verde debe provenir de fuentes renovables.



Mareomotriz

Hidroeléctrica

Geotérmica

Biomasa

Solar

Eólica

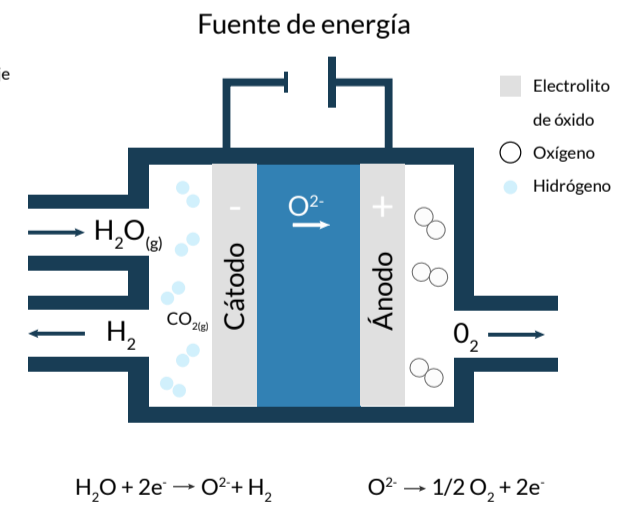
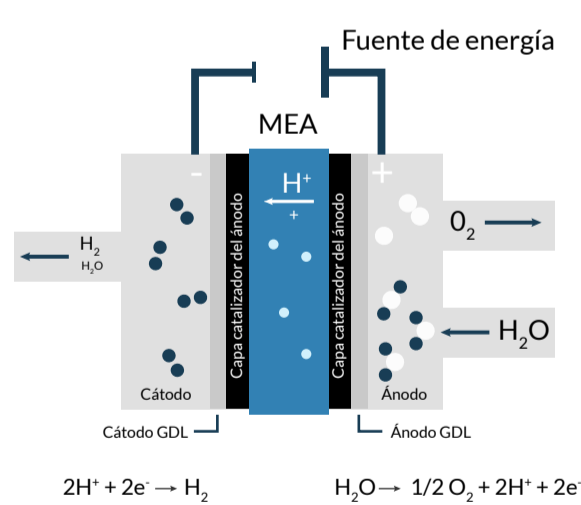
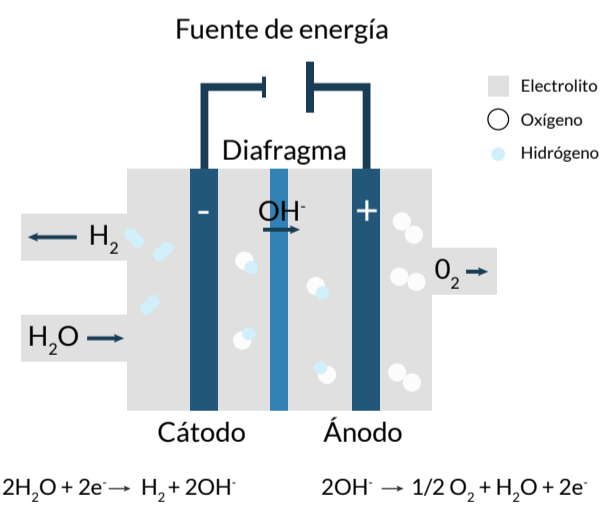
La radiación solar se puede aprovechar para producir electricidad o calor. Se trata de **energía solar fotovoltaica** cuando la radiación solar que incide en unos módulos diseñados para tal fin generan energía eléctrica por efecto fotovoltaico. Se trata de **energía solar térmica** cuando se utiliza la radiación solar directa concentrada para el calentamiento de un fluido.

Corresponde a la energía cinética contenida en las masas de aire en la atmósfera. A través de los aerogeneradores es posible transformar esta energía en electricidad. Estos pueden instalarse en tierra, onshore, o en el mar, offshore. Estos últimos si bien involucran un mayor costo, cuentan con mayor potencia unitaria y generan un menor impacto visual y acústico.

## Producción

La electricidad renovable es utilizada para disociar la molécula de agua generando H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> mediante un proceso electroquímico llamado electrólisis, en equipos conocidos como electrolizadores.

### Tecnologías de electrolizadores:



#### PROCESO

Las moléculas de H<sub>2</sub>O se rompen y los iones OH<sup>-</sup> se transfieren a través de un electrolito alcalino.

#### EFICIENCIA

60% - 70% (LHV)

#### PUREZA H<sub>2</sub> (IMPUREZA)

98 - 99,9% (H<sub>2</sub>, posibles trazas KOH)

#### FORTALEZAS

Tecnología madura / Catalizador no noble / Vida útil de la pila comparativamente larga / Costos comparativamente bajos / Tecnología de la pila madura en el rango de los MW.

#### DEBILIDADES

Bajas densidades de corriente / Cruce de gases / Dinámica baja / Bajas presiones operacionales / Electrolito líquido corrosivo.

#### 2. Electrolizador PEM

Las moléculas de H<sub>2</sub>O se rompen y los iones H<sup>+</sup> se transfieren a través de un electrolito de membrana polimérica.

55% - 65% (LHV)

99,9 - 99,999% (H<sub>2</sub>)

Alta densidad de corriente nominal / Amplio rango de operación / Respuesta dinámica / Altas densidades de potencia peak / Ausencia de fluidos corrosivos / Pureza del gas / Diseño compacto del sistema.

Altos costos de los materiales de la pila / Vida útil actual de la pila es de 50.000 h / Ambiente ácido corrosivo dentro de la pila (pH: 2-4) / Capacidad de la pila, recientemente en escala MW.

#### 3. Electrolizador de Óxido-sólido(SOEC)

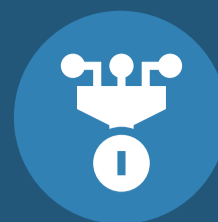
Las moléculas de H<sub>2</sub>O se rompen y los iones O<sup>2-</sup> se transfieren a través de un electrolito de óxido-sólido.

70% - 80% (LHV)

Información no disponible

Eficiencias teóricas de hasta 100% / Catalizadores no nobles / Co-electrólisis / Operación reversible / Altas densidades de corriente / Es posible una operación flexible / Posiblemente el CAPEX más bajo por Nm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> al 2030.

Largos tiempos de encendido y apagado / El tamaño de la celda es limitado / Se requiere una fuente de calor adicional.



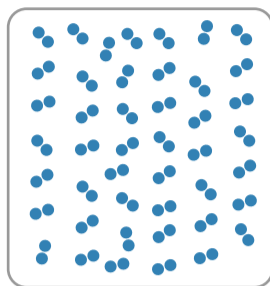
# Acondicionamiento y Almacenamiento

Las características físicas del hidrógeno hacen que sea necesario acondicionarlo para su almacenamiento, transporte y/o uso final.

## Físico

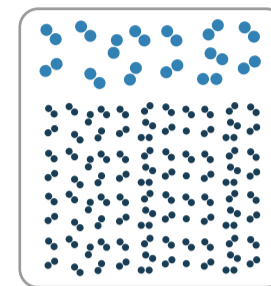
### COMPRESIÓN H<sub>2</sub>

Compresión de H<sub>2</sub> gaseoso a través de diferentes tecnologías de compresores (membrana, pistón, iónico, etc.), dependiendo de nivel de presión final a alcanzar. Las presiones de almacenamiento van de 200 a 800 bar, y la energía requerida es de entre 9 a 16% del LHV del H<sub>2</sub> comprimido.



### LIQUEFACCIÓN H<sub>2</sub>

Proceso físico a presión atmosférica, intensivo en energía, donde se utilizan múltiples ciclos de refrigeración para llevar el H<sub>2</sub> de temperatura ambiente a -253°C, condensándolo y así aumentando su densidad. La energía requerida para el proceso es de 36% del LHV del H<sub>2</sub> con pérdidas de boil-off de 0.1-0.5% por día.

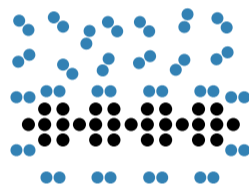


## Basado en Materiales

### ADSORCIÓN FÍSICA

Adhesión de moléculas de H<sub>2</sub> a la superficie de compuestos con alta área superficial y porosos. Las moléculas de H<sub>2</sub> gaseoso se unen débilmente a la superficie del material adsorbente por interacciones de Van der Waals.

- Materiales Carbonosos (grafeno, nanotubos, fullerenos, etc.)
- MOFs (Metal organic frameworks)
- Zeolitas



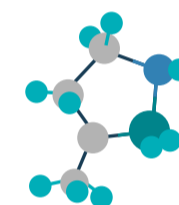
### HIDRUROS

**Hidruros metálicos (M-H):** el hidrógeno atómico es absorbido reversiblemente en los sitios intersticiales del material. **Hidruros complejos metálicos:** el catión metálico forma un enlace iónico con el anión del hidruro molecular y el hidrógeno atómico se enlaza covalentemente al segundo metal o metaloide. **Hidruros químicos:** enlace entre compuestos de H<sub>2</sub> y no-metales compartiendo pares de electrones entre átomos de electronegatividad comparable.

### CARRIERS QUÍMICOS

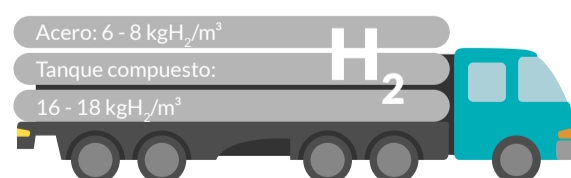
Los carriers químicos almacenan H<sub>2</sub> en algún otro estado químico en lugar de como moléculas de H<sub>2</sub> libres. Son compuestos que pueden absorber y liberar hidrógeno a través de reacciones químicas.

- LOHC (Liquid organic Hydrogen carriers)
- Inorgánicos (NH<sub>3</sub>)
- Moléculas orgánicas (CH<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>OH)



	Baja Escala (volumen, tiempo)		Grandes Volúmenes	
	Días	Semanas	Meses	Años
<b>Presurizado</b> Gas @ 50-1000 bar	De 30 a 250-700 bar COMPRESOR +  TANQUE H <sub>2</sub> 0.005-1.1 tonH <sub>2</sub> /tanque	Almacenado a 250-1000 bar	De 30 a 100 bar COMPRESOR +  TUBERÍAS Almacenado a 10-1000 bar	De 30 a 280 bar COMPRESOR +  SAL DE CAVERNA O ROCA / CAMPOS DE GAS ACOTADOS Almacenado a 20-280 bar 300-100K tonH <sub>2</sub> /campo o caverna
<b>Licuefacción</b> Líquido @ 1 bar, -253°C	PLANTA DE LICUEFACCIÓN +  TANQUE CRIOGÉNICO H <sub>2</sub> Almacenado a 1 bar, 0.2-200 tonH <sub>2</sub> /tanque			
<b>Compuestos Químicos</b> • Amoníaco: Líquido @ -33°C • LOHC: Líquido @ condiciones normales	CONVERSIÓN QUÍMICA EN AMONIACO (LÍQUIDO) +  DEPÓSITO DE LÍQUIDO Almacenado a 1 bar, hasta ~1-10k tonH <sub>2</sub> o 50k ton NH <sub>3</sub> /tanque		CONVERSIÓN QUÍMICA EN LOHC (LÍQUIDO) +  DEPÓSITO DE LÍQUIDO Almacenado a 1 bar, T <sub>amb</sub> 0.2-4.5k tonH <sub>2</sub> /tanque	

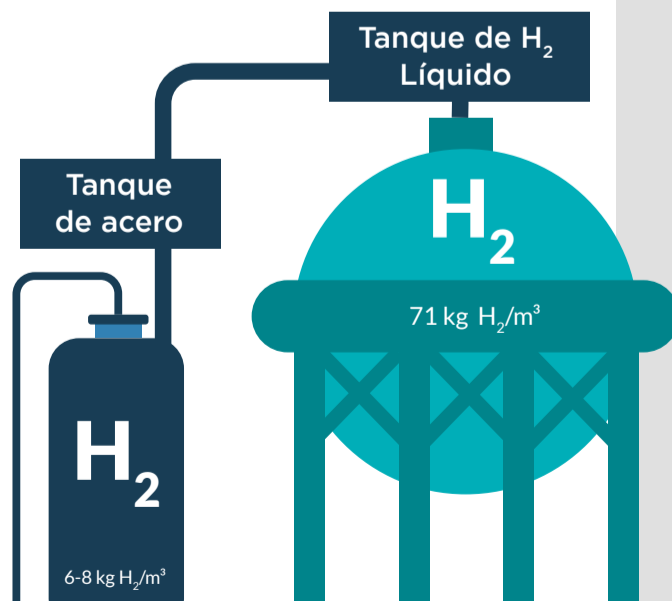
Fuente: BloombergNEF



Tube Trailer



Ducto de H<sub>2</sub>



Almacenamiento Subterráneo



El tipo de almacenamiento de hidrógeno utilizado está restringido por la aplicación final deseada, es decir, depende en gran medida de la capacidad energética, la velocidad de carga/descarga y las limitaciones de espacio.



# Transporte y Distribución

El hidrógeno no es necesariamente generado en el lugar de su uso final, por lo que una red confiable y eficiente para su transporte es esencial.

### Principales desafíos:

- Reducción del costo de distribución y transporte
- Optimización conjunta de la logística de producción y distribución/transporte (sistema centralizado o sistema descentralizado)

Distancia hasta punto de demanda

Intercontinental

Regional

Local

### Presurizado

Gas @ 50-<1000 bar

@ 10-100 bar

TUBERÍAS

@ 200-700 bar, 0.5-1 ton, <300 km

CAMIÓN PRESURIZADO

@ 200-700 bar, 500-1000 kg, <300 km

CAMIÓN PRESURIZADO

### Licuefacción

Líquido @ 1 bar, -253°C



@ 1-4 bar ~2.5-4 ton LH<sub>2</sub>

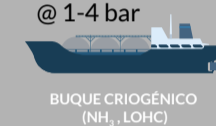


### Compuestos Químicos

- Amoníaco: Líquido @ -33°C
- LOHC: Líquido @ condiciones normales



@ ~ 5 ton of NH<sub>3</sub> or 1.7 ton LOHC



Fuente: BloombergNEF

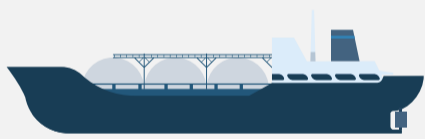


# Re- Conversión



# Usos

## Transporte (Carriers de energía)



### Hidrógeno líquido

LH<sub>2</sub>

Regasificación

### Líquidos orgánicos

(Metilciclohexano) MCH

Deshidrogenación

### Amoníaco

NH<sub>3</sub>

Cracking

Uso directo

NH<sub>3</sub>

## Movilidad de carga y pasajeros (celdas combustibles)



Vehículos ligeros



Camiones



Buses



Ferrovial



Marítimo

### Re-electricificación



Almacenamiento Energético



Co- generación



Motores



Inyección a red de gas



Metanación



Fischer-Tropsch y síntesis de metanol

### Materia prima para industria química



Metanol



Peróxido de hidrógeno



Acero



Fundiciones de cobre



Co- generación electricidad-calor



Materia prima (Fertilizantes u otras industrias)



Mezclas de combustible y amoníaco



Combustible para vehículos con celdas de combustible



Generación de energía



Transporte marítimo

# 3. Economía del Hidrógeno Verde



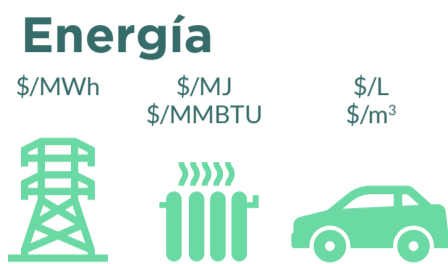
## MENSAJES CLAVES

- Para entender el costo de producción del hidrógeno es importante recordar que este depende de la energía primaria, la infraestructura asociada a la cadena de suministro y el volumen de producción. Para calcularlo en una base común para todas las rutas de producción, se utiliza el costo nivelado del hidrógeno (LCOH, por sus siglas en inglés), definido como el cociente entre el valor presente de los costos de producción de hidrógeno (CAPEX y OPEX) y el valor presente de la masa de hidrógeno producida para el periodo de evaluación del proyecto.
- A diferencia del hidrógeno gris, la producción de hidrógeno verde es variable, por lo que su costo de producción no solamente se ve afectado por una variable principal, como lo es el costo del gas natural en el caso del hidrógeno gris, sino por 3 variables principales: costo nivelado de la electricidad, costo del electrolizador e infraestructura y las horas de funcionamiento del sistema.
- En la actualidad, usualmente la producción de hidrógeno verde no es competitiva respecto del hidrógeno gris, siendo la brecha de costos entre ambos función de su uso final (materia prima, energía térmica o combustible). Sin embargo, las variables más relevantes que inciden sobre esta brecha son comunes a todos los casos: costo nivelado de la electricidad, CAPEX del electrolizador y costo medio ponderado de capital, agregándose el costo de las estaciones de recarga para su uso como combustible.
- Sería posible acortar las brechas de costos entre hidrogeno gris y verde si se implementara una regulación que penalice las emisiones de carbono (impuesto al carbono), lo cual incrementaría el OPEX de la producción de hidrógeno gris. Otras formas de reducir los costos de producción de hidrógeno verde consideran la hibridación del sistema, o su emplazamiento en lugares donde el recurso renovable sea abundante y la selección de electrolizadores eficientes y con larga vida útil. Todas ellas promueven una alta utilización del electrolizador, entonces, en este escenario el costo de producción estaría fuertemente determinado por el costo nivelado de la energía.

# Economía del H<sub>2</sub> verde y conceptos

## Importante Considerar:

Dependiendo del uso de H<sub>2</sub> es posible encontrar distintas unidades de medida para representar su costo.



## Materia Prima \$/Kg



# Costo de producción del Hidrógeno



Para tener una métrica estandarizada de precio del hidrógeno verde, se utiliza el LCOH (Levelized Cost of Hydrogen) o "Costo Nivelado del Hidrógeno" y corresponde al cociente entre los costos de producción de hidrógeno (**OPEX y CAPEX**)\* y la masa producida de H<sub>2</sub> para el periodo de tiempo del proyecto. Su unidad de medida es [\$/kg de H<sub>2</sub>].

\***OPEX**: gastos operacionales como mantenimiento e insumos (electricidad, agua)

**CAPEX**: gastos de inversión de capital (como electrolizador e infraestructura)

## Reformado de Metano con Vapor (SMR)

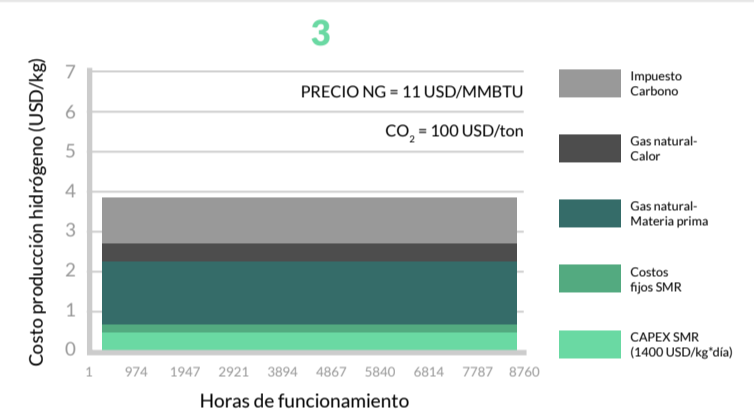
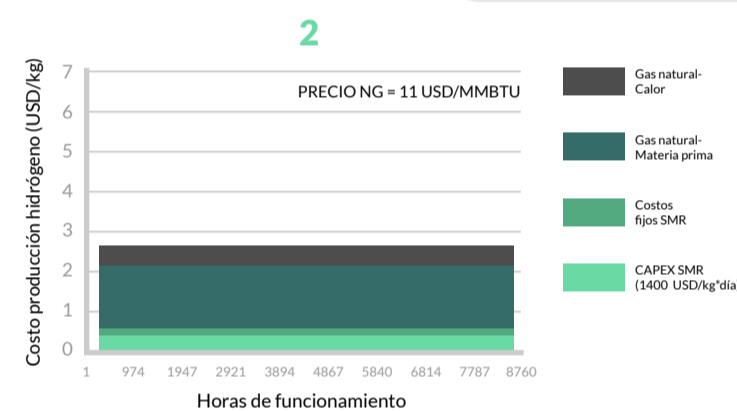
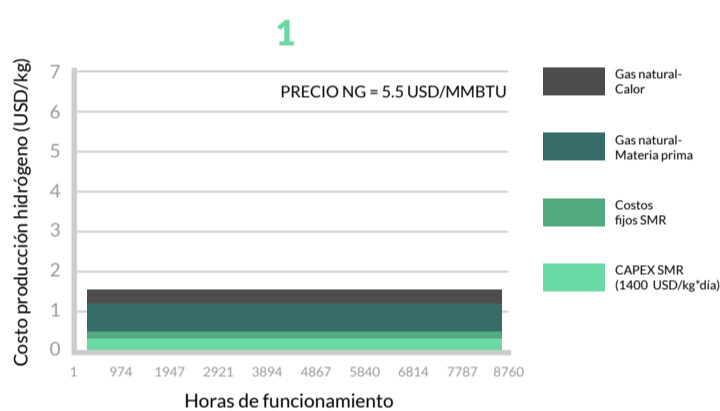
### Hidrógeno Gris

Gas Natural



CO<sub>2</sub>

Hidrógeno (\$/Kg)



**Gráficos 1 y 2:** Visualización de efectos en el precio final de hidrógeno, que fluctúa entre 1,5 - 2,5 USD/kg, según varía el precio del gas natural entre 5,5 y 11 USD/MMBTU, para un proceso de producción convencional SMR (inversión 1.400 USD/kg\*día más costos fijos).

**Gráfico 3:** Refleja un incremento en el precio final de hidrógeno (cercano a 4 USD/kg) si se adiciona un impuesto (CO<sub>2</sub> Tax) de 100 USD/ton.

## Electrólisis del Agua

### Hidrógeno Verde

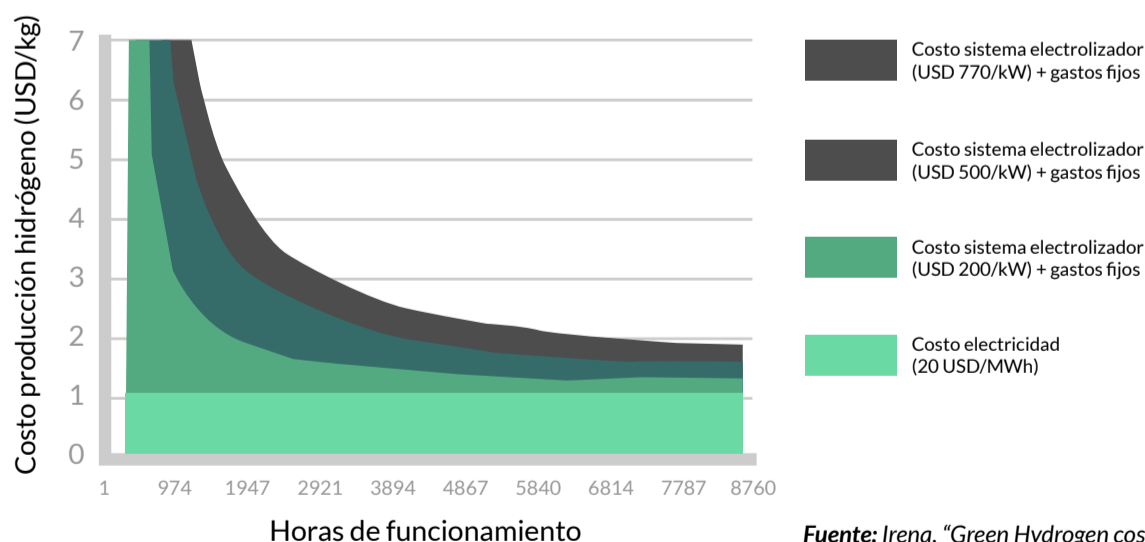
Energía Renovable  
Agua



O<sub>2</sub>

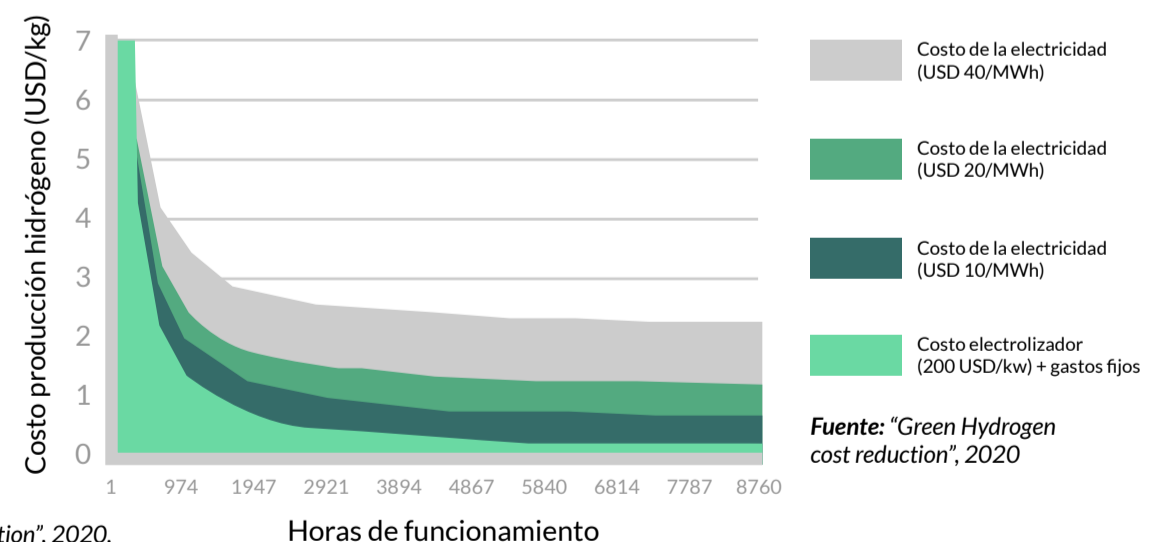
Hidrógeno

### Impacto del CAPEX de la Planta (sistema de producción)



Fuente: Irena, "Green Hydrogen cost reduction", 2020.

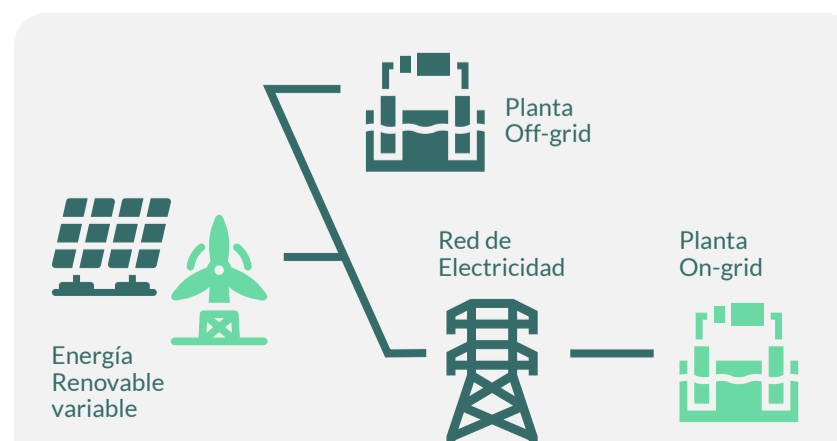
### Impacto del Precio de la Electricidad



Fuente: "Green Hydrogen cost reduction", 2020

### CONSIDERACIONES CÁLCULO COSTO

- **LCOE:** Constante.
- **CAPEX específico:** Varía en función de la potencia eléctrica y la madurez de la tecnología.
- **Producción variable:** Condicionada por la disponibilidad del recurso renovable.



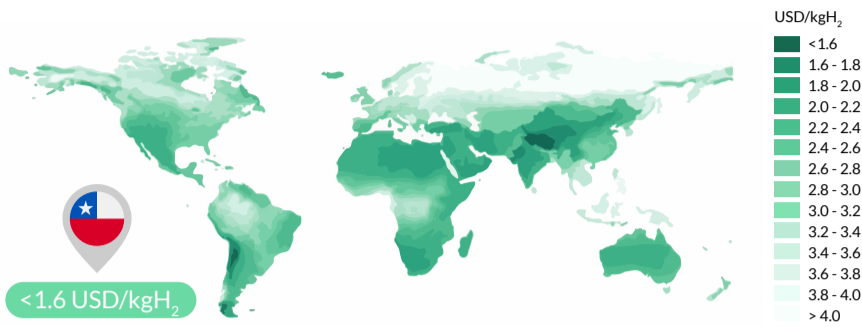
### CONSIDERACIONES CÁLCULO COSTO

- **LCOE:** Variable (10-40 USD/MWh)
- **CAPEX específico:** Constante.
- **Producción variable:** Condicionada por la disponibilidad del recurso renovable

Tanto el costo de la maquinaria como el precio de la electricidad impactará directamente a la competitividad del hidrógeno frente a otros energéticos de bajas emisiones de carbono.

# CHILE en los ojos del Mundo - Costo de producción competitivo

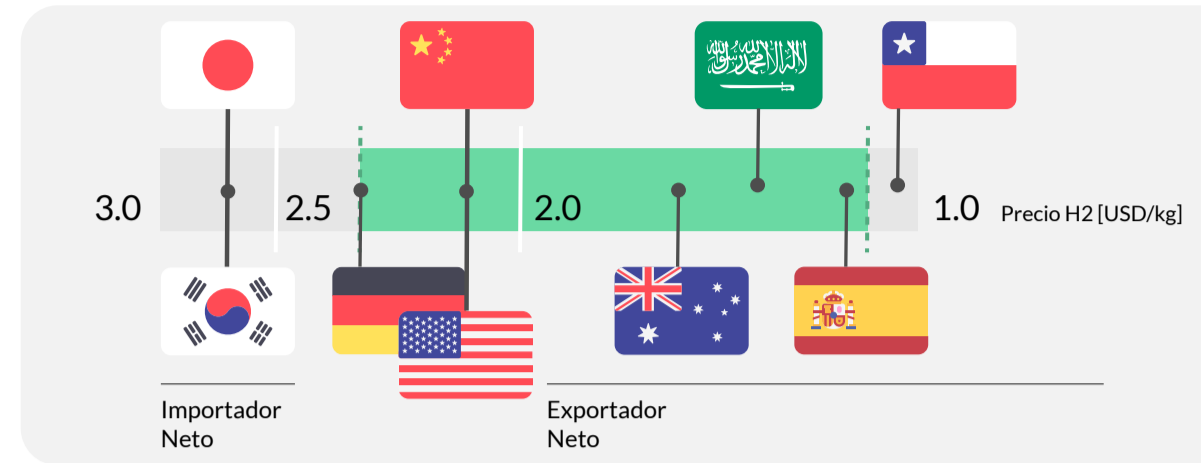
## Costos de producción de hidrógeno al 2030 a partir de sistemas solares y eólicos



Fuente: IEA, "The Future of Hydrogen", 2019.

La disponibilidad del recurso renovable en Chile en conjunto con la proyección de una disminución de los precios de las tecnologías fotovoltaica y eólica, convierten a Chile en un país atractivo para la inversión en nuevas plantas renovables y con un costo de producción de hidrógeno competitivo a nivel mundial.

## Hydrogen Council



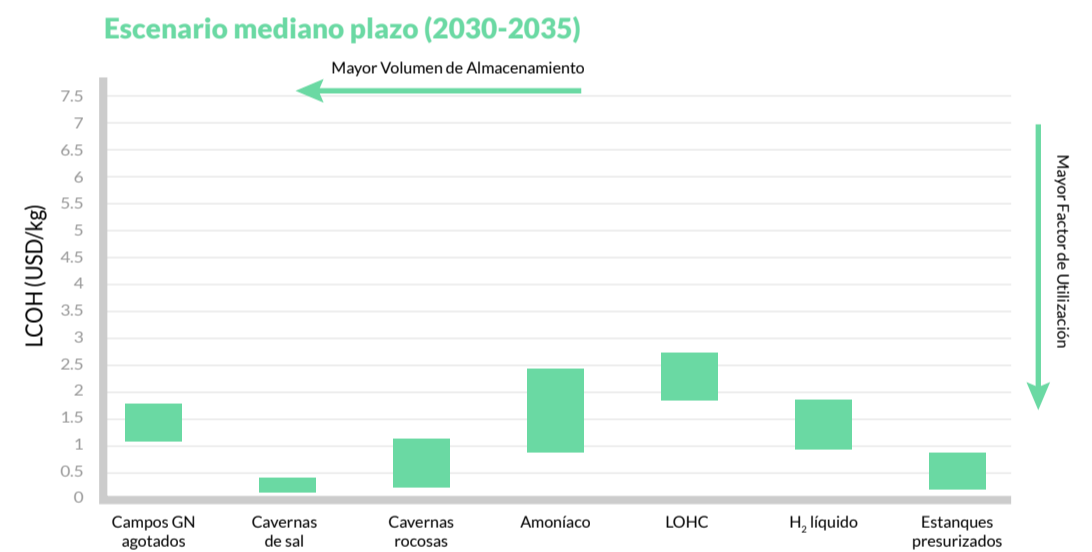
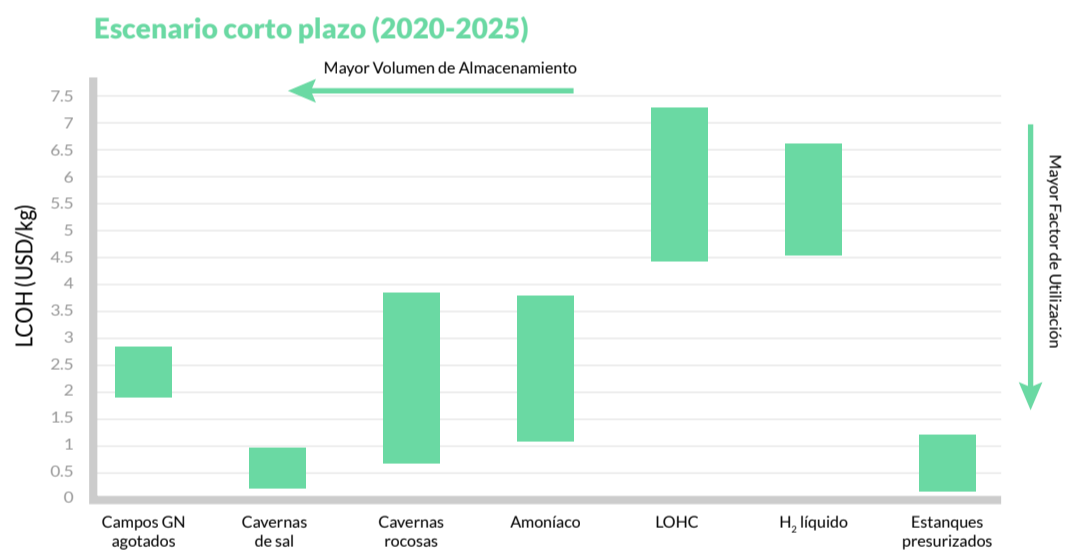
Haciendo un zoom al escenario para 2030, el Hydrogen Council declara a Chile como el país con opciones de producir el H<sub>2</sub> más competitivo como Exportadores Netos frente a otras naciones.

## Costo Infraestructura



El costo de infraestructura es función de la disponibilidad del recurso renovable (determina las horas de funcionamiento), la eficiencia del sistema (determina el aprovechamiento de la energía disponible), el uso final (determina los procesos de conversión/reconversión, almacenamiento, transporte y distribución) y la demanda (determina la frecuencia de uso).

## Costo nivelado Almacenamiento

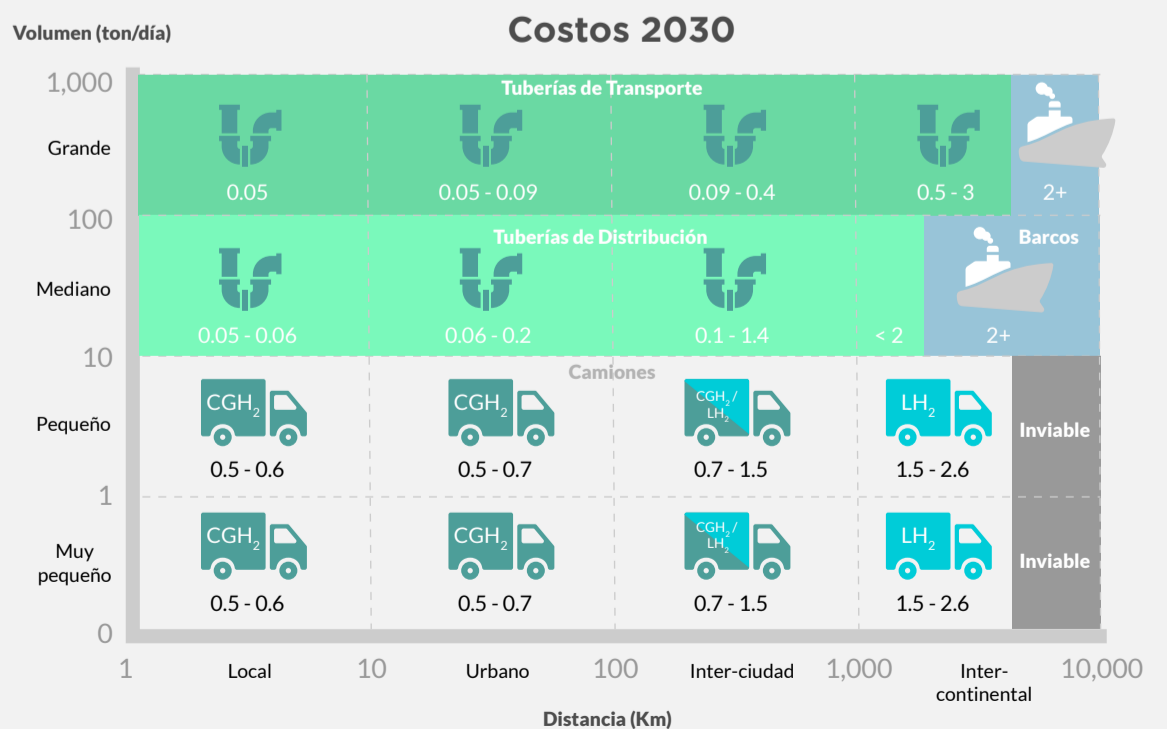
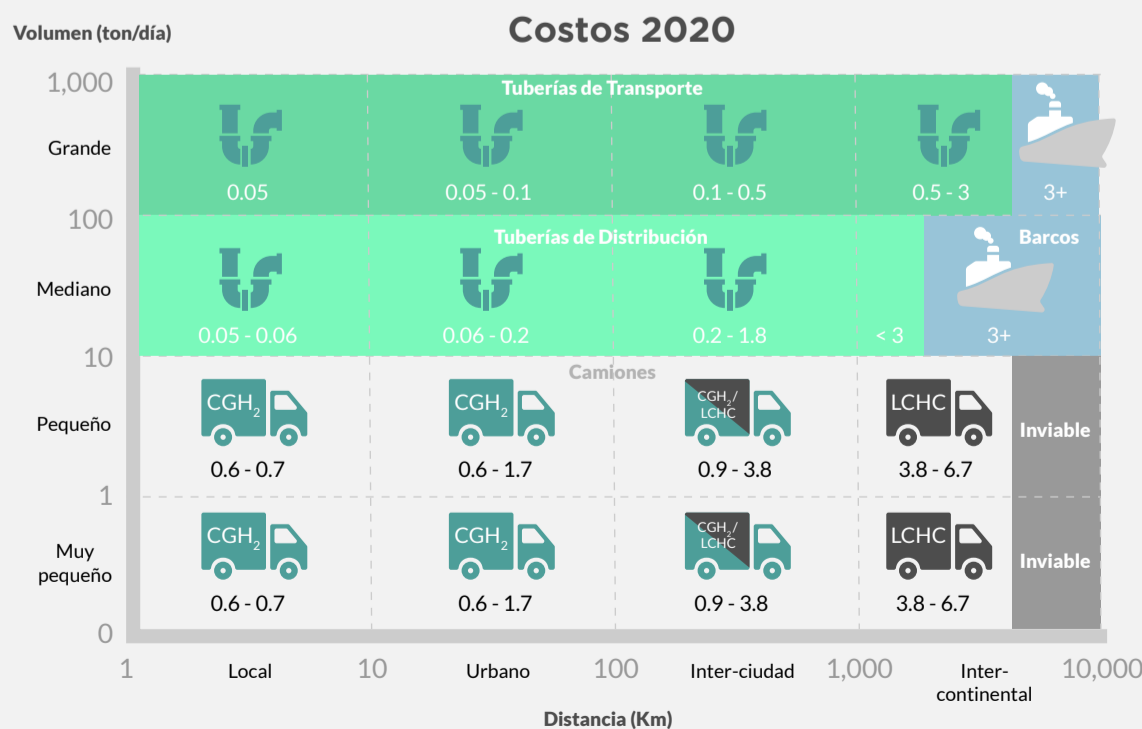


Fuente: BloombergNEF

El factor de utilización de la tecnología de almacenamiento incide en el costo nivelado del hidrógeno. Es decir, si la tecnología es subutilizada, por ejemplo, debido a la baja demanda actual de H<sub>2</sub>, el costo nivelado del hidrógeno aumenta. Sin embargo, con el desarrollo de las tecnologías y el aumento de la demanda se prevé que aquellas alternativas con un menor factor de utilización sean competitivas al 2030.

## Costo nivelado Distribución

La distancia de traslado y el volumen almacenado (toneladas/día) determinan la tecnología más costo-efectiva para distribuir el hidrógeno.



H<sub>2</sub> Comprimido H<sub>2</sub> Líquido Amoniaco Carriers Líquidos de H<sub>2</sub> (LOHC) Fuente: BloombergNEF

# Brecha de costo entre hidrógeno verde y gris



**Impuesto a la emisión de carbono**



**Disminución costos electricidad**

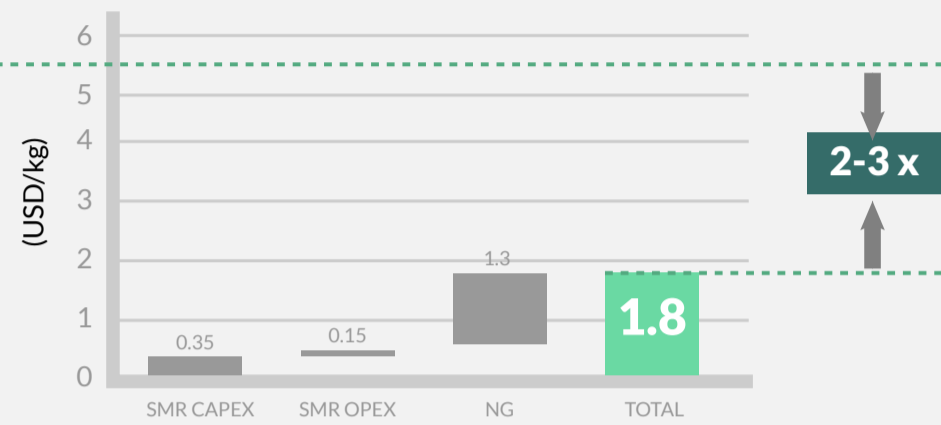
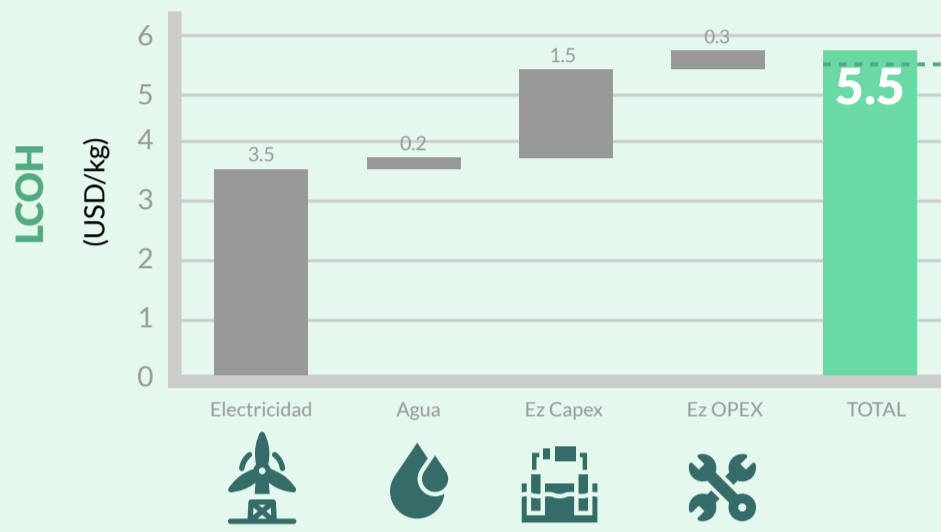


**Tecnología alternativa - Captura de Carbono**

## Hidrógeno Verde



## Hidrógeno Gris



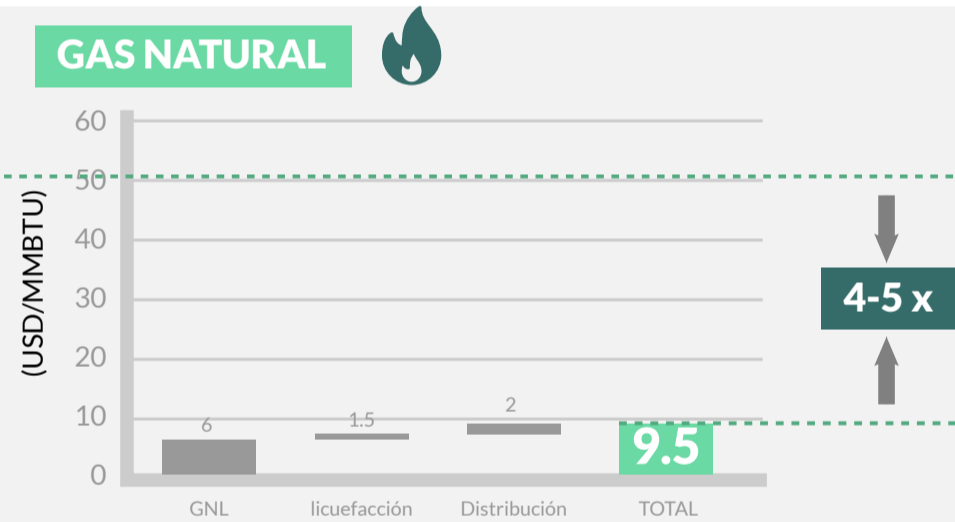
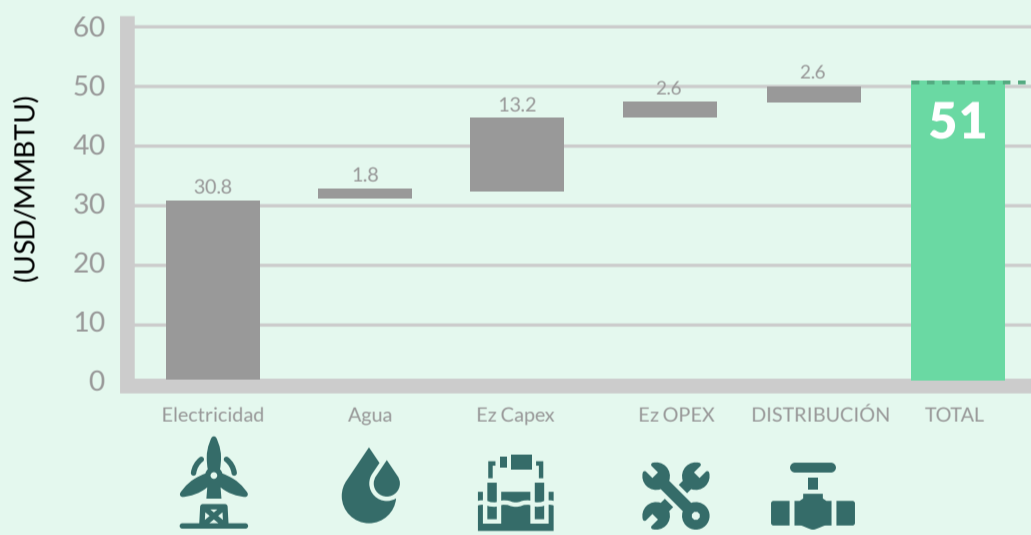
Dados los costos actuales, el LCOH del hidrógeno a partir de fuentes renovables es 2 a 3 veces superior a aquel obtenido a partir de reformado de metano con vapor.

Las principales variables que podrían afectar esta brecha son:

- **H<sub>2</sub> Verde:** LCOE, CAPEX Ez, WACC
- **H<sub>2</sub> Gris:** Costo Gas Natural, Impuesto al CO<sub>2</sub>

USO H<sub>2</sub> COMO MATERIA PRIMA

USO H<sub>2</sub> COMO ENERGÍA TÉRMICA

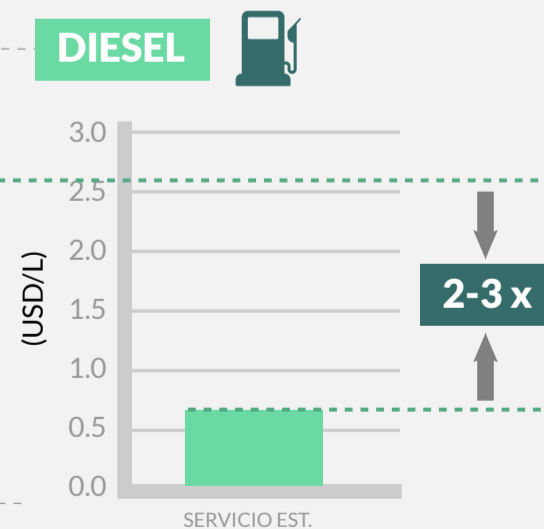
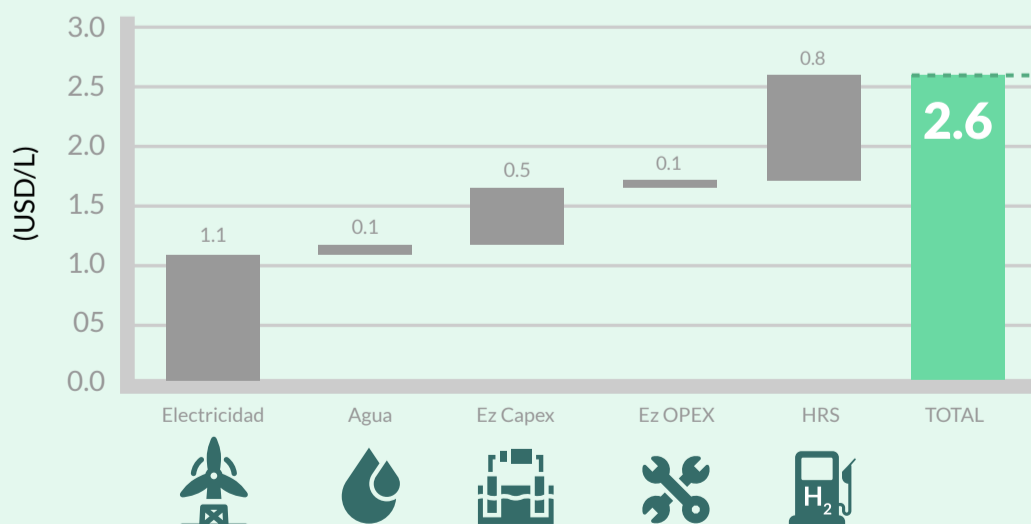


Usar hidrógeno producido a partir de fuentes renovables como energía térmica (ej.: calderas y hornos), sin considerar incentivos adicionales como la carbono neutralidad, no es costo-efectivo. Se requieren políticas públicas fuertes para superar esta brecha.

Las principales variables que podrían afectar esta brecha son:

- **H<sub>2</sub> Verde:** LCOE, CAPEX Ez, WACC
- **H<sub>2</sub> Gris:** Costo Gas Natural, Impuesto al CO<sub>2</sub>

USO H<sub>2</sub> COMO COMBUSTIBLE



Esta comparación es solo por contenido energético de hidrógeno y diesel, no compara el costo total de propietario que incorpora la mayor eficiencia de una celda de combustible en comparación a un motor de combustión interna.

Al utilizar el H<sub>2</sub> como combustible para movilidad, se debe agregar un costo adicional, las subestaciones de recarga (HRS), obteniéndose una brecha de costos 2 a 3 veces el costo del diésel.

Las principales variables que podrían afectar esta brecha son:

- **H<sub>2</sub> Verde:** LCOE, CAPEX Ez, WACC, CAPEX HRS, factor utilización HRS.
- **H<sub>2</sub> Gris:** Costo Petróleo, Impuesto al CO<sub>2</sub>

# 4. Mercado del Hidrógeno Verde



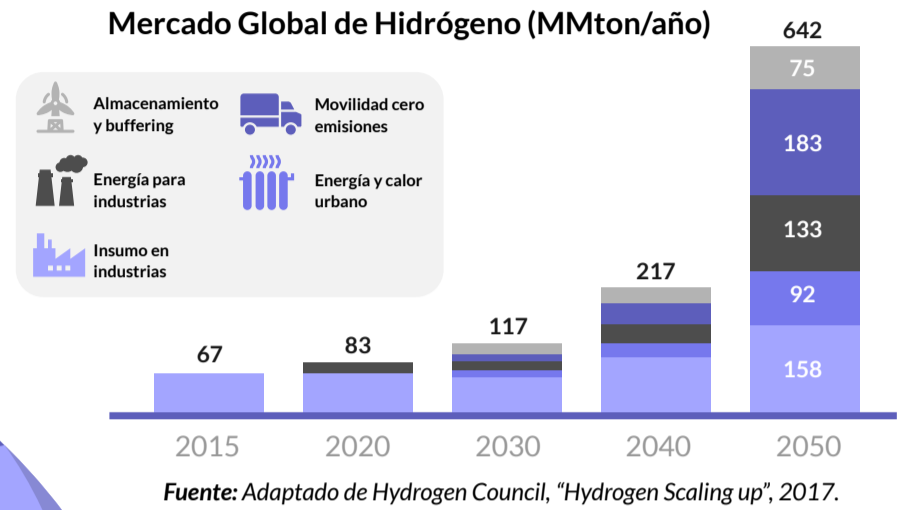
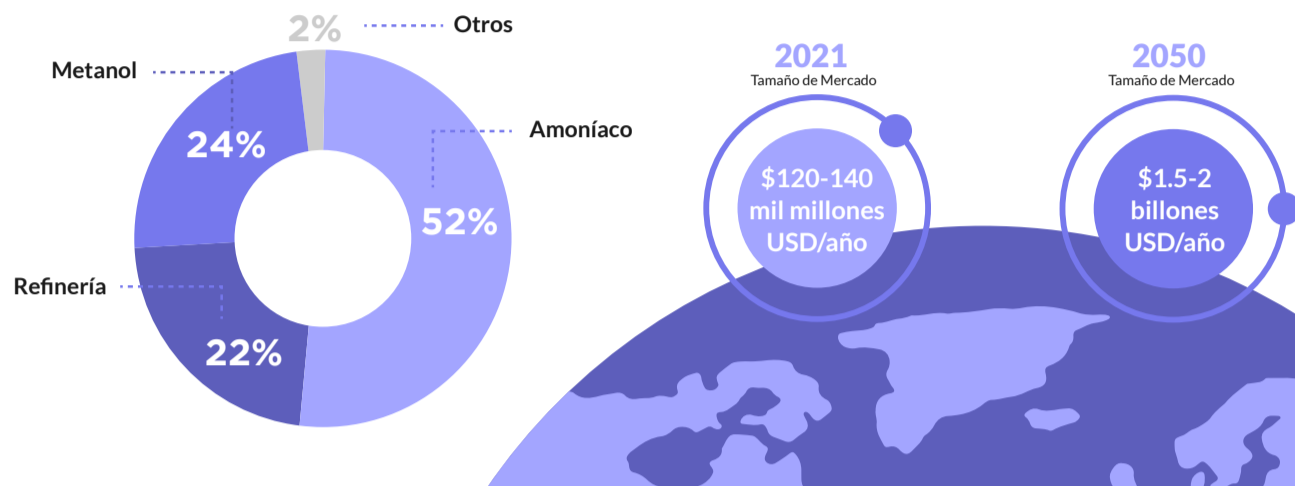
## MENSAJES CLAVES

- El mercado actual del hidrógeno está valorado en 120-140 mil millones USD/año y está dominado principalmente por usos químicos, siendo el principal la producción de amoníaco. Con la masificación del hidrógeno para múltiples usos, se espera que su mercado crezca 10 veces el tamaño actual, valorándose en 1500-2000 BUSD/año para el 2050.
- El impulso que está recibiendo el hidrógeno verde a través de las estrategias nacionales e incentivos económicos de los diferentes países líderes a nivel mundial, ha decantado en el anuncio de 359 proyectos. De los 7 anunciados para Latinoamérica por el Hydrogen Council, cuatro se encuentran en Chile.
- El panorama en Latinoamérica y el Caribe sigue lentamente la tendencia mundial, siendo Chile el país con mejor puntuación en el Índice Regional del Hidrógeno, elaborado por Hincio y New Energy, que analizó 17 países y mide el progreso hacia la producción y el uso del hidrógeno.
- Chile está apostando por el hidrógeno verde, lo cual se ve fuertemente reflejado en las metas establecidas en la Estrategia Nacional en donde se plantea que hacia el 2030, Chile producirá el hidrógeno verde más barato del mundo con una capacidad de producción de 25 GW. Este hito se dará en conjunto con otro: la carbono neutralidad, lo que Chile espera alcanzar hacia el 2050, donde se espera abatir un total de 130 toneladas de CO<sub>2</sub>, y en donde el hidrógeno verde aportaría en aproximadamente 21% a la meta de reducción.

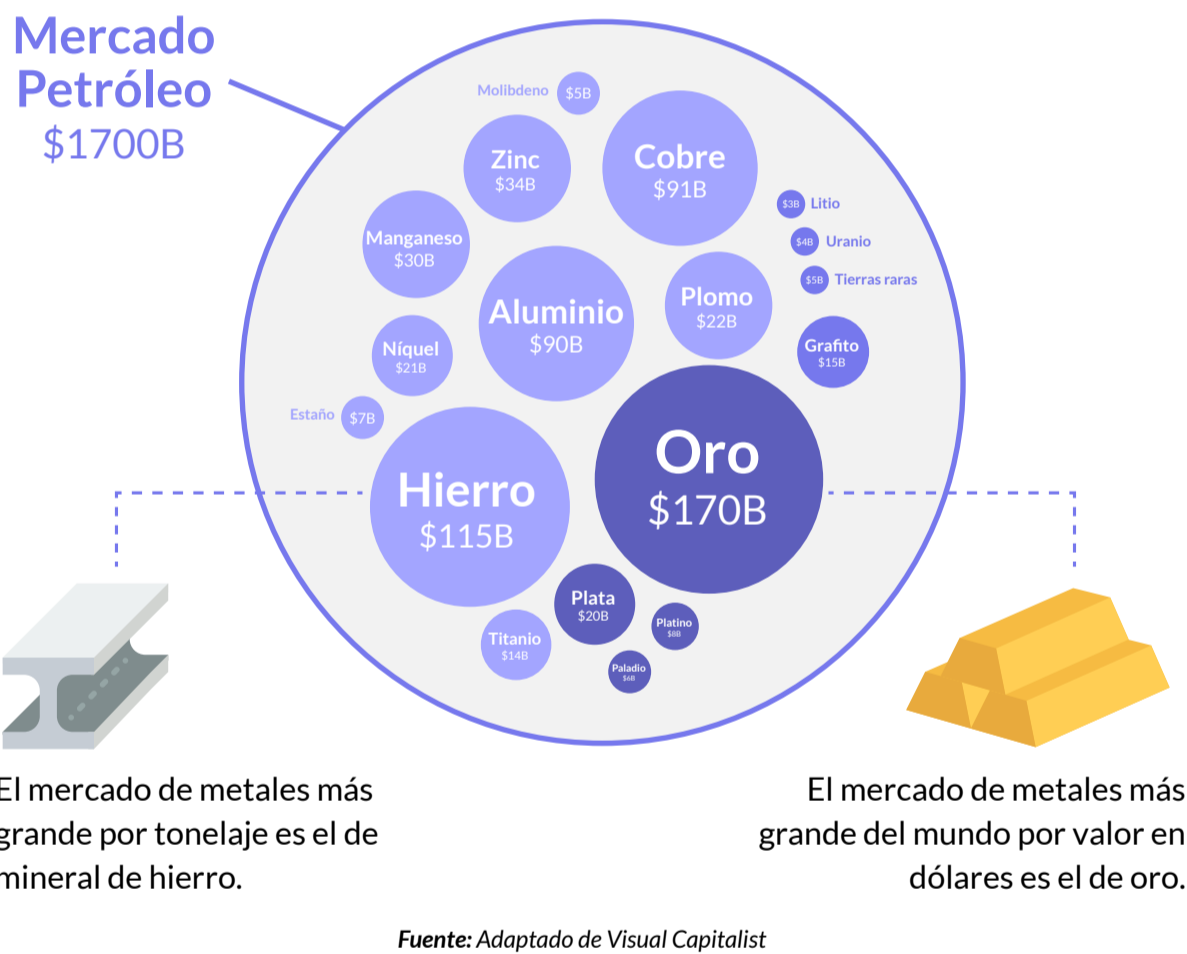
## Mercado actual y proyecciones de crecimiento

El mercado global actual del hidrógeno está valorado en 120-140 mil millones USD/año. Este se concentra principalmente en la industria química (98%).

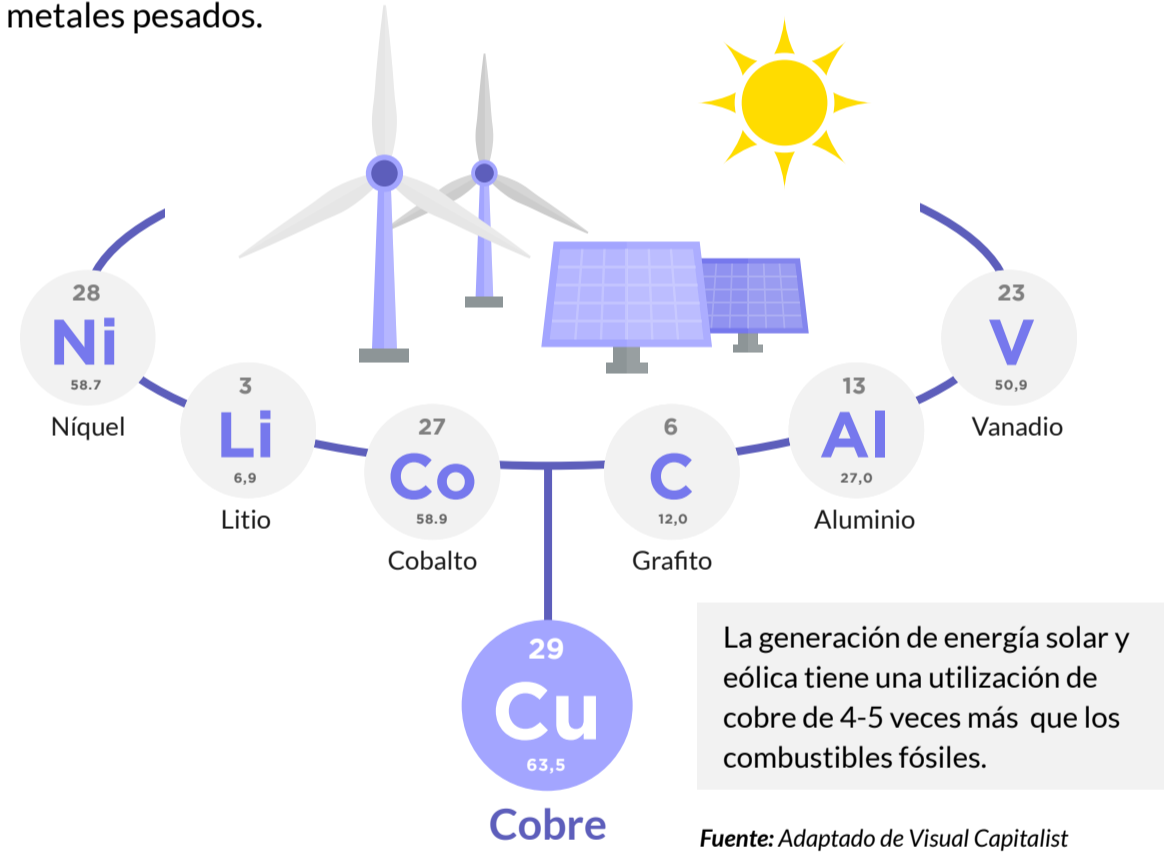
Se espera un crecimiento de 10 veces el mercado al 2050, llegando a tamaños de mercado del orden de 1.5 a 2 billones de dólares.



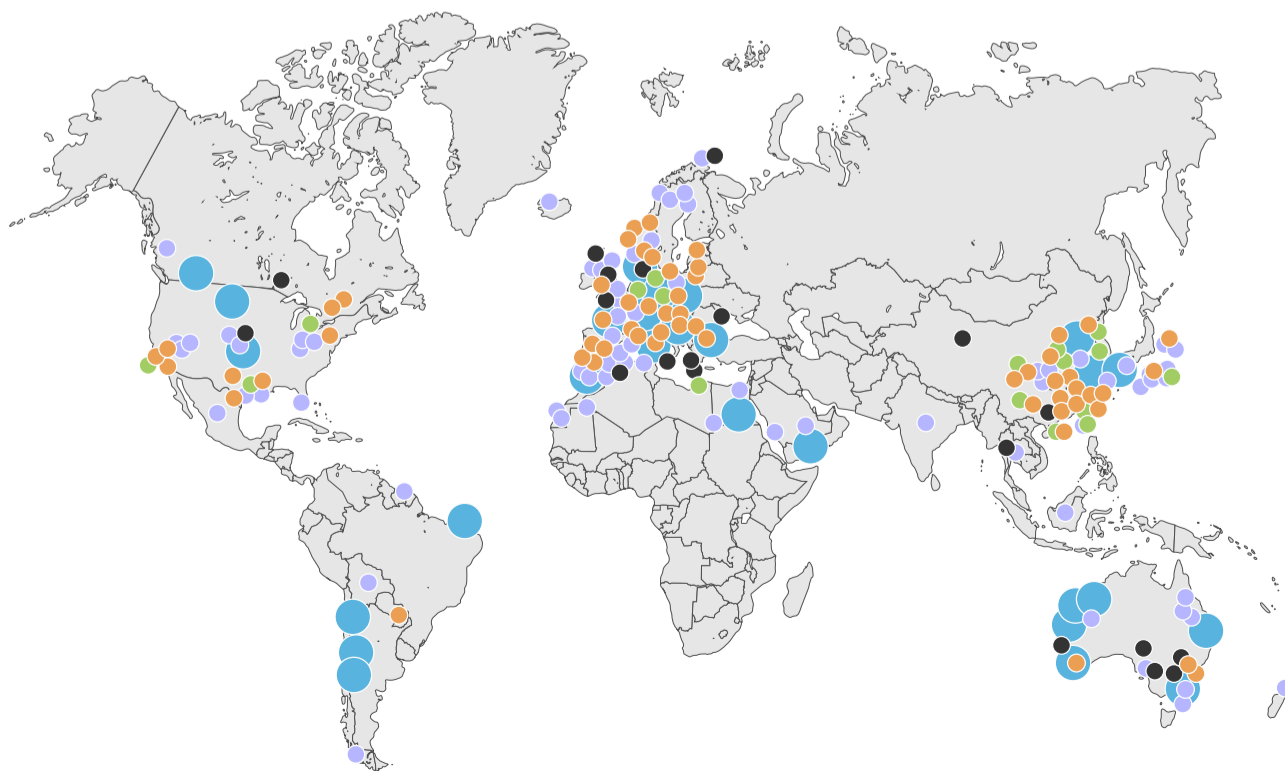
## Comparación de tamaños de mercado



En la última década, el crecimiento exponencial del mercado de las energías renovables ha impulsado también el aumento de la demanda de metales pesados.



## Mapeo de proyectos anunciados



Fuente: Adaptado de Hydrogen Council, "Hydrogen Insights", 2021.

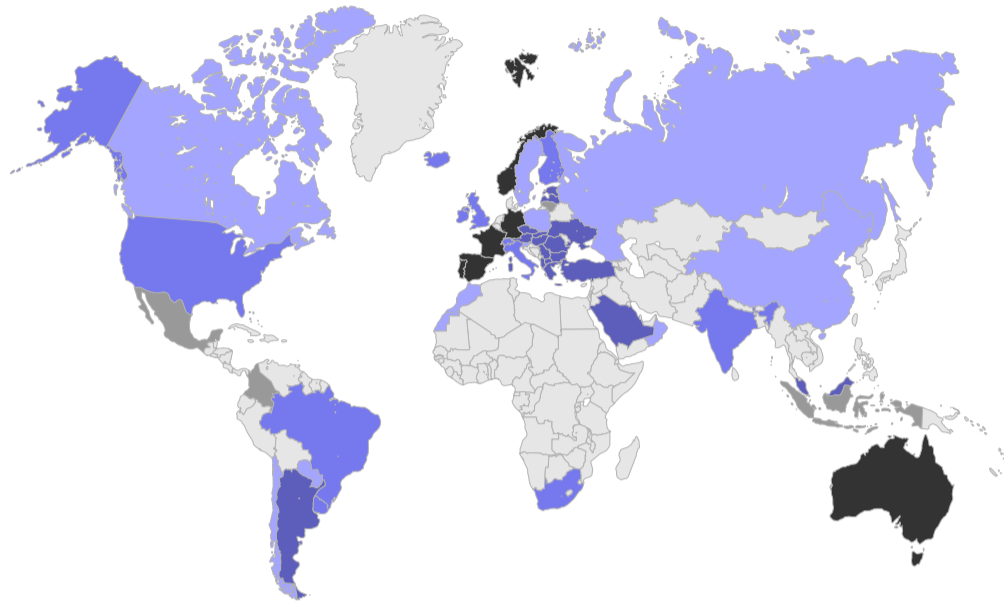
# 359 proyectos anunciados

**~USD 500 bn Inversiones al 2030**, de las cuales 150 bn están asociadas a proyectos maduros.

- 28** Producción a giga-escala: Proyectos de hidrógeno renovable >1 GW y proyectos de hidrógeno bajo carbono >200 ktpa.
- 141** Usos industriales gran escala: Refinería, amoníaco, metanol, acero y materia prima para la industria.
- 96** Transporte: Trenes, barcos, camiones, autos y otras aplicaciones de movilidad con hidrógeno.
- 56** Economía integrada de hidrógeno: Intersectorial y proyectos de tipos y usos finales diferentes.
- 38** Proyectos de Infraestructura: Distribución de hidrógeno, transporte, conversión y almacenamiento.

# Estrategias Nacionales para el H<sub>2</sub> Verde

## Publicación de estrategias a nivel mundial



Fuente: WEC, LBST, "International Hydrogen Strategies", 2020.

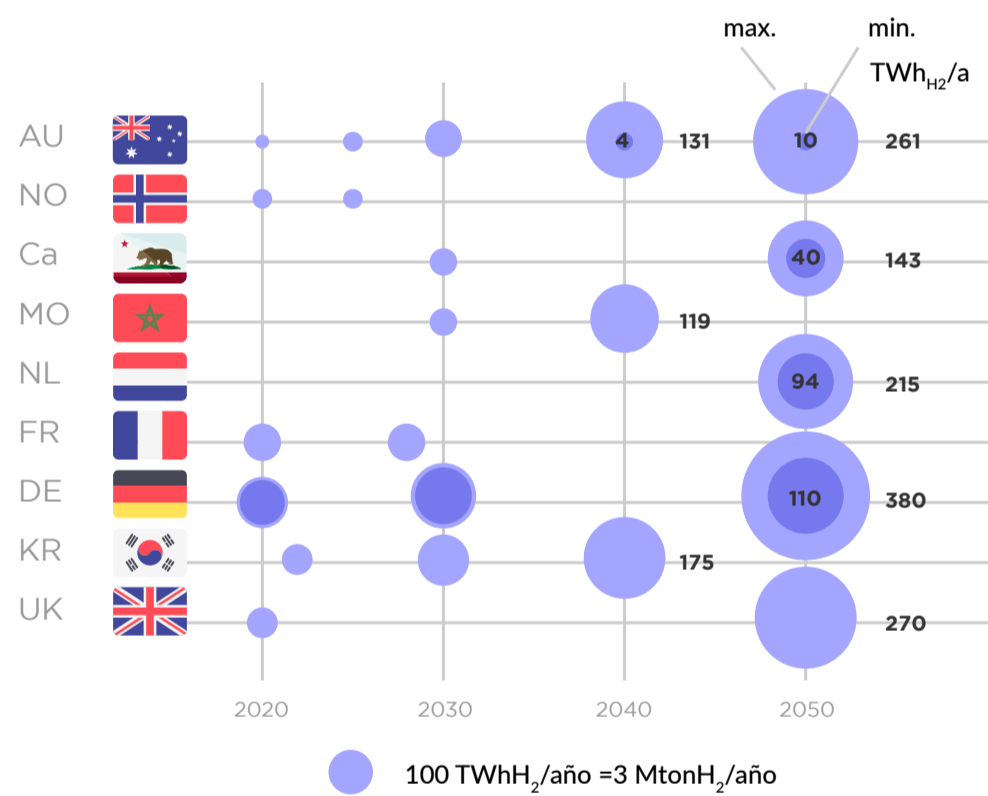
- 5 Actividades no relevantes
- 17 Discusiones iniciales de políticas
- 14 Apoyo para proyectos demostrativos y pilotos
- 18 Estrategia nacional disponible

**56 países**  
Analizados equivalentes a:

**90%**  
PIB Mundial

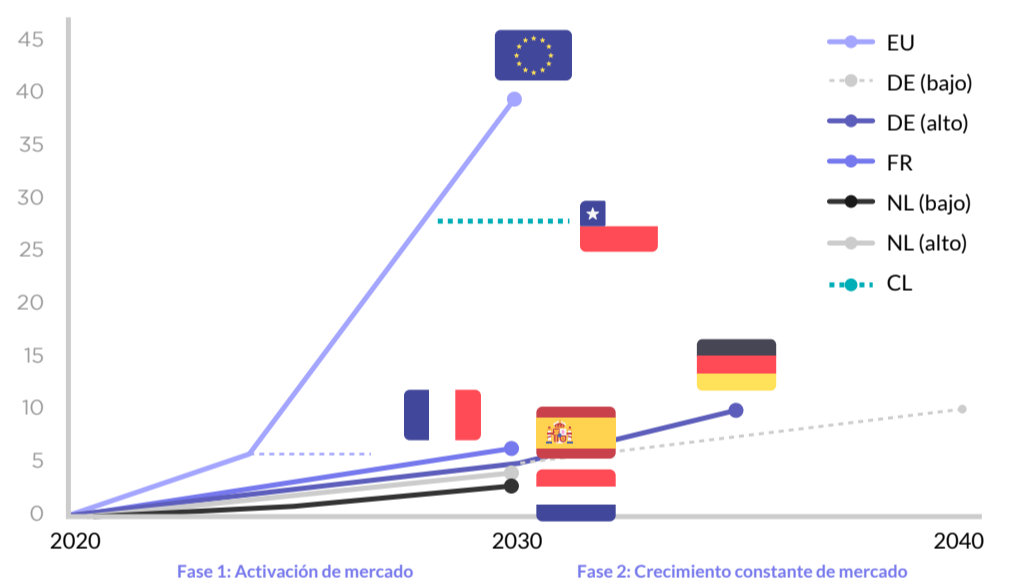


## Crecimiento de demanda por país



Fuente: WEC, LBST, "International Hydrogen Strategies", 2020

### Capacidad de electrólisis en GW



El gran desafío hoy en día es la manufactura del equipamiento de producción de hidrógeno (electrolizadores), cuya capacidad de producción actual es del orden de 1 GW/año de H<sub>2</sub>.

Fuente: WEC, LBST, "International Hydrogen Strategies", 2020

## Índice regional de hidrógeno (Latam)

Índice desarrollado por **Hinicio y New Energy** que mide el progreso hacia la producción y el uso del hidrógeno en países de América Latina y el Caribe a través de un conjunto de indicadores:

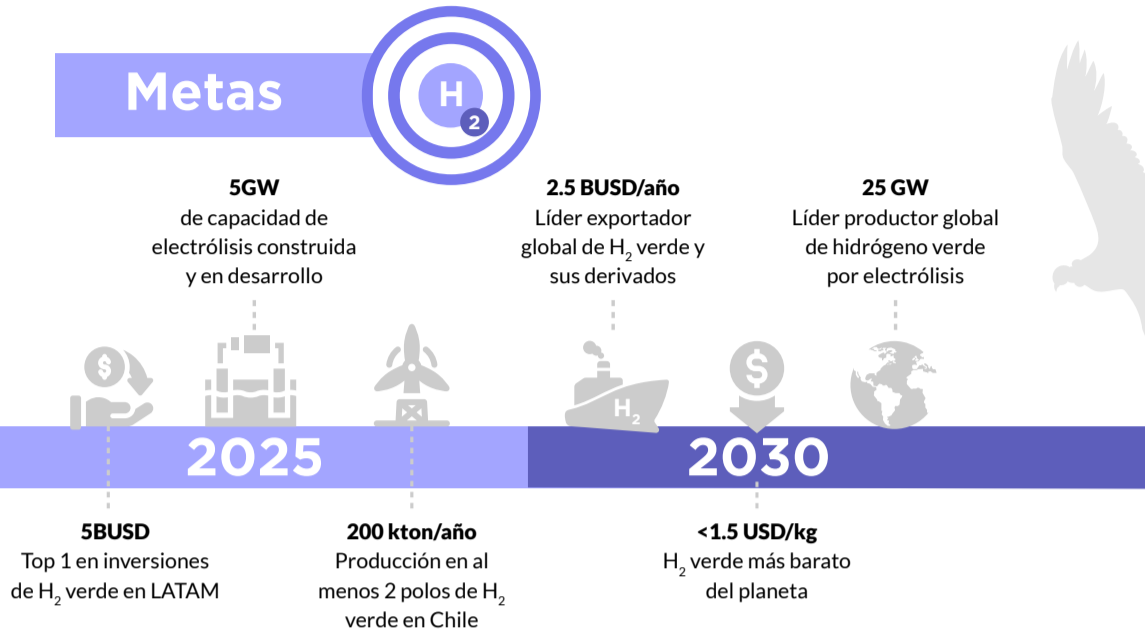
1. Políticas públicas, incentivos y normativas sobre el hidrógeno a nivel nacional.
2. Estructuración de los ecosistemas de hidrógeno a nivel nacional.
3. Proyectos industriales H<sub>2</sub> en funcionamiento o en desarrollo.
4. Adopción del hidrógeno en el sector de la movilidad.
5. Exportación de hidrógeno y acuerdos de cooperación internacional.



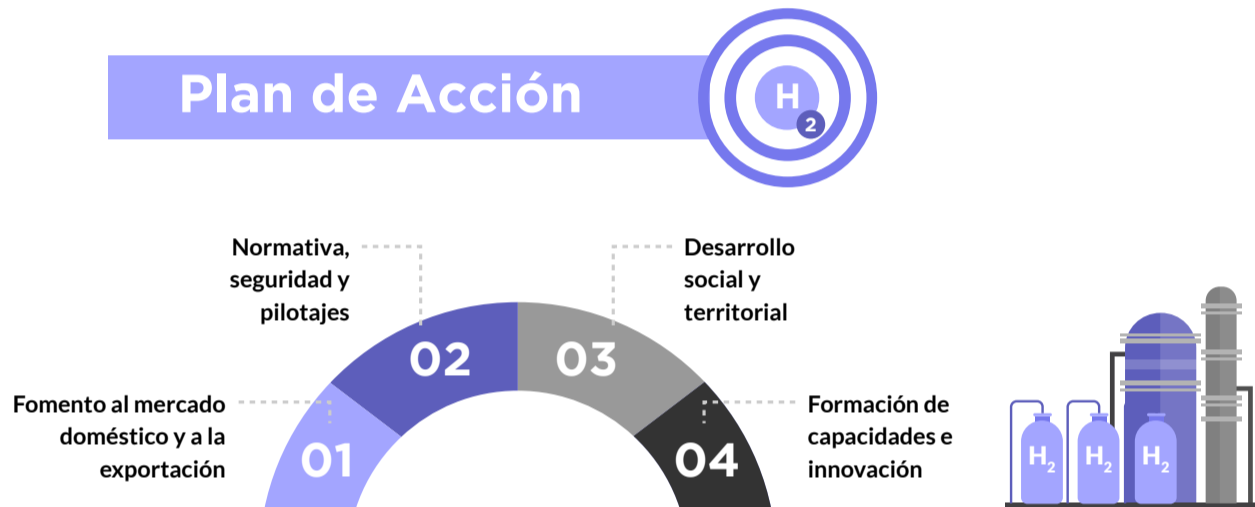
Fuente: Hydrogen Latam Index, Hinicio

## Estrategia Nacional del Hidrógeno Verde

### Metas



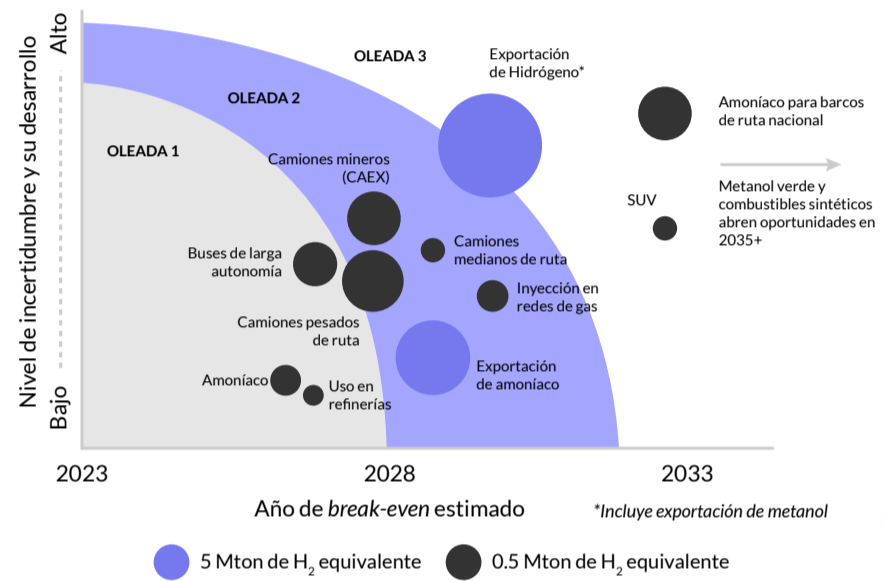
### Plan de Acción



### Materialización

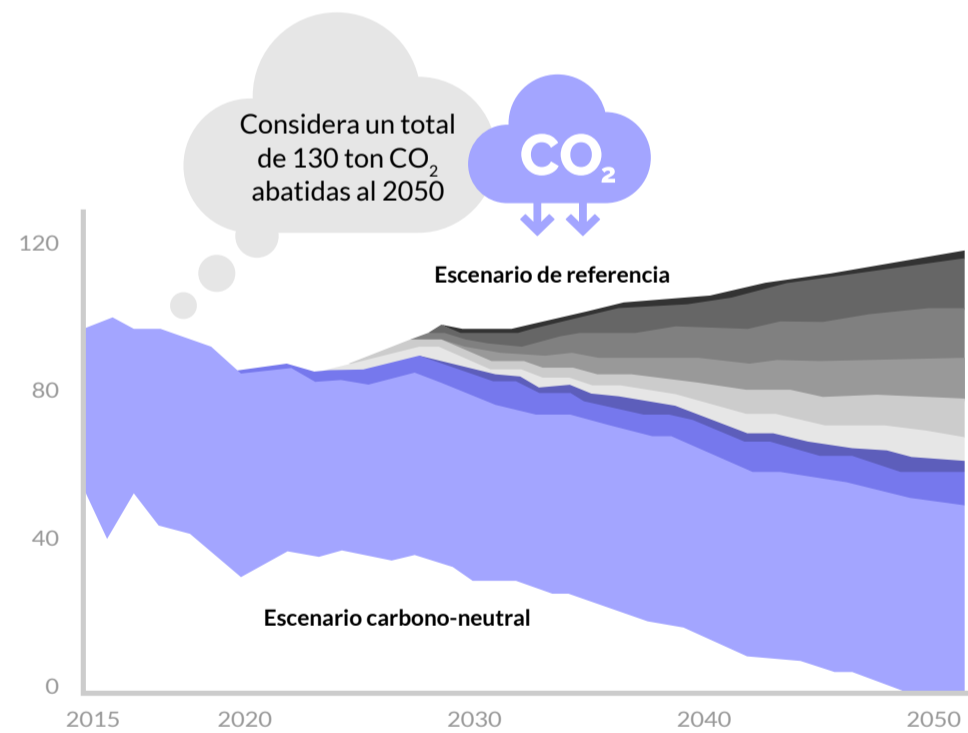
La oportunidad de Chile en el desarrollo de la industria del H<sub>2</sub> verde se materializará en 3 oleadas:

- **Primera oleada:** Consumo doméstico de gran escala
- **Segunda oleada:** Uso en transporte e inicio de la exportación
- **Tercera oleada:** Apertura de nuevos mercados de exportación



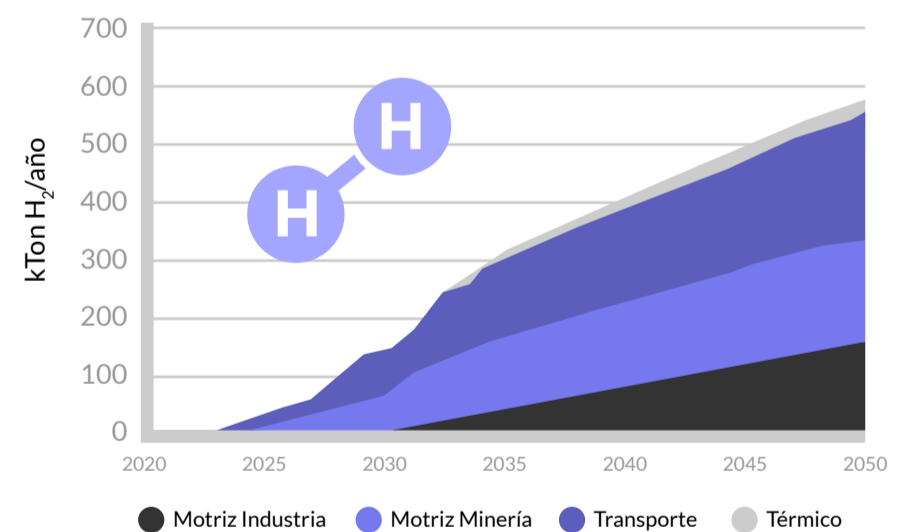
Fuente: Adaptado de Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde

## Plan de Descarbonización



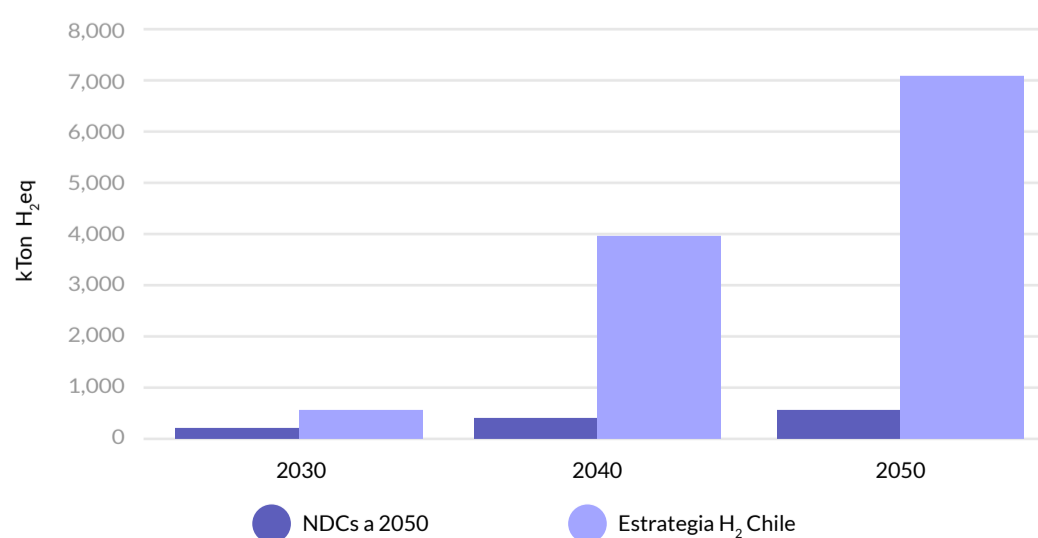
Fuente: NDC de Chile, 2020

Hidrógeno aportaría un 21% a la meta en reducción de emisiones al 2050, con un total de consumo proyectado de 600 kTon/año.



Fuente: Ministerio de Energía, Ministerio Medio Ambiente, 2019

## Comparación metas plan Descarbonización y estrategia Nacional H<sub>2</sub> Verde



Fuente: Ministerio de Energía, Ministerio Medio Ambiente, 2019



Transporte



Calor y electricidad para edificaciones



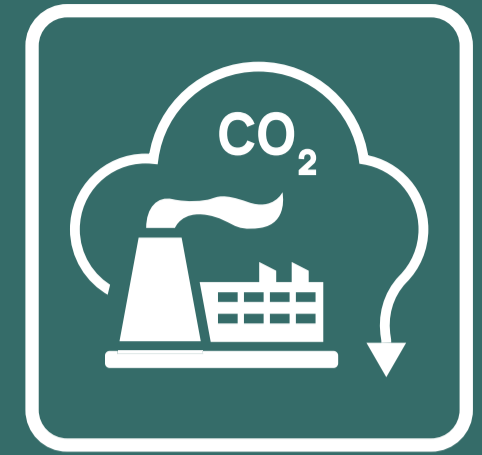
Materia prima para la industria



Calor y electricidad para la industria



# 5. Hidrógeno verde para la revalorización de CO<sub>2</sub>

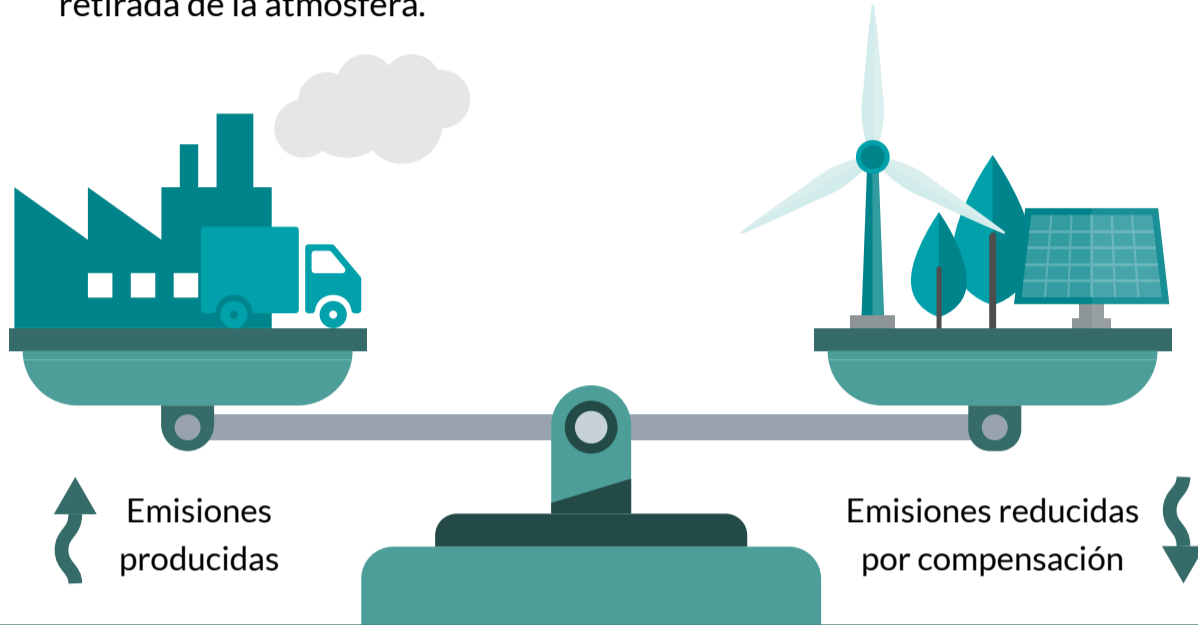


## MENSAJES CLAVES

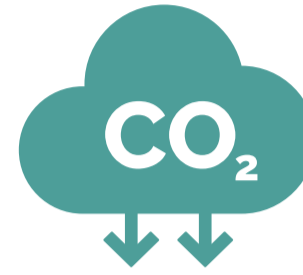
- Actualmente la energía utilizada en la industria química proviene principalmente de combustibles fósiles, sin embargo, con las exigencias de carbono neutralidad para hacer frente al calentamiento global, esto debe modificarse. A nivel industrial, la carbono neutralidad puede abordarse desde dos frentes, adicionando etapas de captura de carbono a procesos actuales y/o utilizando fuentes energéticas renovables.
- La captura es un proceso donde las emisiones de carbono de la industria o de la atmósfera son atrapadas para ser almacenadas o reutilizadas. Este proceso puede realizarse previo o posterior a la generación de emisiones o, alternativamente, se puede optar por una combustión utilizando oxígeno puro (combustión oxyfuel). El CO<sub>2</sub> capturado puede almacenarse en acuíferos salinos, en el océano profundo o depósitos de gas o petróleo agotados.
- La reutilización considera convertir el CO<sub>2</sub> capturado en un producto de mayor valor agregado. Es en este proceso donde el hidrógeno verde también juega un rol importante, ya que actúa como reactante en las estrategias de valorización que contemplan reacciones de reducción.
- La conversión de energía en otros productos es conocida como Energía a X (Power to X), donde X puede representar gas, químicos, combustibles, entre otros. Este proceso contempla la generación de H<sub>2</sub> a partir de electrólisis y la utilización del CO<sub>2</sub> capturado como fuente de carbono. Alternativamente, la fuente de carbono (carbón, biomasa u otros) puede ser gasificada, reformada o pirolizada para obtener gas de síntesis (H<sub>2</sub> y CO). Es así como se obtienen portadores de hidrógeno como, por ejemplo, metanol, pero también otros productos químicos como combustibles sintéticos, olefinas y aromáticos que son materia prima para muchos procesos de la industria química (polímeros, plásticos, resinas, pinturas, etc.).

## ¿Qué es la carbono neutralidad?

**Emisiones de CO<sub>2</sub> netas iguales a cero** equilibrando la cantidad de CO<sub>2</sub> liberado a la atmósfera con una cantidad equivalente retirada de la atmósfera.



Para alcanzar la carbono neutralidad, **las industrias deben disminuir drásticamente las emisiones de CO<sub>2</sub>**, lo cual se puede abordar desde dos frentes:



**Utilización de energías renovables**



**Captura de Carbono**



Ambas estrategias tienen que apoyarse en la **economía circular** y la reducción de la demanda de energía y materiales en los procesos (**eficiencia energética y eficiencia de materiales**).

## Reducción de emisiones para procesos actuales



### EFICIENCIA ENERGÉTICA

Optimizar los procesos para lograr un consumo menor de energía. Estrategia de fácil implementación que no altera el proceso productivo en sí mismo.

### ELECTRIFICACIÓN

Utilizar energía eléctrica como fuente de energía en vez de combustibles fósiles.



### ENERGÍA GEOTERMAL PROFUNDA

Utilización del calor producido dentro del planeta como fuente de energía.

### BIOMASA

Reemplazar los carriers energéticos y materias primas por productos derivados de la biomasa (productos, químicos y energía).



### HIDRÓGENO A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES

Utilizar hidrógeno como fuente de energía.

### CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO

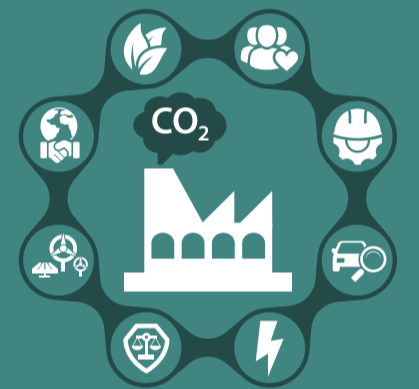
Atrapar y almacenar dióxido de carbono emitido por industrias, así como también de la atmósfera.



## Nuevas rutas de producción con baja huella de carbono

### CAPTURA Y UTILIZACIÓN DE CARBONO

Atrapar y reutilizar el dióxido de carbono para producir moléculas de plataforma.



### INTENSIFICACIÓN DE PROCESOS

Reducción drástica del tamaño y costo del equipamiento utilizado en procesos químicos. Se logra intensificando la transferencia de masa y materia, aplicando nuevos principios de separación o combinando funciones tradicionalmente realizadas en varios equipos en solamente uno.

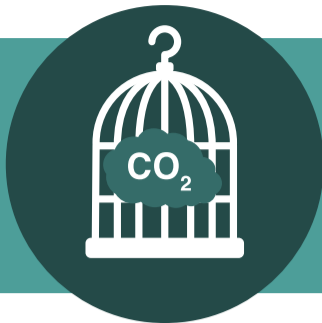


### ECONOMÍA CIRCULAR

Se basa en los siguientes principios: eliminar residuos y contaminación desde el diseño, mantener productos y materiales en uso y regenerar sistemas naturales.



Fuente: European Parliament, Energy-intensive industries, 2020

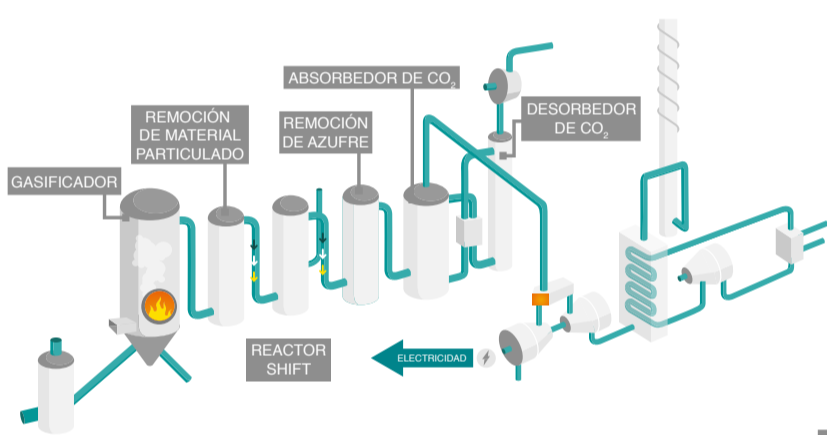


El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es liberado en procesos naturales (respiración o erupciones volcánicas) y en procesos asociados a la actividad humana, como deforestación, cambios en el uso de suelos y quema de combustibles fósiles. Es uno de los gases efecto invernadero (GEI) causantes del calentamiento global. La captura y almacenamiento del CO<sub>2</sub> puede ayudar a mitigar los efectos del cambio climático, al prevenir la entrada de este gas a la atmósfera.

## Formas de Capturar el Carbono

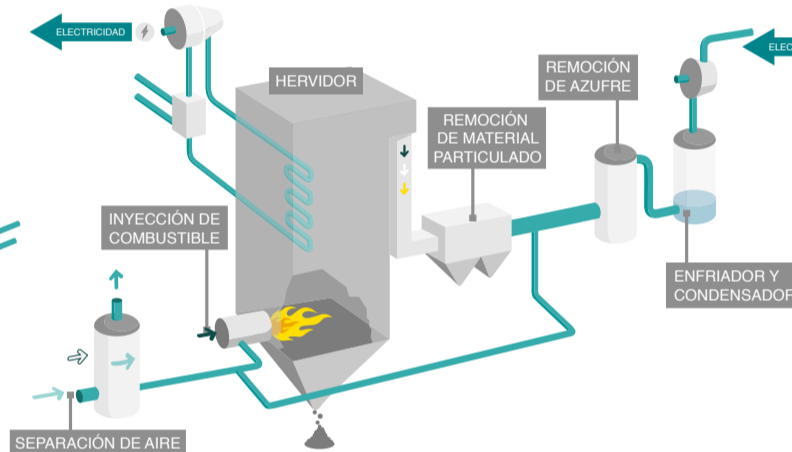
### PRE-COMBUSTIÓN

El CO<sub>2</sub> es capturado previo al proceso de combustión. Dependiendo del tipo de combustible este es gasificado o alimentado directamente al reformador, donde se produce gas de síntesis y CO<sub>2</sub> (15-40 %vol). A continuación, se separan los compuestos sulfurados. Luego, el CO<sub>2</sub> es capturado mediante absorción química o física. Finalmente el H<sub>2</sub> es utilizado en el proceso de combustión.



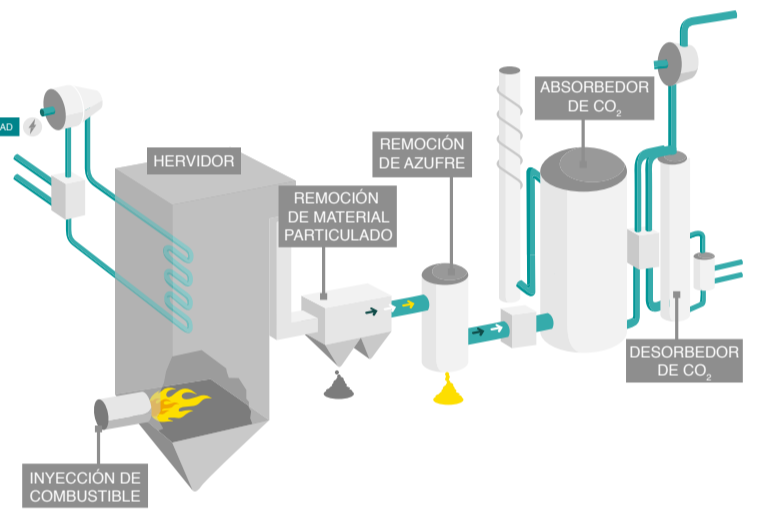
### OXYFUEL

La combustión se lleva a cabo directamente con oxígeno en vez de aire, por lo que los gases de combustión están constituidos por CO<sub>2</sub> (75-80 %vol.) y vapor de agua. El vapor de agua es separado a través de un proceso de condensación.



### POST-COMBUSTIÓN

El CO<sub>2</sub> es capturado posterior a la fuente de generación. Los gases de combustión, con una concentración de CO<sub>2</sub> de 4-14 %vol., son dirigidos a un proceso de separación. El CO<sub>2</sub> es removido de la corriente mediante un proceso de absorción química, previa separación de los contaminantes de la corriente.



Fuente: Vattenfall, "Carbon Capture and Storage - Technology, costs and way forward", 2008.

1. El CO<sub>2</sub> es capturado antes de ser liberado a la atmósfera a través de distintas tecnologías.

2. El CO<sub>2</sub> es comprimido para ser transportado o bombeado por tuberías para llegar a su lugar de almacenamiento o uso final.



### Capa de rocas-Impermeable a CO<sub>2</sub>

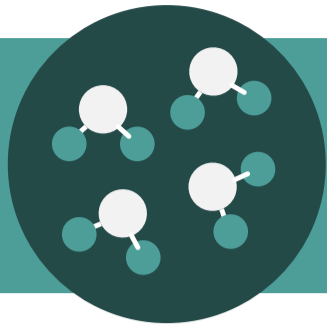
3. El CO<sub>2</sub> es bombeado para ser almacenado definitivamente en formaciones geológicas o en el océano profundo.

Reservorios petróleo/gas agotados

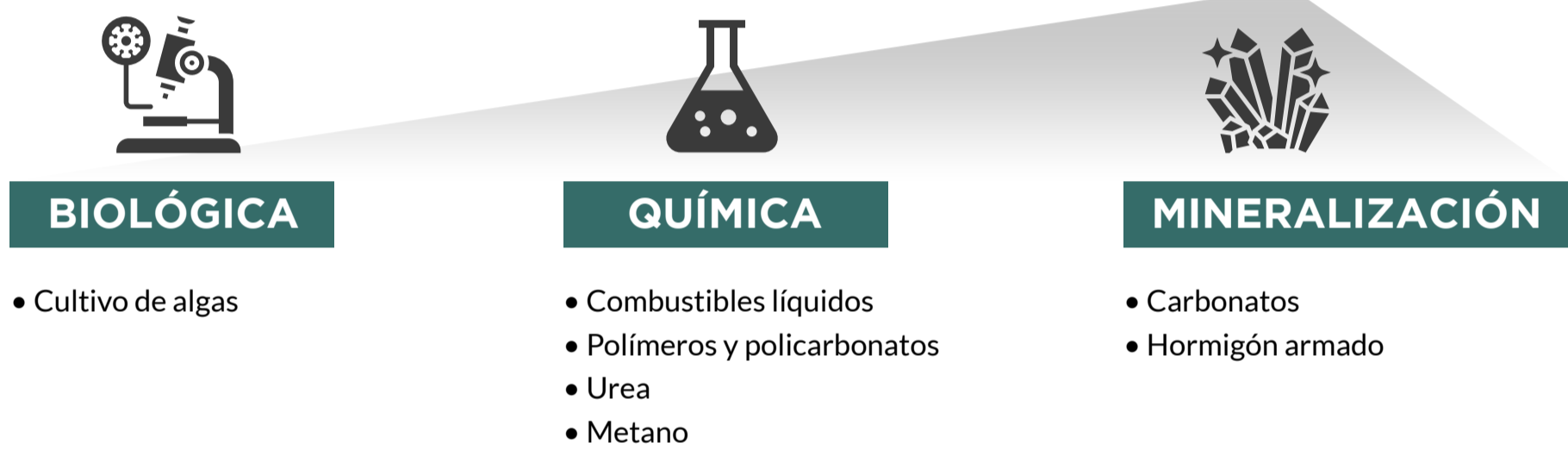
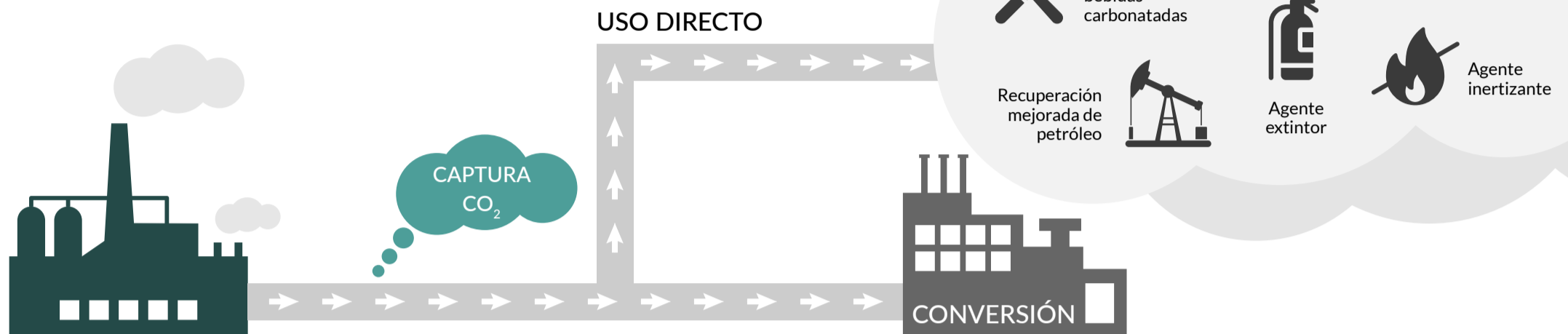
Lechos de carbón no explotables

### Formaciones salinas profundas

Secuestro en la profundidad del océano

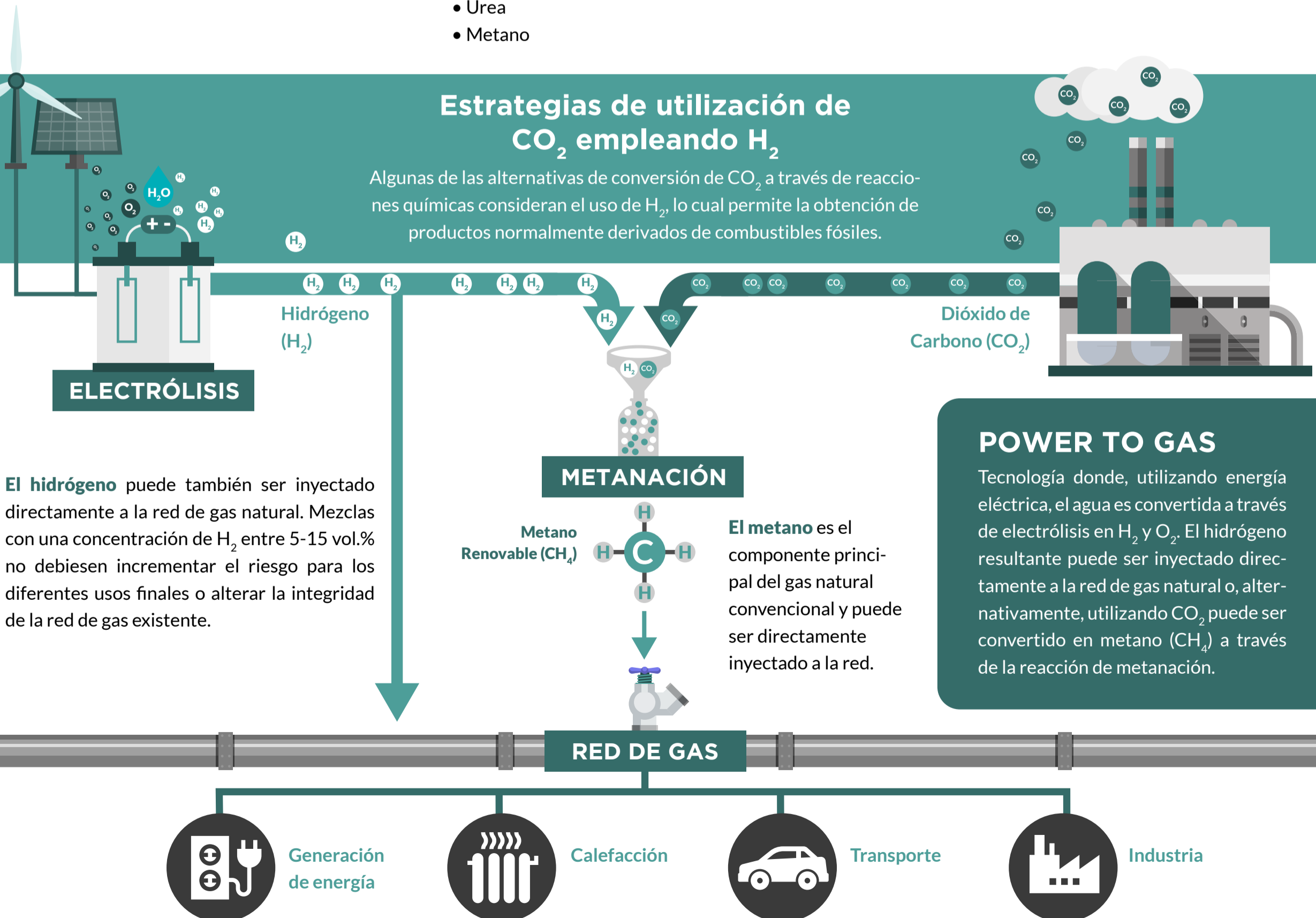


El CO<sub>2</sub> capturado puede emplearse como materia prima para la elaboración de productos o servicios de mayor valor agregado. El principal beneficio de este proceso es el reciclaje del carbono, reemplazando materias primas no renovables.



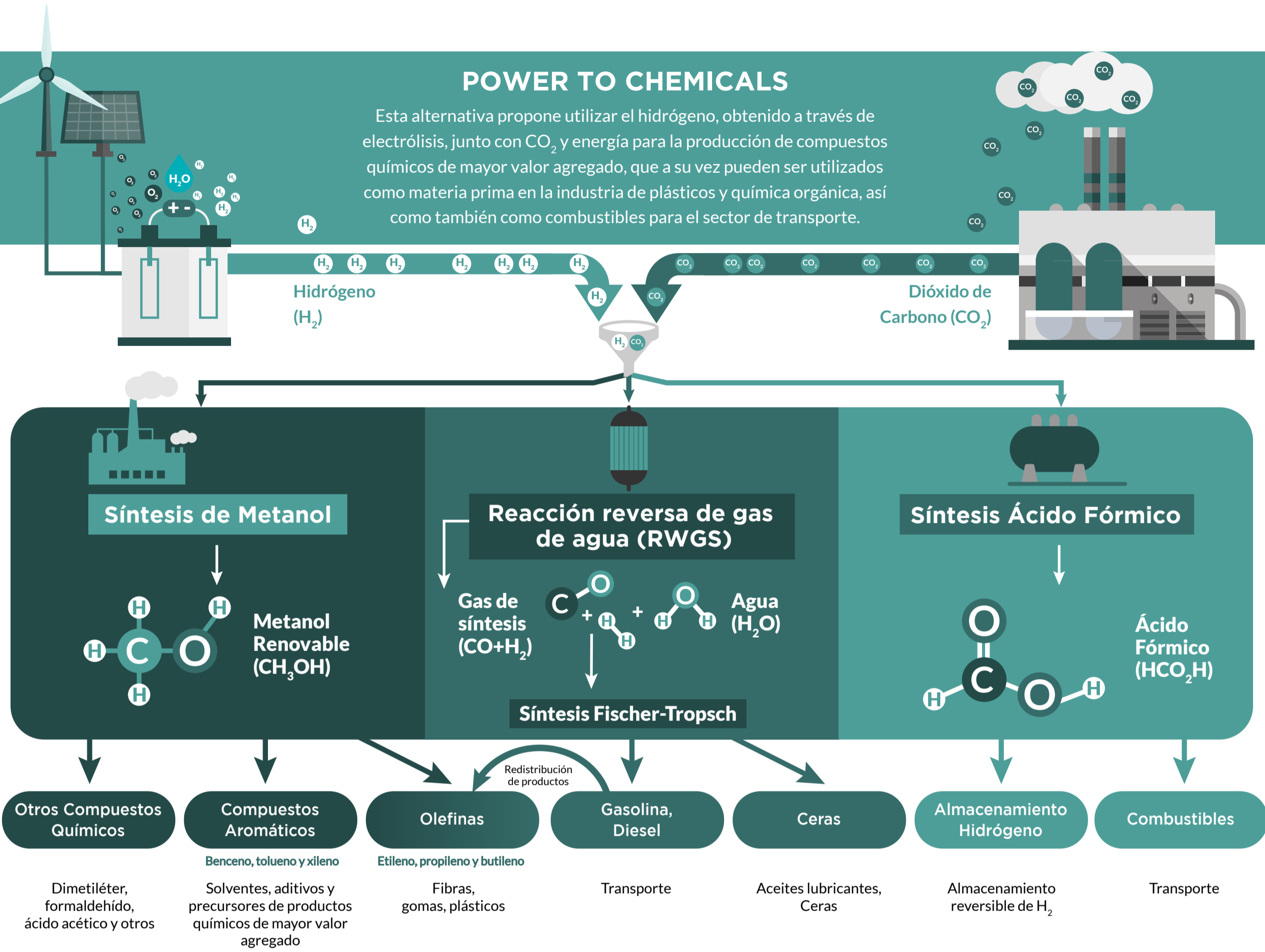
## Estrategias de utilización de CO<sub>2</sub> empleando H<sub>2</sub>

Algunas de las alternativas de conversión de CO<sub>2</sub> a través de reacciones químicas consideran el uso de H<sub>2</sub>, lo cual permite la obtención de productos normalmente derivados de combustibles fósiles.



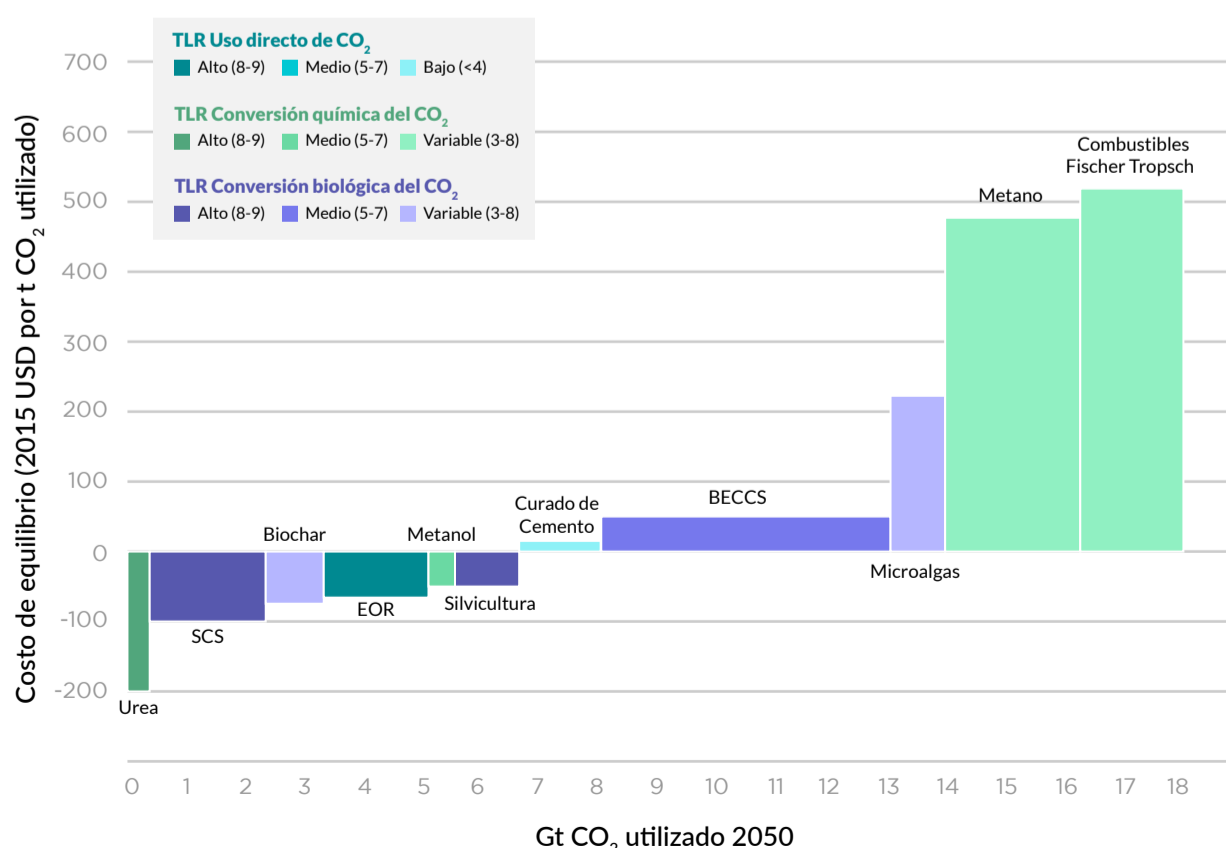
## POWER TO CHEMICALS

Esta alternativa propone utilizar el hidrógeno, obtenido a través de electrólisis, junto con CO<sub>2</sub> y energía para la producción de compuestos químicos de mayor valor agregado, que a su vez pueden ser utilizados como materia prima en la industria de plásticos y química orgánica, así como también como combustibles para el sector de transporte.



## Impacto y costos de tecnologías de utilización de CO<sub>2</sub>

Estimación de cantidad CO<sub>2</sub> que podría utilizarse con las distintas tecnologías (ancho de cada columna) y los costos de break even asociados (altura de las columnas).



Fuente: Adaptado de Hepburn et al. "The technological and economic prospects for CO<sub>2</sub> utilization and removal", 2019.

### Uso directo CO<sub>2</sub>

- Curado de cemento
- Recuperación mejorada de petróleo (EOR)

### Conversión Química del CO<sub>2</sub>

- Compuestos químicos: Metanol, Urea
- Combustibles: Metano (Power to gas), Producidos a través de Fischer Tropsch

### Conversión Biológica del CO<sub>2</sub>

- Microalgas, Bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS), Silvicultura, Pirólisis de biomasa
- (Biochar), Secuestro de carbono del suelo (SCS)

# 6. Políticas públicas y estrategias de financiamiento



## MENSAJES CLAVES

- A través de la Estrategia Nacional del Hidrógeno, Chile propone posicionarse como uno de los países líderes en la producción, el uso y la exportación de hidrógeno. Para cumplir estas metas, debe existir un fuerte apoyo financiero que acorte las brechas de costos entre la producción basada en recursos renovables y aquella basada en combustibles fósiles.
- En Chile existen diversos fondos de financiamiento para la Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i). Las principales entidades encargadas de entregar este financiamiento son la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) y la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID). Estos organismos cuentan con herramientas de apoyo y subsidio para las distintas etapas del ciclo de innovación e inversión. ANID se presenta como una herramienta de apoyo en etapas tempranas del ciclo, promoviendo el fortalecimiento de la investigación científica y tecnológica, y el desarrollo de nuevas áreas del conocimiento. CORFO, se enfoca en etapas más avanzadas del ciclo, apoyando la transferencia y difusión tecnológica, innovación precompetitiva y emprendimiento.
- Existe un conjunto de iniciativas orientadas al desarrollo científico-tecnológico y la innovación para generar impacto en sectores estratégicos del país tales como Consorcios y Programas tecnológicos, Centros e institutos I+D+i, que buscan promover la relación entre Universidades, Centros Tecnológicos y Empresas.
- Chile también tiene disponibles herramientas financieras para canalizar inversiones hacia activos verdes y promover proyectos que mitiguen los efectos del cambio climático. Dentro de los principales se encuentran los créditos verdes y los bonos verdes.
- Recientemente CORFO realizó el primer llamado para el financiamiento de proyectos de producción de hidrógeno verde entregando recursos por un máximo de 30 millones de dólares.
- A través de líneas de trabajo internacional, el Ministerio de Energía busca generar las condiciones para que Chile cumpla con los objetivos de la Estrategia Nacional, generando alianzas y abriendo posibilidades para el mercado del H<sub>2</sub> verde.

# Tipología de instrumentos públicos de apoyo a innovación e inversión

## ¿Cómo y de dónde se obtiene?



### Subsidios o aportes no reembolsables:

Contribuciones financieras directas a los beneficiarios, incluidos beneficios tributarios.



### Créditos o aportes reembolsables:

Contribuciones financieras a los beneficiarios con determinadas condiciones favorables para su devolución (plazo, tasas de interés, garantías, etc.).



### Inversión o aportes de capital:

Contribuciones al capital o patrimonio de los beneficiarios, en forma directa o a través de vehículos de inversión, estableciendo condiciones de salida predeterminadas.



### Apoyo técnico y servicios de información:

Servicios proporcionados por el personal de las agencias o sus entes intermediarios a los beneficiarios.



### Coordinación y networking:

Servicios realizados por el personal de las agencias o sus entes intermediarios para articular esfuerzos de empresas, emprendedores, centros de I+D, entre otros.



## Apoyos a I+D+i en el Ciclo de Innovación e Inversión

**Technology Readiness Level** (TRL) o en español, Escala de Madurez Tecnológica. Va desde el conocimiento fundamental (1) hasta la tecnología madura en el mercado (9).



### Desarrollo de Conocimientos

### Desarrollo de Tecnologías

### Desarrollo de Negocios

CONOCIMIENTO FUNDAMENTAL

Investigación básica y aplicada.

Demostración de la tecnología.

Plan piloto y escalamiento

NUEVOS PRODUCTOS EN EL MERCADO

TRL 1

TRL 2

TRL 3

TRL 4

TRL 5

TRL 6

TRL 7

TRL 8

TRL 9

Investigación a prueba de factibilidad.

Desarrollo de tecnología y prototipos.

Lanzamiento al mercado y comercialización.

Fase de inversión/comercialización.

Instrumentos de apoyo y subsidios a la I+D

Instrumentos de apoyo y subsidio al desarrollo tecnológico e innovación

Apoyo técnico y servicios de la información/créditos



**CORFO**





Entidades que pueden proveer servicios de I+D aplicado, apoyo a desarrollo de prototipos y pilotajes de tecnología. Algunos que trabajan en nuevas tecnologías en energía son:



### Centros de I+D+i

Financiados por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo.

**ANID**



### Centros Tecnológicos e Institutos Tecnológicos Públicos

Financiados por Corfo.

**CORFO**



## Consortios y programas tecnológicos



Programas colaborativos de I+D aplicada e Innovación Tecnológica que promueven la relación Universidades - Centros Tecnológicos - Empresas, con visión de largo plazo y alto impacto en sectores estratégicos. Pueden tener financiamiento de hasta 10 años, con cofinanciamiento de 50-70% (dependiendo si son más apropiables o pre-competitivos). Algunos consorcios relacionados con hidrógeno son:



**Consortio de Combustión Dual: Hidrógeno-Diesel para camiones de extracción mineros (2018)**  
Alset Global



**Consortio de electromovilidad: Fuel Cells para flotas mineras (2018)**  
UTFSM



**Programa Innova Alta Tecnología: Proyecto Hydra. Desarrollo de módulos de trenes de potencia híbridos para minería**  
CSIRO Chile



## Otros programas de apoyo a innovación

**Instituto Chileno de Tecnologías limpias (ICTL)**

Desarrollo de tecnologías limpias en los sectores de minería, energía, baterías, manufactura y relacionados. Licitación de Corfo con recursos de los contratos del litio (aporte máx. de USD\$193 millones en 10 años). En proceso de conformación.

**Aceleradora de Hidrógeno Verde de la Agencia de Sostenibilidad Energética**

Acompañamiento técnico y cofinanciamiento de iniciativas piloto, que sean demostrativas y replicables. \$300 millones de pesos para entregar al cofinanciamiento de las iniciativas.



**Primer llamado para el financiamiento de proyectos de H<sub>2</sub> Verde, Corfo**

Aporte a la inversión en electrolizadores para el desarrollo de nuevos Proyectos de Hidrógeno Verde en Chile, mayores a 10 MW y cuyo comisionamiento sea, a más tardar, diciembre de 2025. Aporte máximo de USD\$30 millones por proyecto.



## Mecanismos de financiamiento para innovación y emprendimiento dinámico



### Redes de Inversionistas Ángeles

Personas o entidades que invierten capital en una start-up o empresa emergente, usualmente a cambio de una participación accionaria.

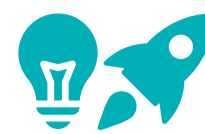
Algunos ejemplos: Chile Global, Santiago Angels, Dadneo, Fen Ventures



### Plataformas de crowdfunding

Red de financiamiento colectivo, normalmente online, que a través de donaciones económicas o de otro tipo, consiguen financiar un determinado proyecto a cambio de recompensas o participaciones de forma altruista.

Algunos ejemplos: Crowdfunding.cl, Broota, Doble Impacto, Ideame



### Venture Capital

Inversiones que sirven para financiar compañías de pequeño o mediano tamaño, normalmente startups con un alto potencial de crecimiento a cambio de un porcentaje de la empresa. Generalmente entra en juego una vez la startup ya ha pasado de la primera fase o fase semilla (a diferencia de otros modos de financiación como los inversionistas ángeles).

Algunos ejemplos: Wayra, Chile Global, Screen, Allvp, Dadneo, Engy Factory, Digevo Ventures, Endurance, Beagle Ventures, Genesis Ventures, Consorcio, Chile Ventures, Alaya VC, Masisa Lab, Kayyak, Güil Mobility Ventures, Austral Capital, Magma Partners, Aurus Capital, Devlabs

## Crédito/Financiamiento verde

**CRÉDITO VERDE**



**CORFO**

Programa de refinanciamiento para potenciar el desarrollo y ejecución de proyectos que mitiguen los efectos del cambio climático y/o mejoren la sustentabilidad ambiental de las empresas, reimpulsando la inversión en iniciativas de:

Energía Renovable

Eficiencia Energética

Economía Circular



Es un refinanciamiento mediante préstamos otorgados por instituciones financieras hasta 15 años plazo y hasta un 70% del monto total de inversión con tope de USD20.000.000.

**BONOS VERDE**



Títulos de crédito emitidos por instituciones públicas o privadas bajo el compromiso de invertir en un proyecto verde o sostenible. Es decir, son instrumentos que se venden a inversores con la promesa de una rentabilidad y cuyo dinero conseguido irá destinado a financiar proyectos sostenibles. Chile fue el primer país del continente americano en emitir bonos verdes. Los focos de los proyectos elegibles son los siguientes:



El Ministerio de Hacienda creó una **mesa de finanzas verdes** publico-privada para buscar puntos de encuentro entre los dos sectores para introducir instrumentos financieros verdes al mercado.

**FUENTES BI O MULTILATERAL**



**Fondo Verde para el Clima**



**Gef, Global Environment Facility**



**IFC, International Finance Corporation**



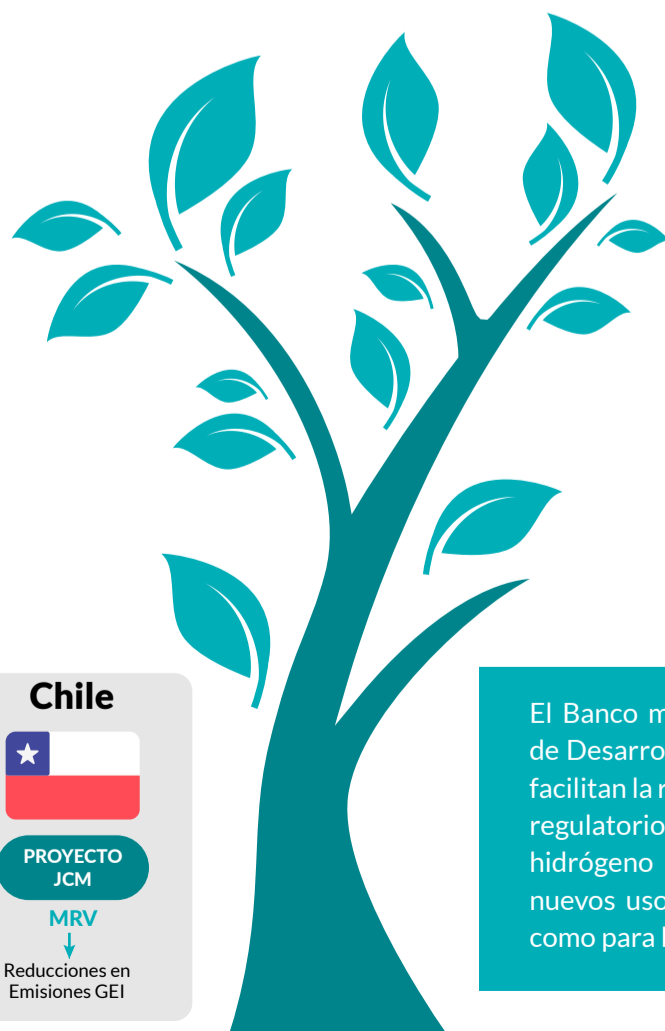
**Climate Funds Update**



**BID Invest**

### Mecanismo Conjunto de Crédito (JCM) – Japón

Subsidio para facilitar inversiones en tecnologías limpias que opera entre Japón y los 17 países con los que tiene esta colaboración. Chile es uno de los 3 países de América. A cambio del subsidio, el Gobierno de Japón promueve que la disminución de gases invernaderos sirvan a su país.



**SERVICIOS DE INFORMACIÓN/ APOYO TÉCNICO**



• Chile es miembro activo del International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy.



• Co-lidera la Misión de H<sub>2</sub> de Mission Innovation 2.0.



• Participa de la iniciativa de H<sub>2</sub> del Clean Energy Ministerial.



• Iniciando y explotando relaciones bilaterales que abran rutas a la exportación (Energy Partnership con Alemania y Memorandum de Entendimiento (MOU) con Singapur y Puerto de Rotterdam ya activos)



• Continúan posicionando a Chile en foros y eventos internacionales relevantes.



El Banco mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo son instrumentos de apoyo que facilitan la realización de estudios sobre temas regulatorios con factibilidades técnicas de hidrógeno verde que permitan ir habilitando nuevos usos del H<sub>2</sub> tanto a nivel doméstico como para la exportación.



**BANCO MUNDIAL**  
BIRF • AIF | GRUPO BANCO MUNDIAL

