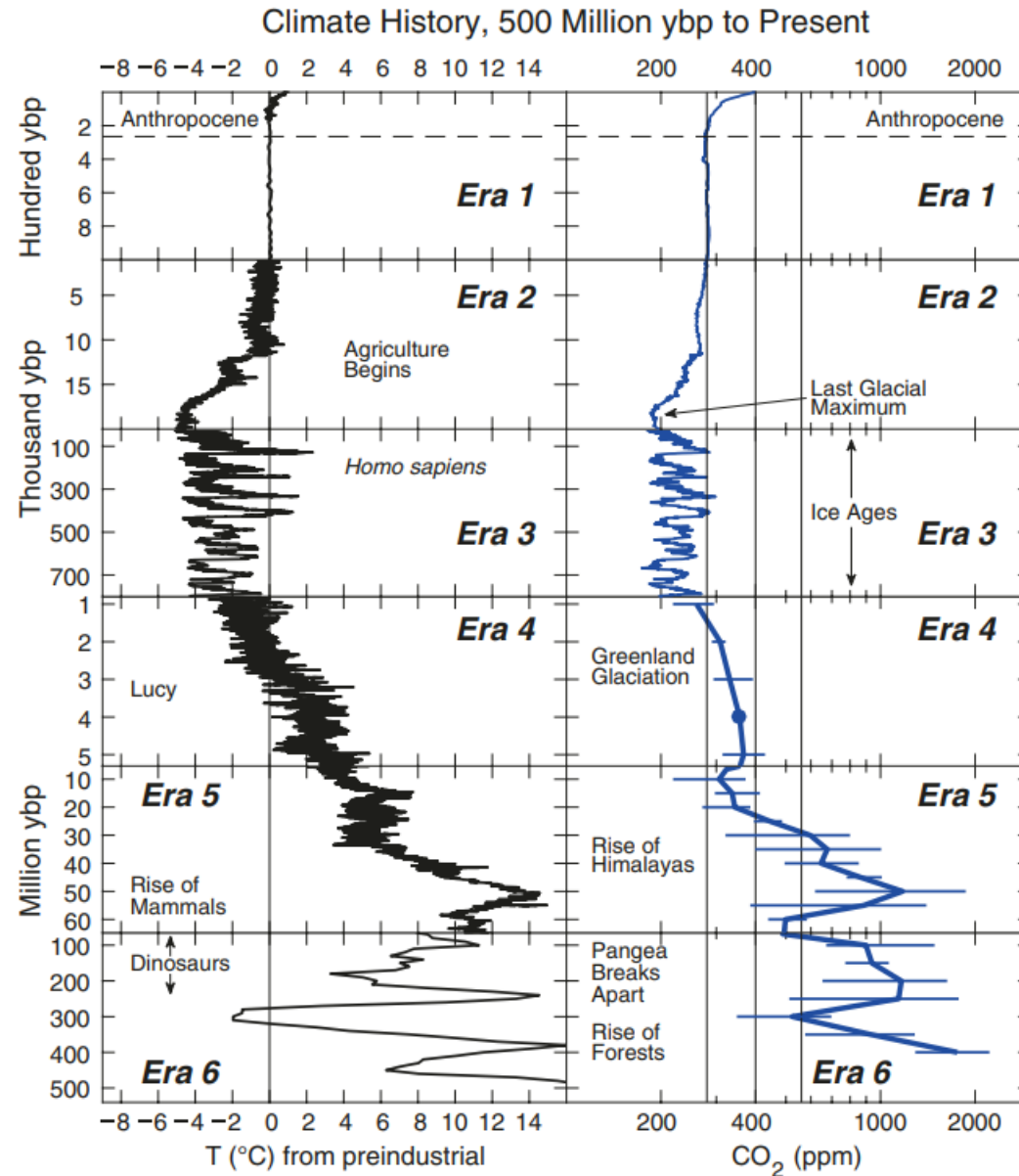


Transición Energética en la Península Ibérica

PONENTE: Antonio López Rodríguez
Transición Energética y Cambio Climático, Repsol

TEMA: Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono

La historia de los Cambios Climáticos



Source: Salawitch, R.J., Bennett, B.F., Hope, A.P. (2017)

Consenso científico



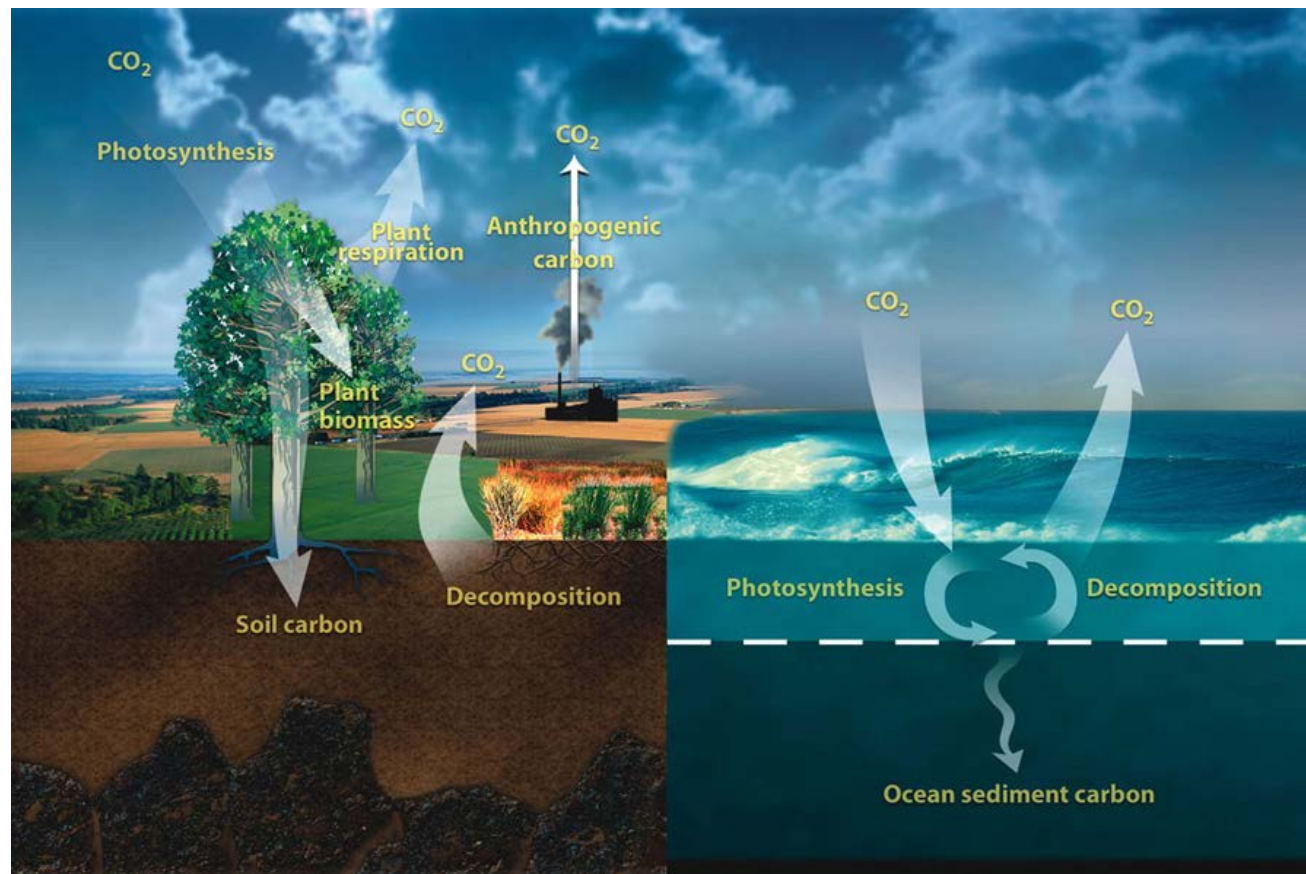
El cambio climático se define como las variaciones del clima atribuibles directa o indirectamente a las actividades humanas que modifican la composición de la atmósfera, y que se suman a la variabilidad natural del clima.

Las causas principales se derivan de las emisiones de GEI generadas en la quema de combustibles fósiles, la destrucción de bosques y emisiones de origen natural.

Tras la Revolución Industrial, las emisiones de GEI a la atmósfera han aumentado significativamente debido fundamentalmente a la utilización intensiva de combustibles fósiles para satisfacer una demanda de energía cada vez mayor.

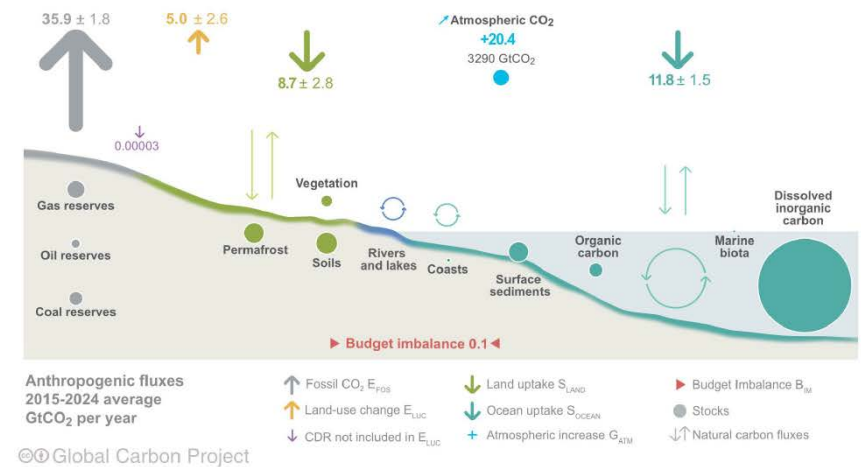
¡Y ahora toca regular el termostato!

Perturbación antropogénica del ciclo global del carbono



Perturbation of the global carbon cycle caused by anthropogenic activities, global annual average for the decade 2015–2024 (GtCO_2/yr)

The global carbon cycle



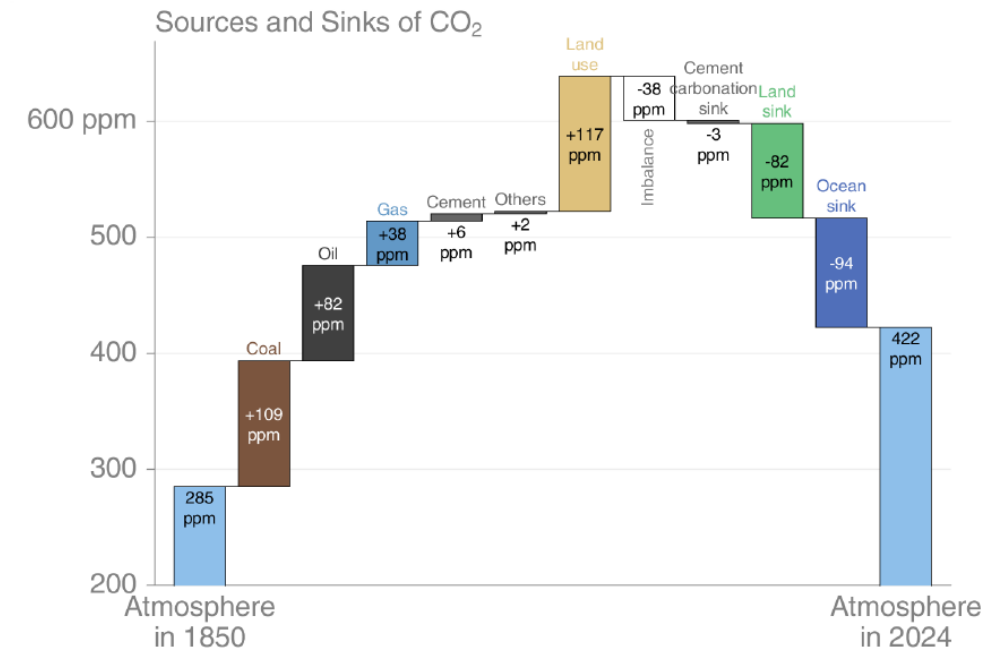
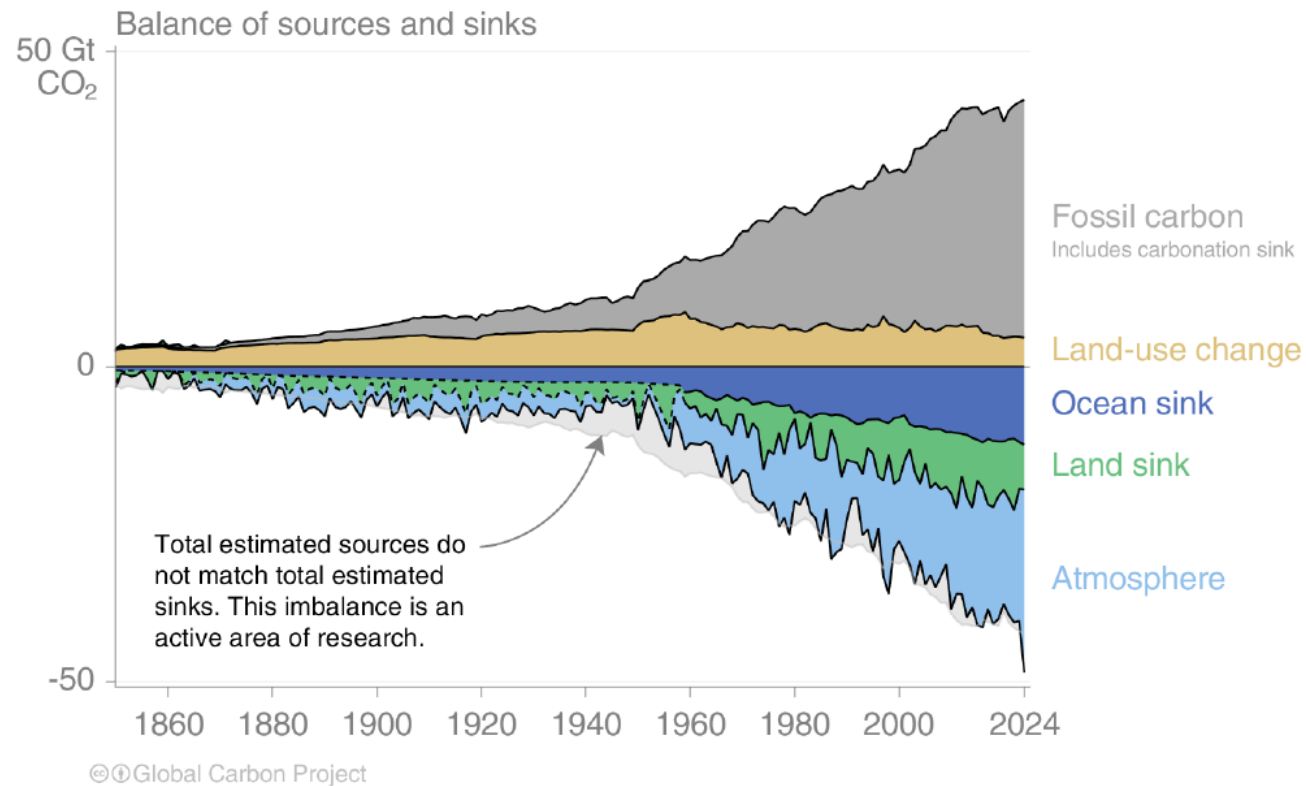
CDR here refers to Carbon Dioxide Removal besides those associated with land-use that are accounted for in the Land-use change estimate.

The budget imbalance is the difference between the estimated emissions and sinks.

Source: NOAA-GML; Friedlingstein et al 2025; Global Carbon Project 2025

“Global Carbon Budget” 1850-2024

Carbon emissions are partitioned among the atmosphere and carbon sinks on land and in the ocean
The “imbalance” between total emissions and total sinks is an active area of research



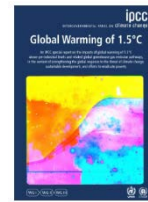
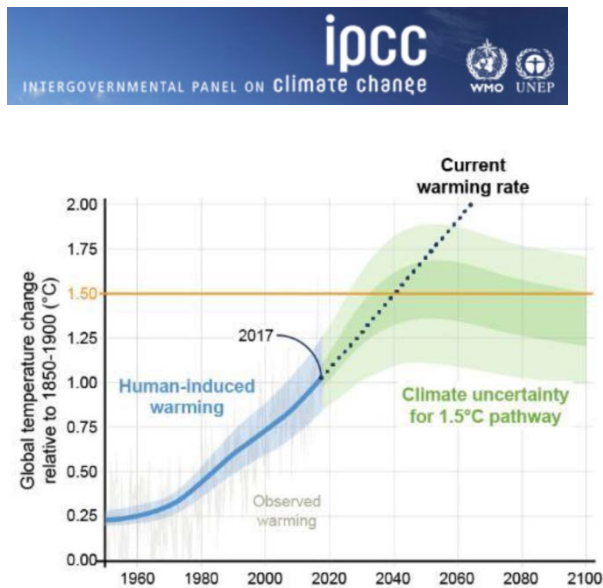
¡¡¡Y en 2025 ya con datos puntuales por encima de 430 ppm, en el observatorio de Mauna Loa!!!

Source: [Friedlingstein et al 2025](#); [Global Carbon Project 2025](#)

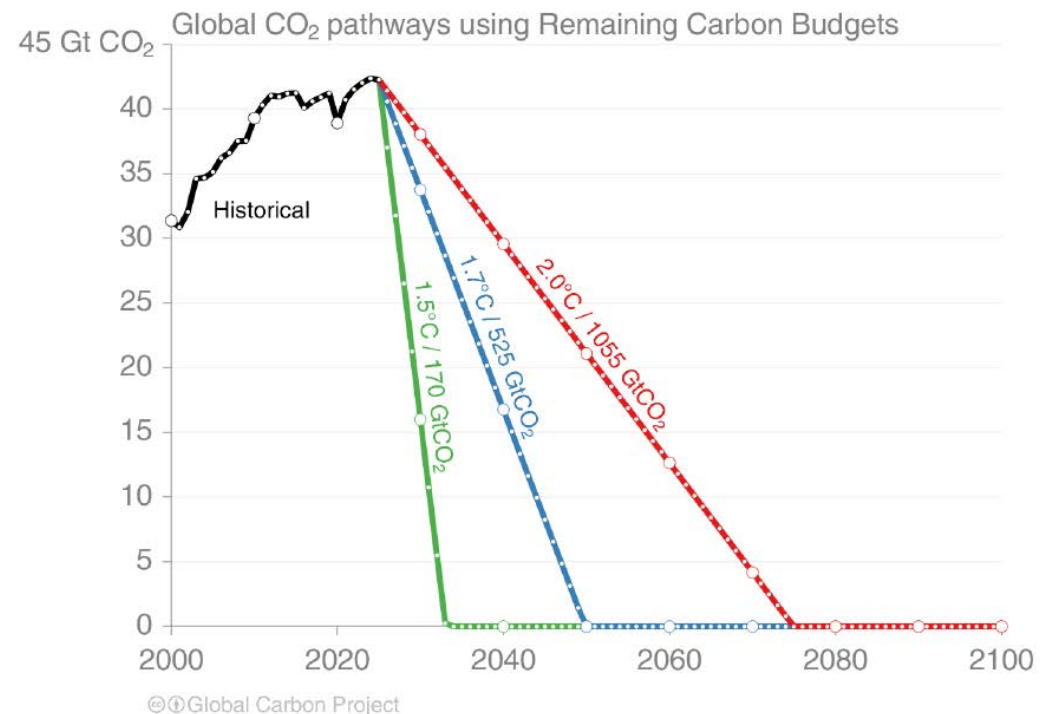
Pero la concentración de CO₂ en la atmosfera se traduce en grados...

Acuerdo de París

Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático

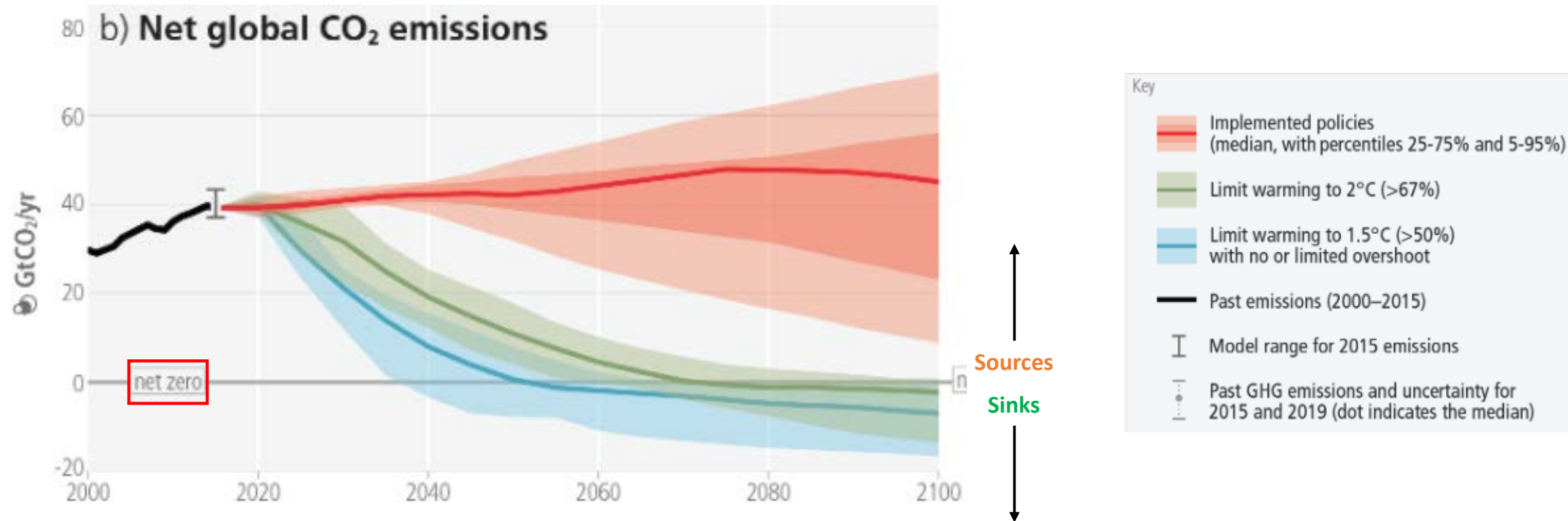


Global CO₂ emissions must reach zero to limit global warming.
All-else-equal, the later the net zero year, the higher the warming level.



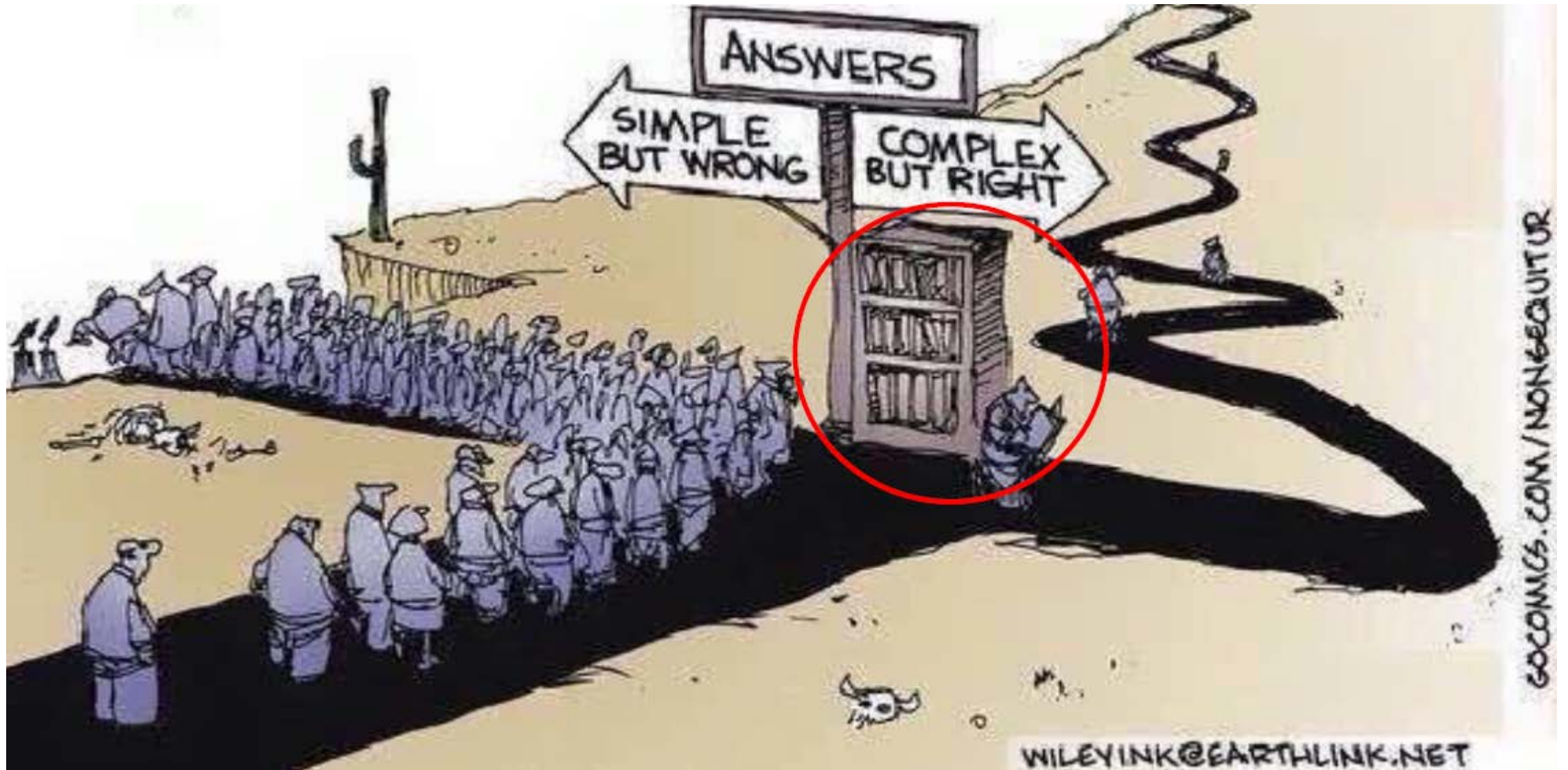
1.5°C (2°C), se prevé que las emisiones de CO₂ disminuyan en aproximadamente un 45% (20%) en 2030 en la mayoría de las rutas y alcancen el cero neto alrededor de 2050 (2075).

Posibles futuros según el IPCC



Source: IPCC AR6 (2023)

Bienvenidos a la complejidad (en tiempos de populismo...)



El primer paso para resolver un problema es formularlo adecuadamente

Identidad de Kaya

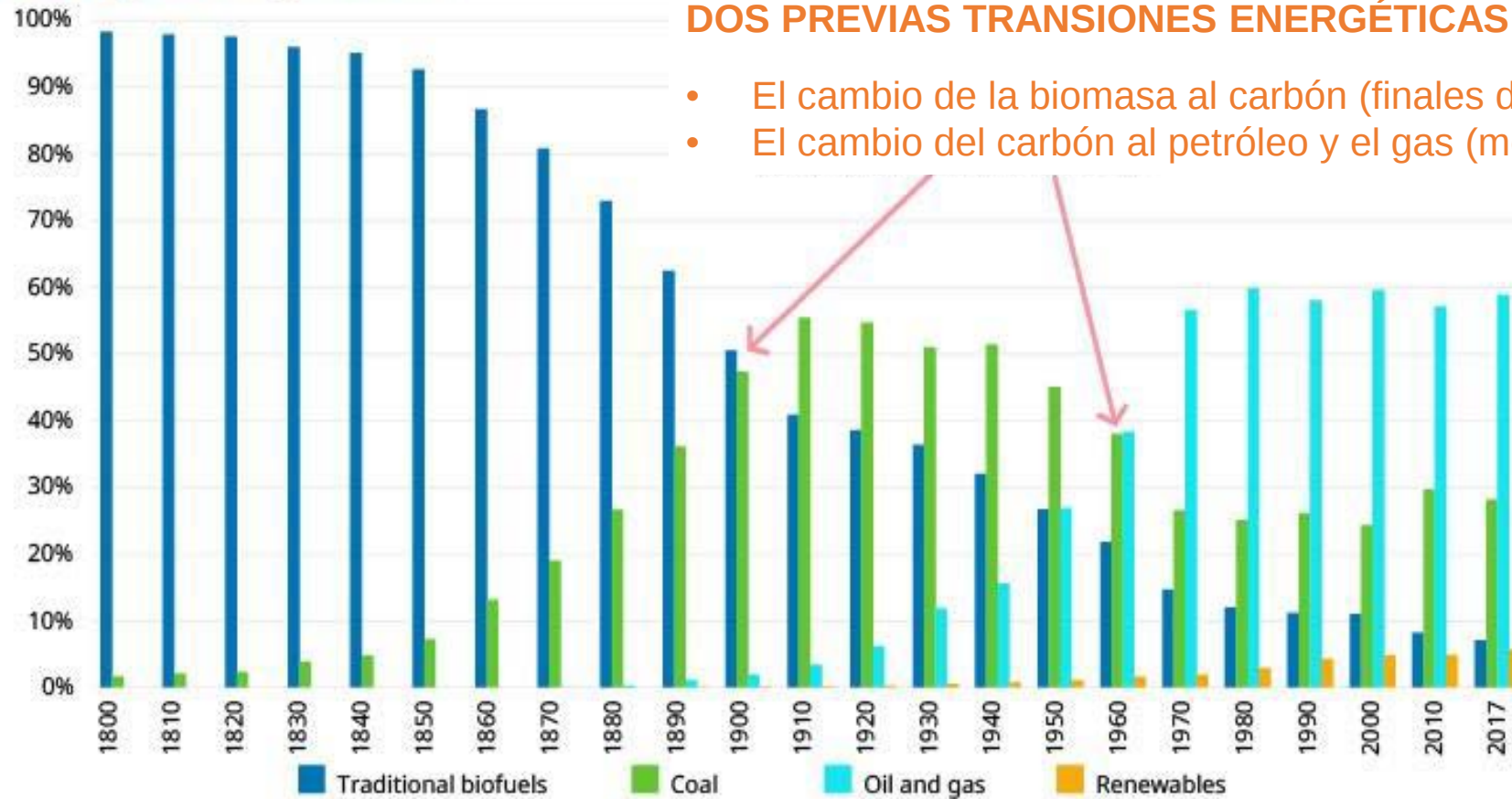
$$CO2 \uparrow = \left(\underbrace{P \times \frac{PIB}{P}}_{\text{Demografía} \uparrow \text{ Bienestar} \uparrow} \times \underbrace{\frac{E}{PIB} \times \frac{CO2}{E}}_{\text{Tecnología} \downarrow \text{ Tecnología} \downarrow} \right) - \underbrace{CO2 \downarrow}_{\text{Tecnología} \downarrow}$$

La Transición Energética: un desafío sistémico

- Desacoplar crecimiento económico y demográfico del aumento de emisiones
- Reducir emisiones: avanzar urgentemente hacia una economía – forma de vida de baja intensidad energética y descarbonizada
- Desarrollar e implementar a gran escala sumideros de CO2 (NBS-NCS, CCS, CCUS, BECCS, DACS...)

En realidad no estamos en la primera transición energética...

Change in global primary energy consumption
Share of global energy consumed



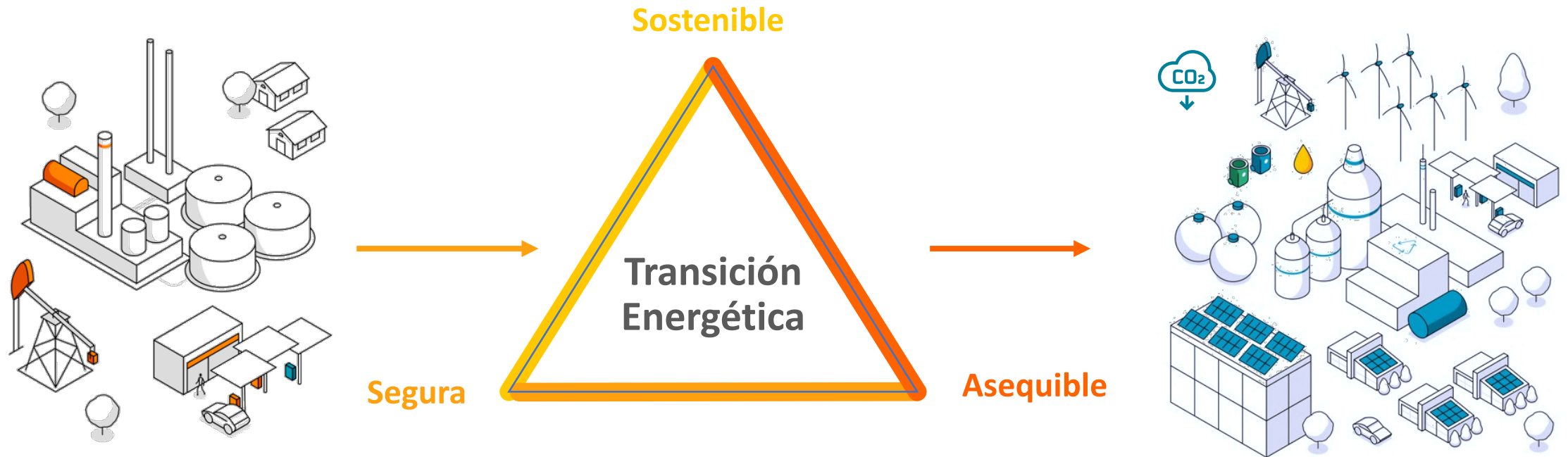
DOS PREVIAS TRANSIONES ENERGÉTICAS:

- El cambio de la biomasa al carbón (finales del siglo XIX) seguido de
- El cambio del carbón al petróleo y el gas (mediados del siglo XX)

Source: BP, Our World in Data, Schrodgers, as of January 2019.

283180

... ¿estamos en una transición o una disrupción?



Hoy ● ————— ● 2050

¿La sabremos gobernar?

- Impactos sobre la estabilidad social, económica, financiera y geopolítica
- ¿Múltiples velocidades?
- ¿Habrá perdedores y ganadores?

Necesitamos todas las soluciones tecnológicas...

¿Cuánto gas de efecto invernadero emitimos con cada cosa que hacemos?

Fabricar (cemento, acero, plástico) **31 %**

Consumir energía (electricidad) **27 %**

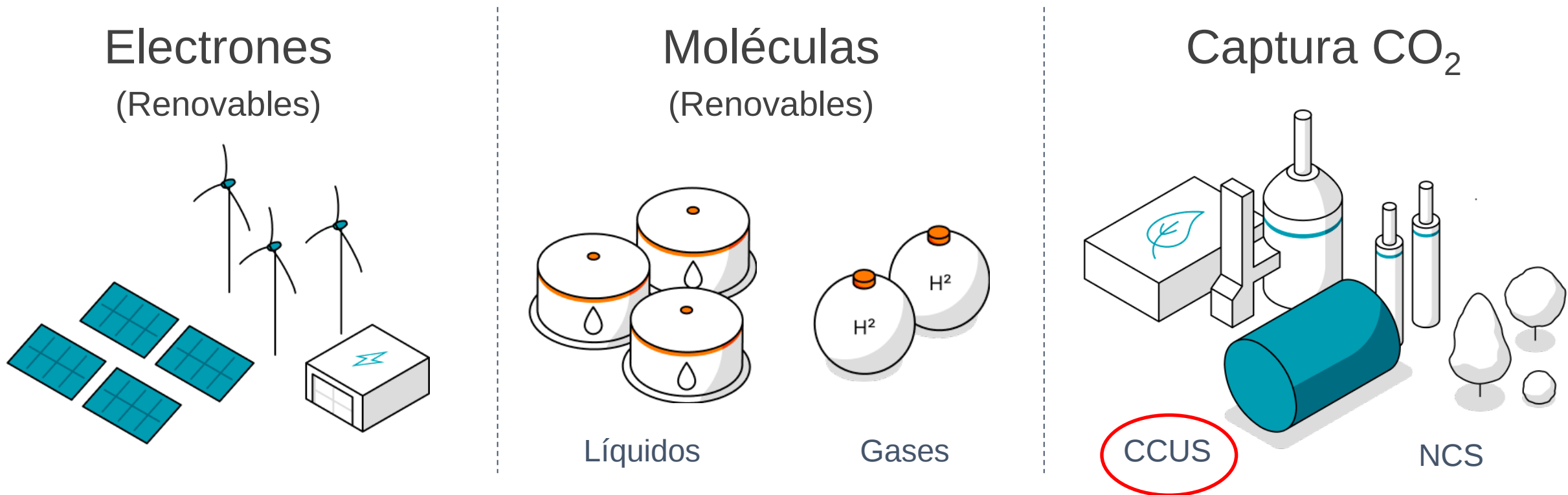
Cultivar y criar (plantas, animales) **19 %**

Desplazarnos (aviones, camiones, cargueros) **16 %**

Calentar o enfriar (calefacción, aire acondicionado, refrigeración) **7 %**

Fuente: Como evitar un desastre climático, Bill Gates (2021); IPCC (2014)

... porque descarbonización no es solo electrificación



Grandes desafíos científicos y tecnológicos:

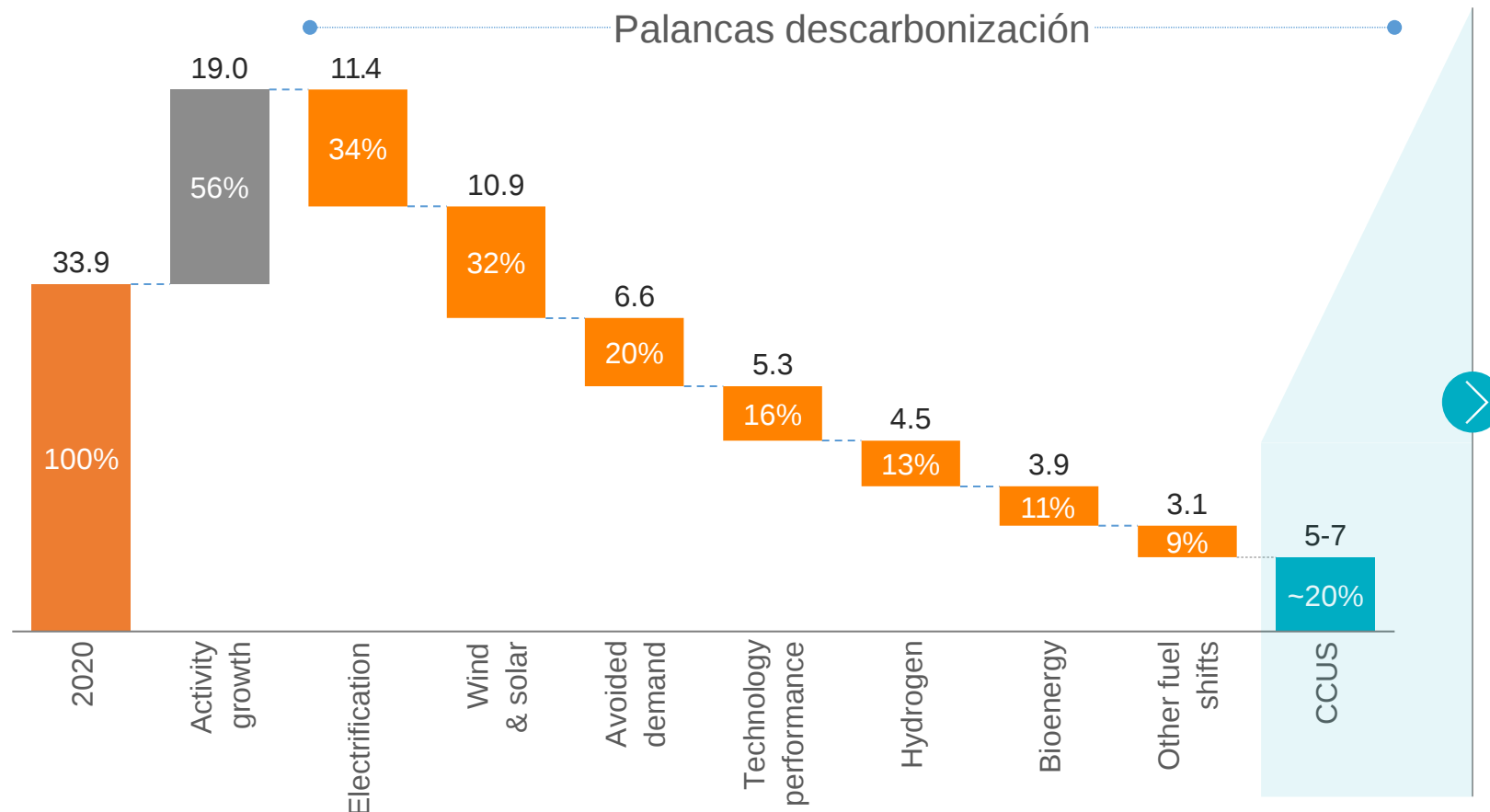
- Eficiencia
- Descarbonización (H^2 , nuclear fisión y fusión, bioenergía, e-combustibles,...)
- Electrificación y almacenamiento a gran escala
- Economía circular
- Metales críticos y nuevos materiales
- **NBS / NCS, CCS, CCU, BECCS, DACCS... Tecnologías de emisiones negativas**

CCUS



Papel del CCUS en la transición energética

Reducción de emisiones por palanca de mitigación para cero emisiones netas en 2050 (Gt CO₂ equivalente)



Source: IEA Net Zero Scenario (2021)

Rol ampliamente aceptado del CCUS

ipcc

"CCS has the potential to reduce overall mitigation costs and increase flexibility in achieving greenhouse gas emission reductions"

European Environment Agency

"Carbon capture, use and storage can provide a key contribution to tackling industries like cement, iron and steel, aluminum, pulp and paper, and refineries emissions"

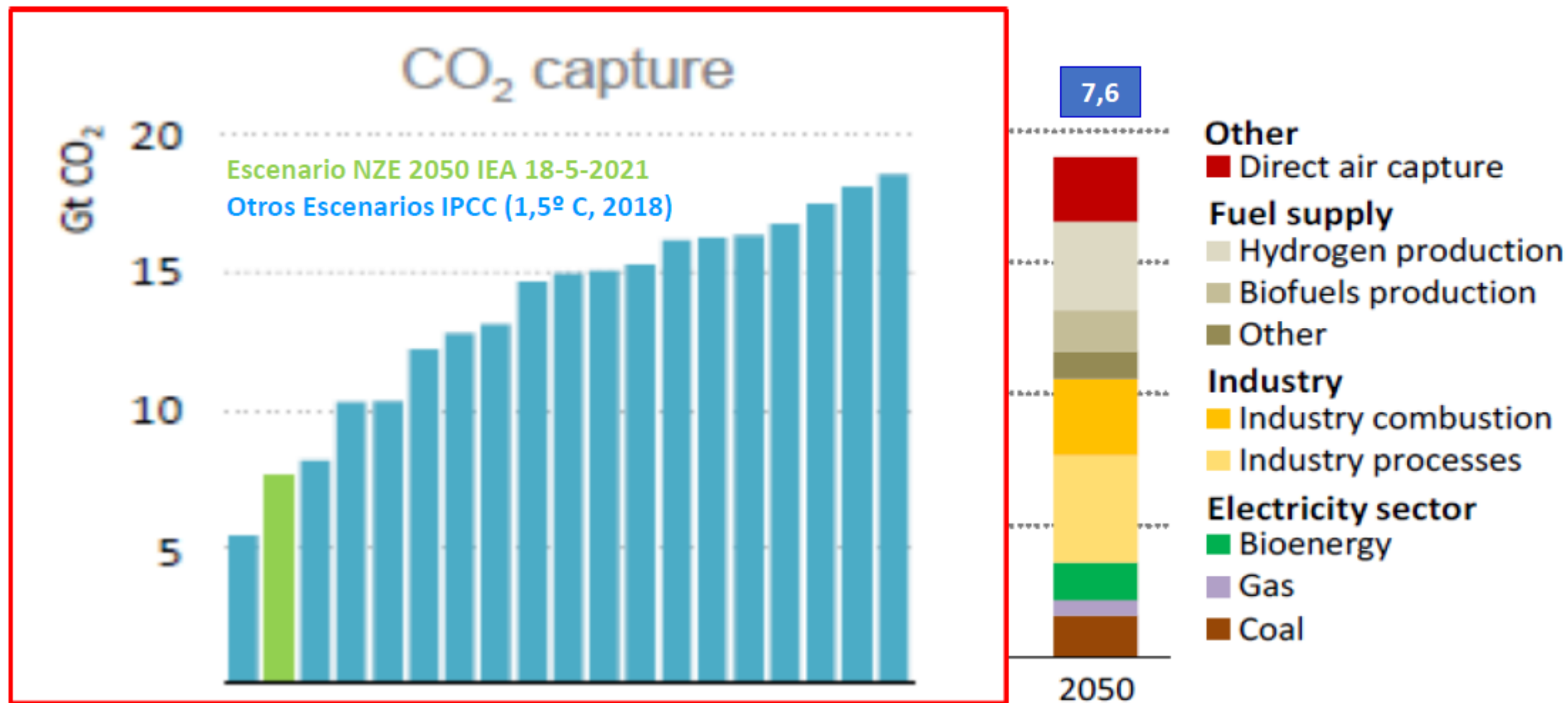
iea

"Carbon capture, utilization and storage, or CCUS, is an important emissions reduction technology that can be applied across the energy system"

eia

"CCUS is often viewed in the context of power production. However, capture and storage of CO₂ from industrial sources is also vitally important to reducing greenhouse gas emissions "

El CCUS es necesario en la transición energética...



Source: IEA Net Zero Scenario (2021); en la revision de 2023, la IEA reduce su estimación a 6 Gt CO₂ en 2050.

Según la AIE, el 95% del CO₂ capturado en 2050 se almacenará permanentemente y solo el 5% se usará en la producción de combustibles sintéticos.

El CCUS es necesario en la transición energética...

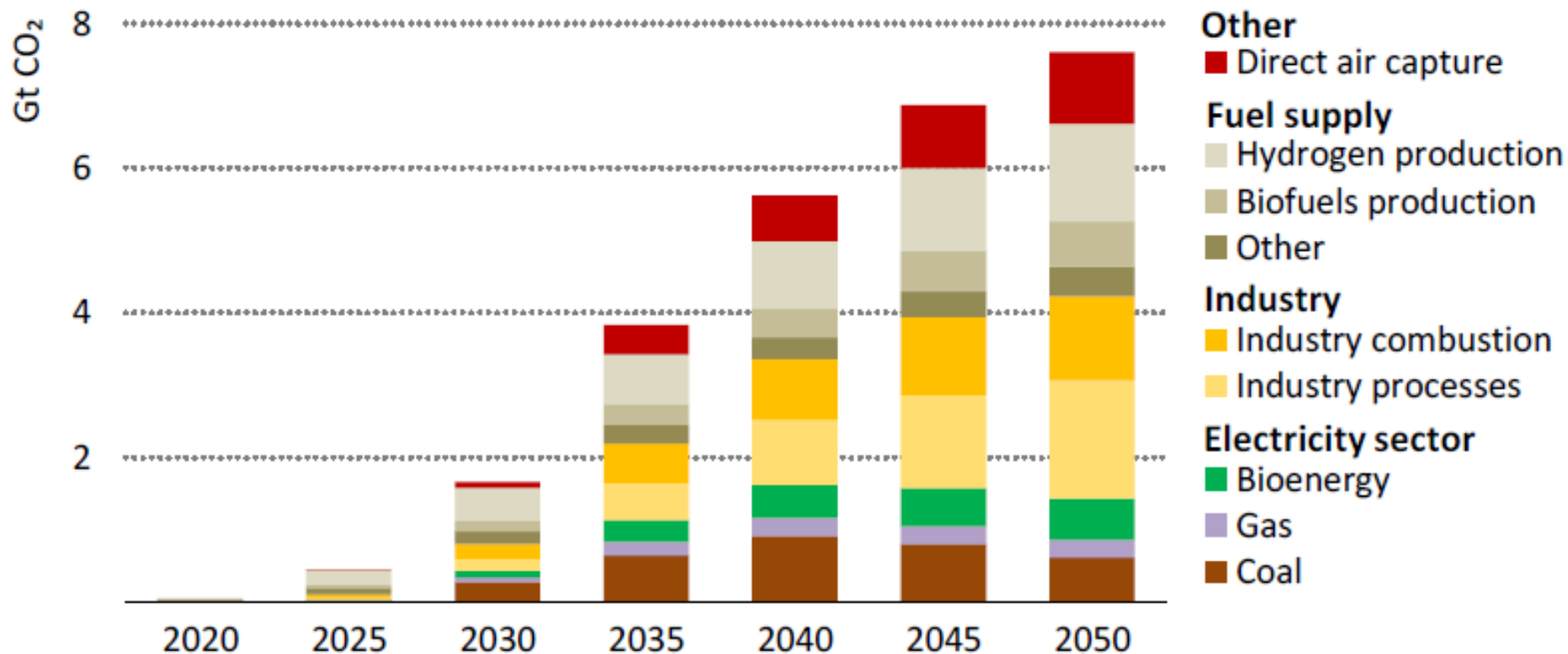
THE ROAD TO NET-ZERO

	Coal	Oil and Gas	Gross CO2	CCS	CO2 Removal	Net CO2
Equinor Bridges	-93%	-72%	1.1	2.0	4.3	-5.2
IEA Net Zero	-92	-81	7.7	5.9	1.8	0.0
DNV Net Zero	-90	-65	8.0	6.4	1.6	0.0
Shell Horizon	-74	-54	14.3	5.8	8.5	0.0
BP Net Zero	-86	-66	9.3	5.2	2.0	2.0
IPCC AR6 1.5°C	-86	-41	17.0	9.4	3.9	3.8
IEA Announced Pledges	-77	-45	16.2	3.7	0.8	11.7
IPCC AR6 2.0°C	-75	-18	22.8	6.6	2.6	13.6
Equinor Walls	-56	-1	20.9	0.9	0.0	20.0
DNV Base	-62	-23	22.3	1.0	0.3	21.0
Shell Surge	-54	-4	27.6	0.8	4.2	22.6
Shell Archipelagos	-33	-9	31.0	0.6	3.1	27.3
IPCC AR6 2.5°C	-53	16	33.2	2.7	2.0	28.5
IEA Stated Policies	-46	-3	29.1	0.4	0.1	28.6
BP Current Trajectory	-35	-9	31.4	0.8	0.0	30.5
IPCC AR6 3.0°C	-22	26	41.1	0.8	1.9	38.4
IPCC AR6 4.0°C	37%	31%	53.5	0.2	1.5	51.8

Change in fossil fuel supply, gross emissions, carbon captured, carbon removed and net emissions to 2050 under various scenarios in % change between now and 2050 and billion tons of CO2/yr. CO2 removal includes DAC, bioenergy with CCS and nature-based solutions. Source: BP, DNV, Equinor, IEA, IPCC, Shell

¡Pero no parece haber un despliegue de proyectos suficiente!

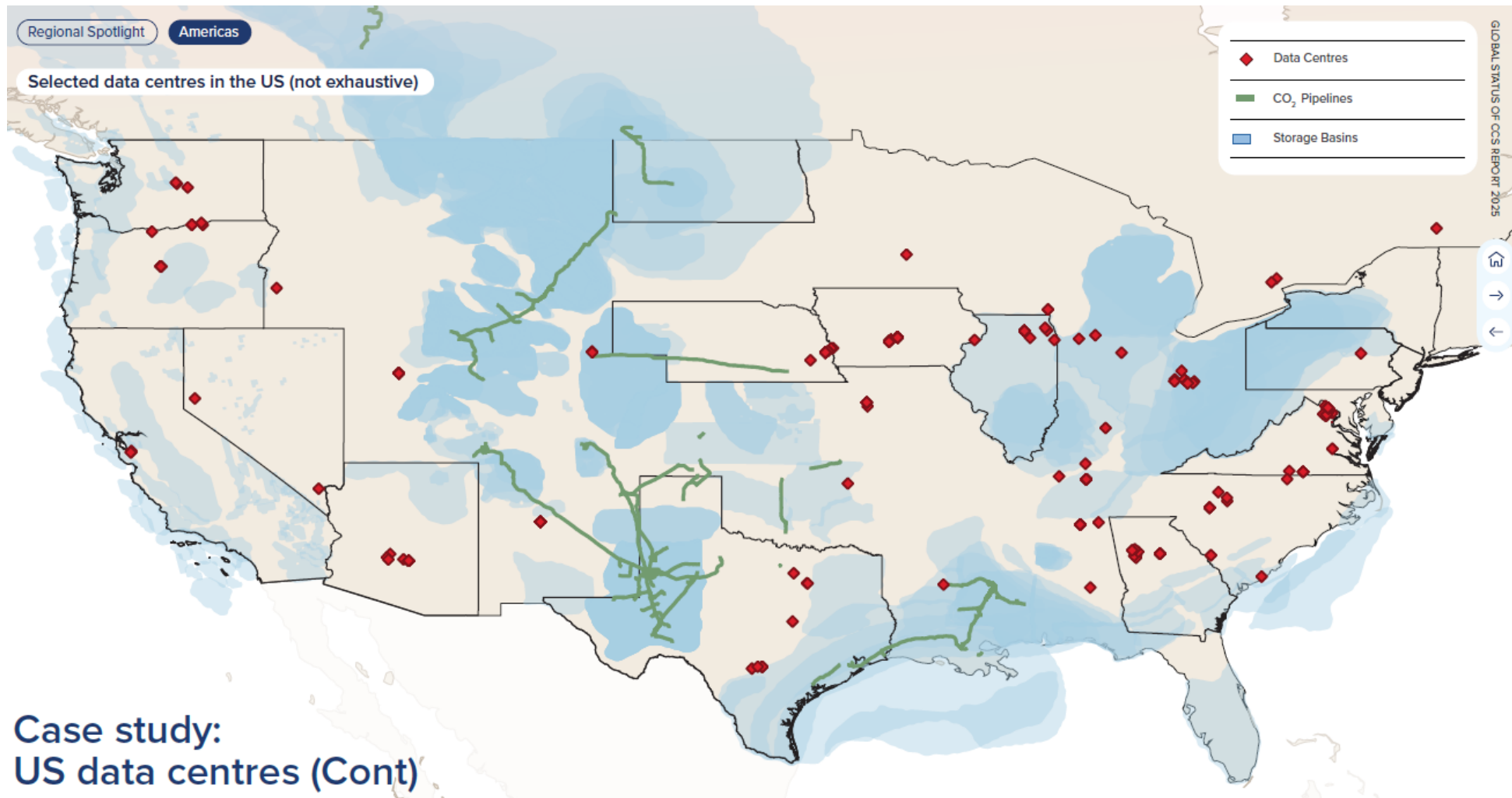
Figure 2.21 ▶ Global CO₂ capture by source in the NZE



Source: IEA Net Zero Scenario (2021); en la revision de 2023, la IEA reduce su estimación a 1 y 6 Gt CO₂ en 2030 y 2050, respectivamente; Global CCS Institute 2024

En 2025 las instalaciones de captura en operación tienen una capacidad de 64 Mt CO₂ por año (casi 110 Mt CO₂/a si sumamos las instalaciones en construcción). Y más del 40% de los proyectos en USA.
En cualquier caso, muy lejos de las necesidades a futuro de un escenario como en NZE

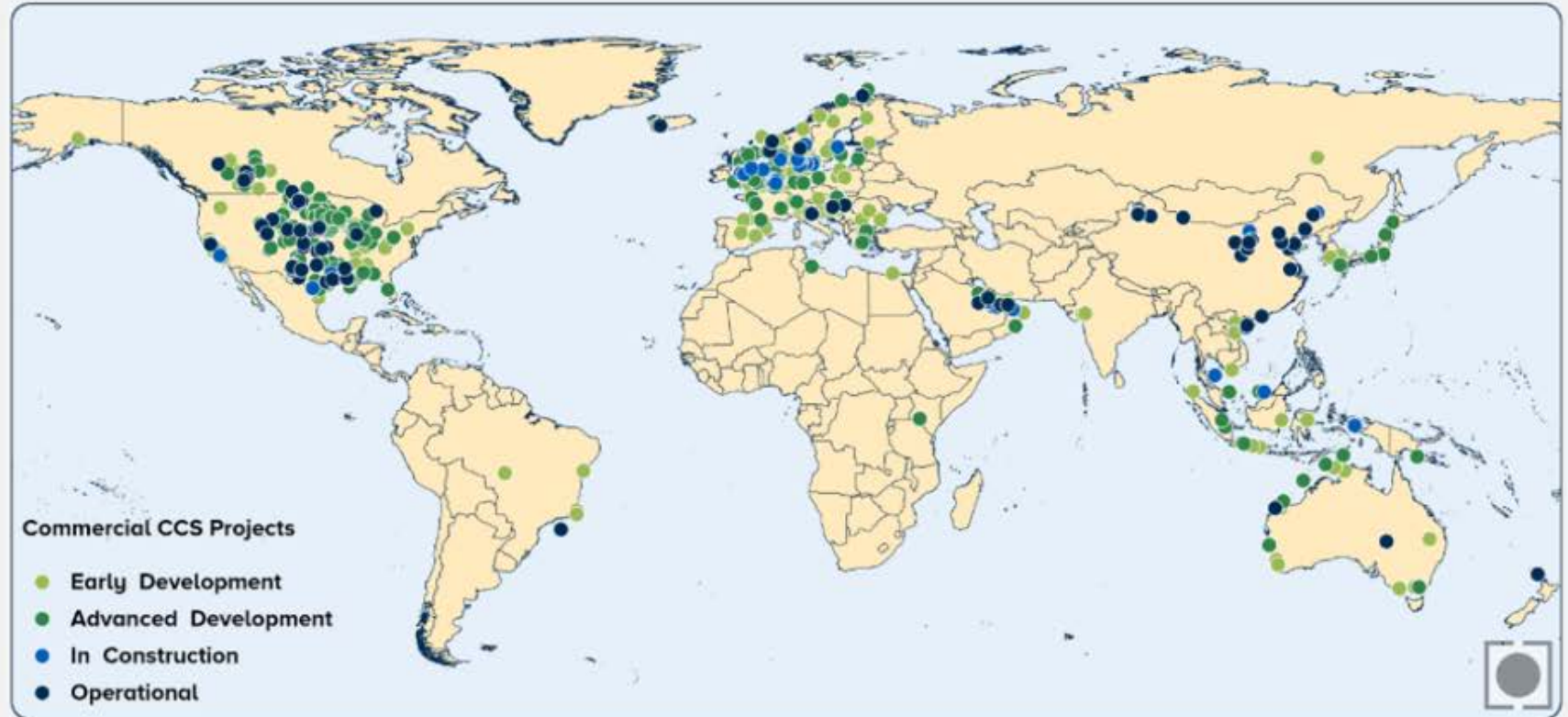
¿Serán los centros de datos un catalizador para el despliegue del CCUS?



Source: Global CCS Institute 2025

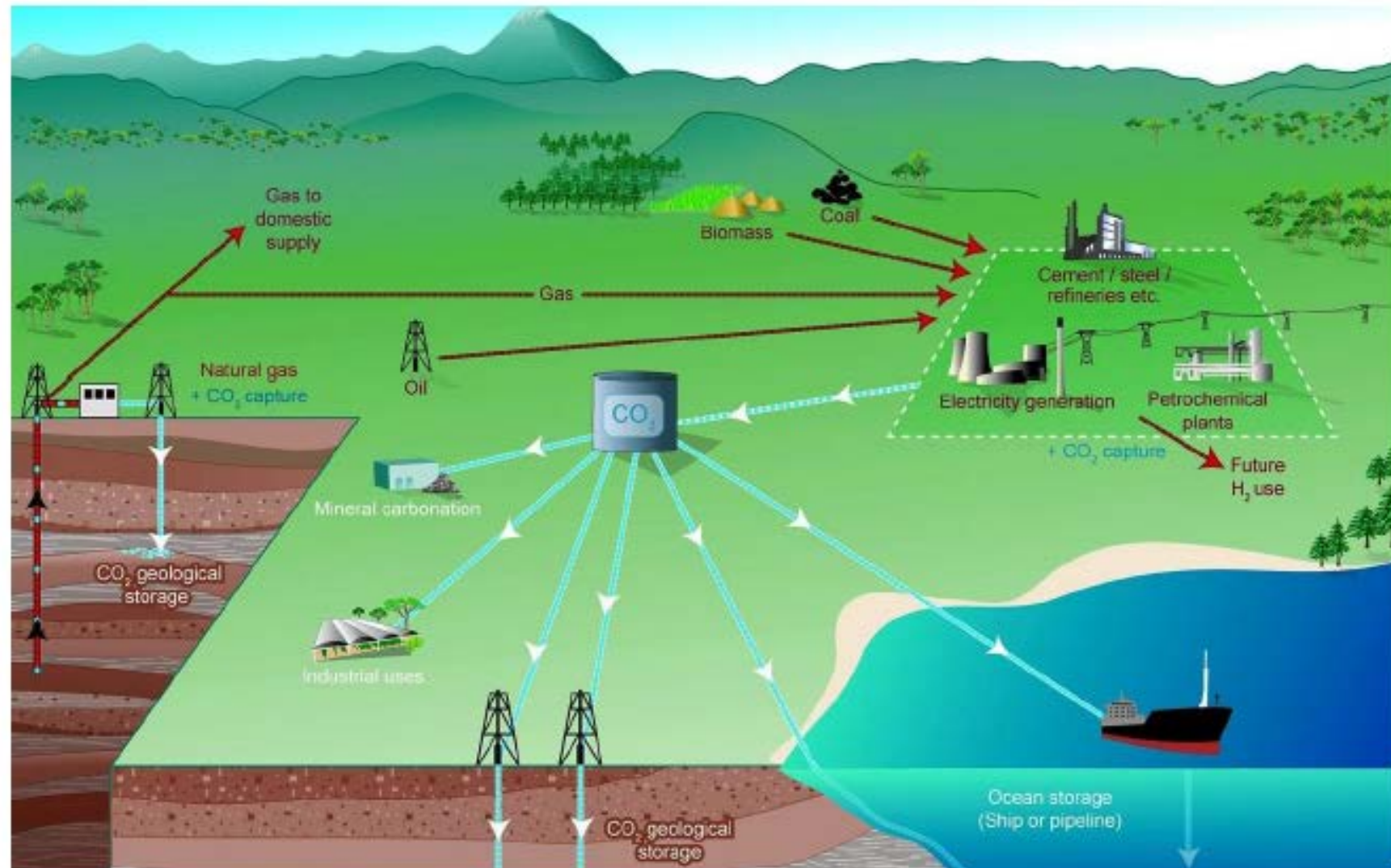
Aunque parece claro que donde hay políticas, hay proyectos

STATUS	PROJECT NUMBER	CAPTURE CAPACITY (Mtpa)
Early Development	364	153
Advanced Development	311	264
In Construction	52	45
In Operation	93	66



Source: CO2RE.co (April 2026)

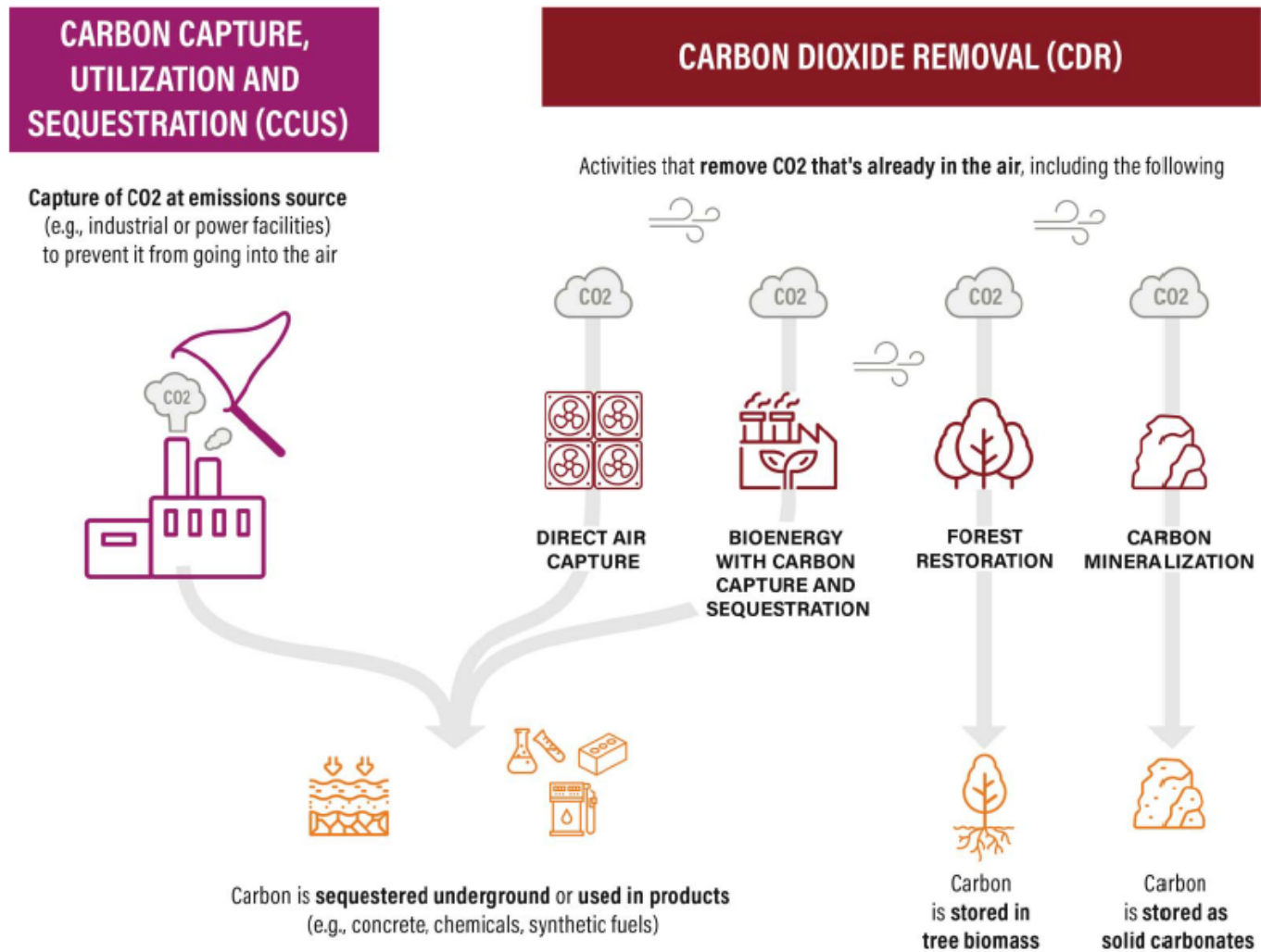
El ecosistema CCUS



Las etapas del CCUS



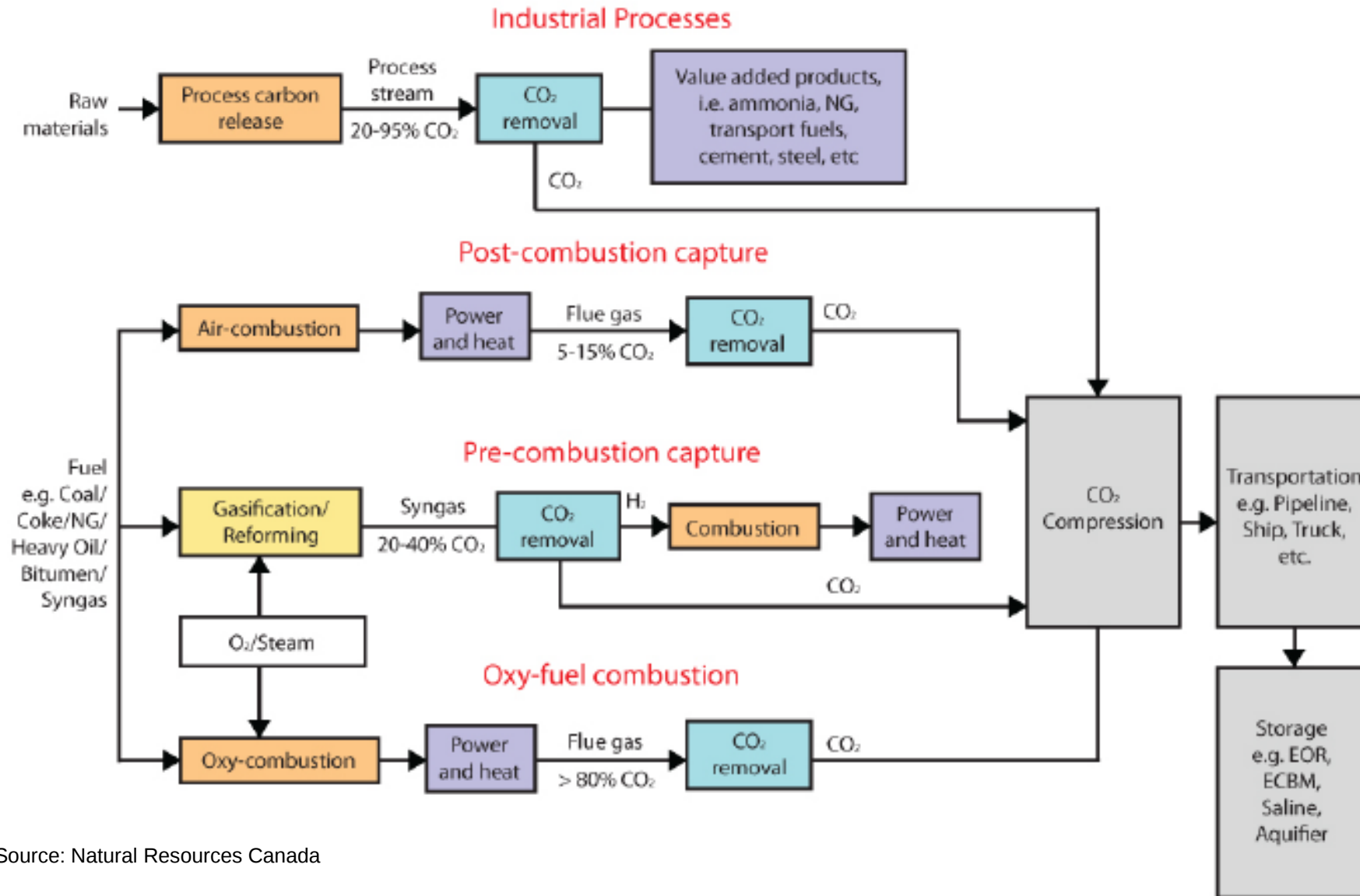
Captura vs remoción de carbono



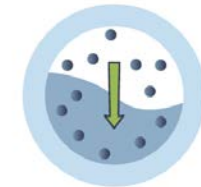
Para que un proceso de captura y almacenamiento de carbono (CCS) se considere también un proceso de eliminación de dióxido de carbono (CDR), toda la cadena de actividades debe dar como resultado una eliminación neta de carbono de la atmósfera.

Note: For CO2 used in products, the lifetime of the product determines the duration of CO2 storage; some utilization options only provide temporary storage. Source: WRI.

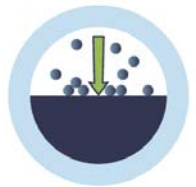
Captura CO₂



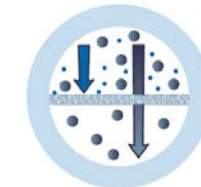
TECHNOLOGIES USED DURING CO₂ CAPTURE



ABSORPTION BY LIQUID SOLVENTS



ADSORPTION ONTO THE SURFACE OF SOLID SORBENTS



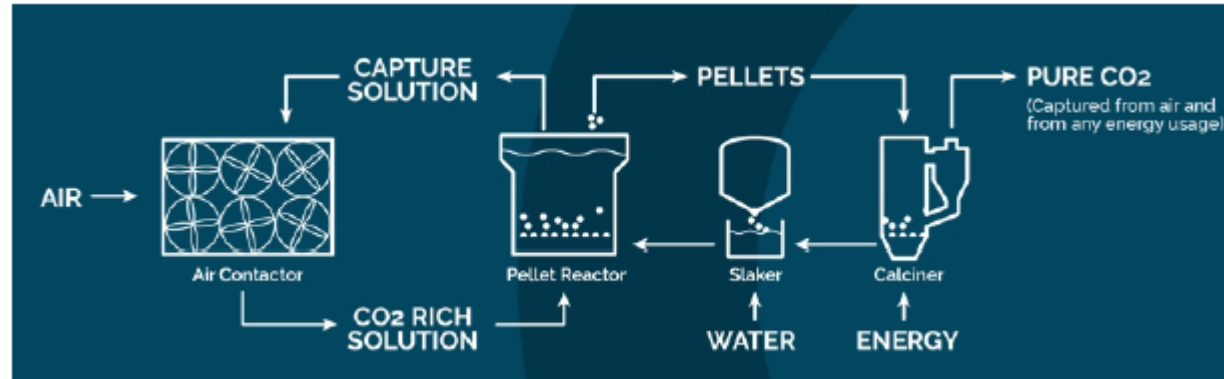
SEPARATION USING MEMBRANES THAT ACT LIKE MOLECULAR SIEVES



CRYOGENIC SEPARATION

Source: Global CCS Institute

Captura – DAC

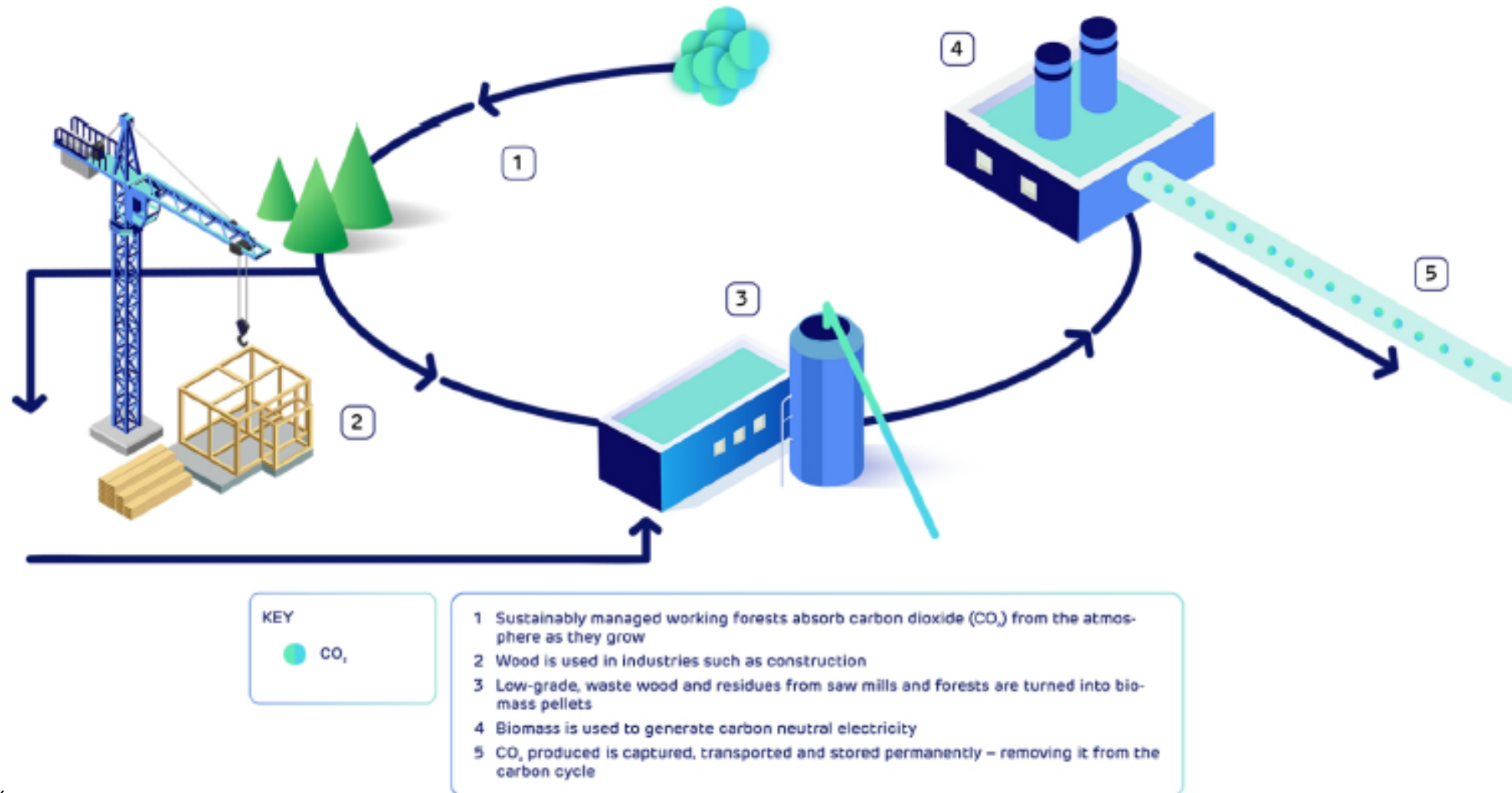


Source: Carbon Engineering



Captura – BECCS

How BECCS removes carbon from the atmosphere



Transporte de CO₂

Current capacity (2024)



PIPELINE

- » Most common mode of CO₂ transportation.
- » Can move large, commercial-scale quantities over long distances with lower operational cost.

~110 MTCO₂
PER YEAR



SHIP

- » Offers flexibility in scale and destination.
- » Is a good alternative for regions without close access to storage sites.
- » In some cases, can be a cheaper option than pipelines for transport over long distances.

>2 MTCO₂
PER YEAR



TRUCK

- » Best suited for transport of small quantities of CO₂ (2-30 tonnes per batch).

>1 MTCO₂
PER YEAR



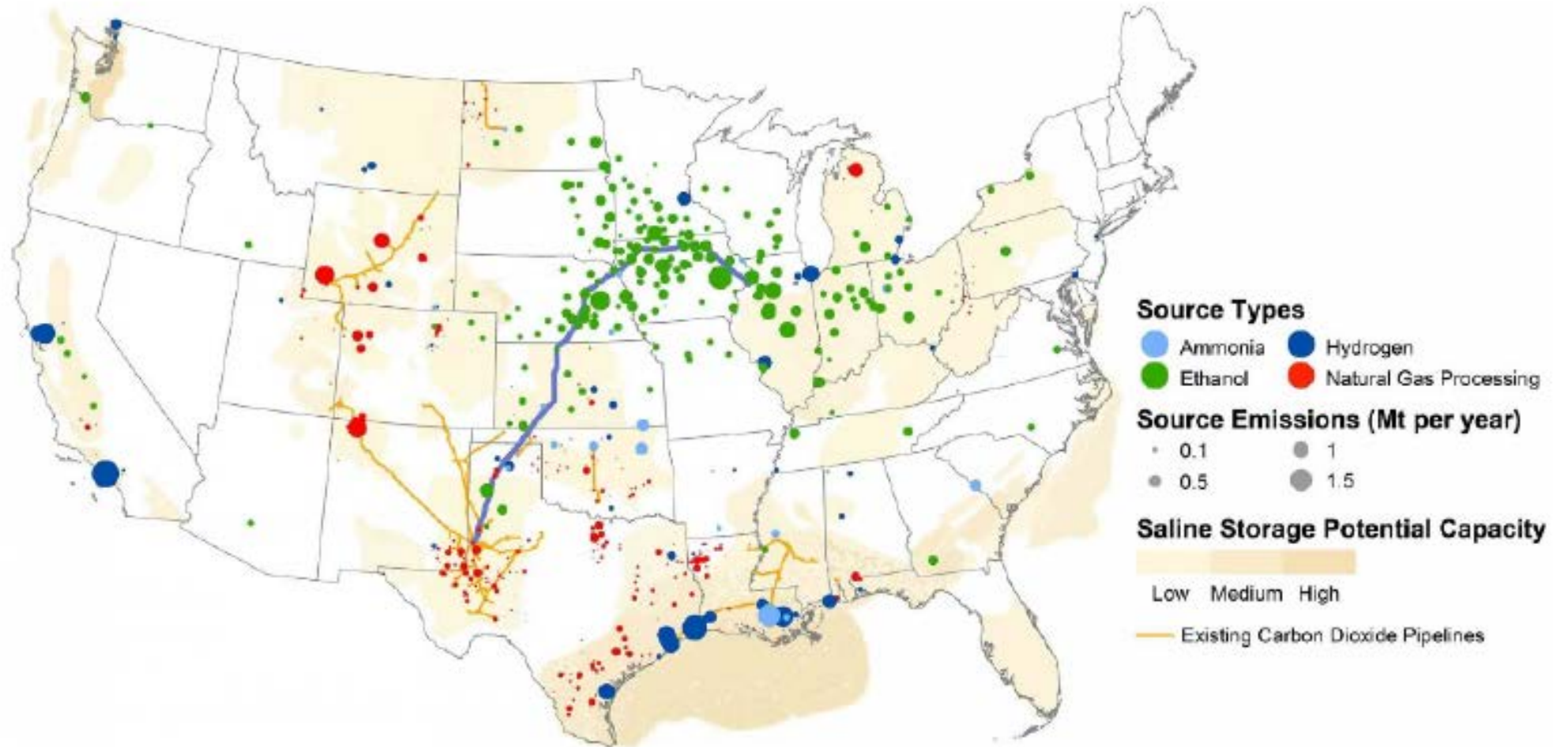
RAIL

- » More advantageous over medium and long distances, using existing rail lines.

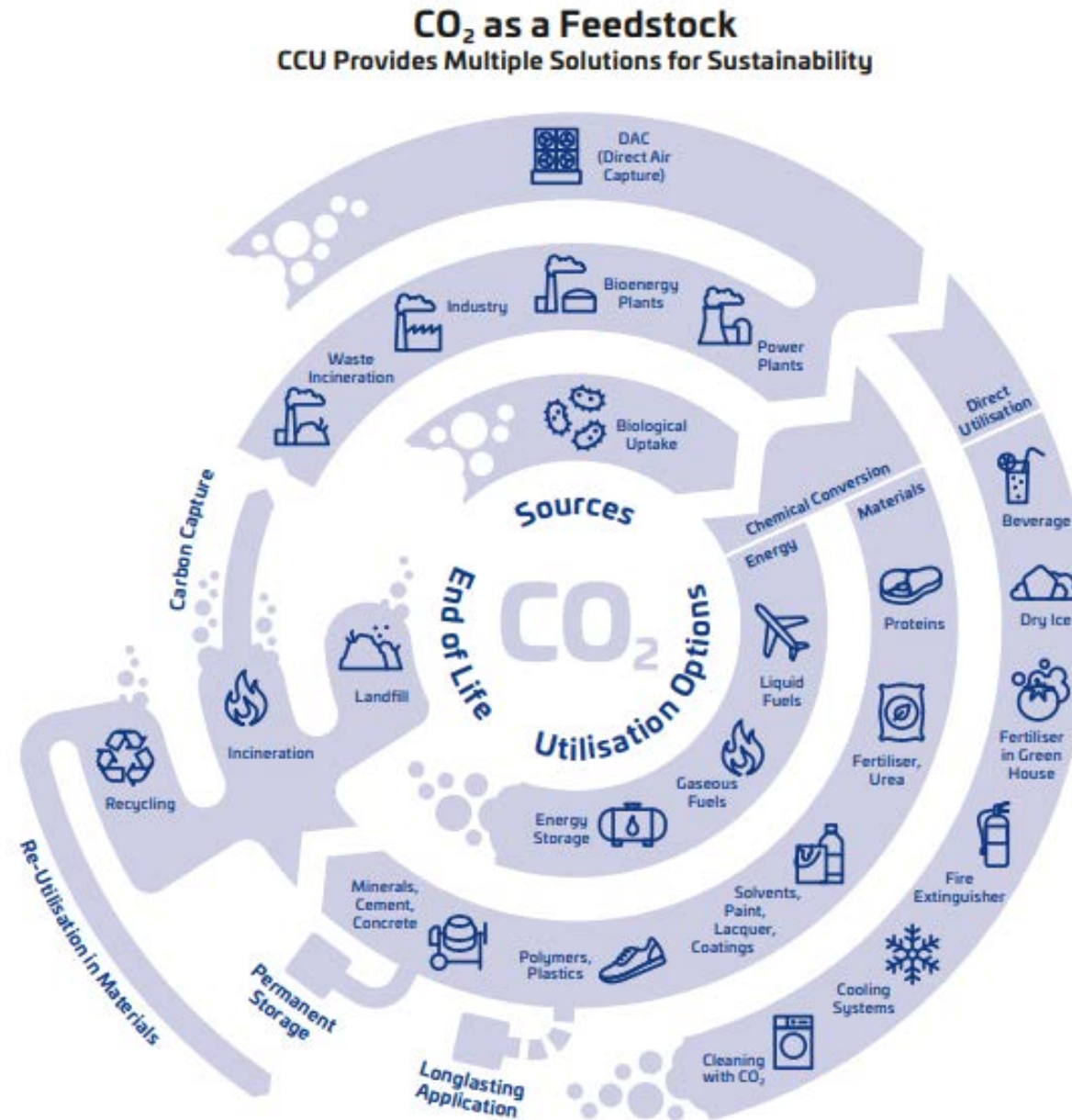
>1 MTCO₂
PER YEAR

Transporte de CO₂

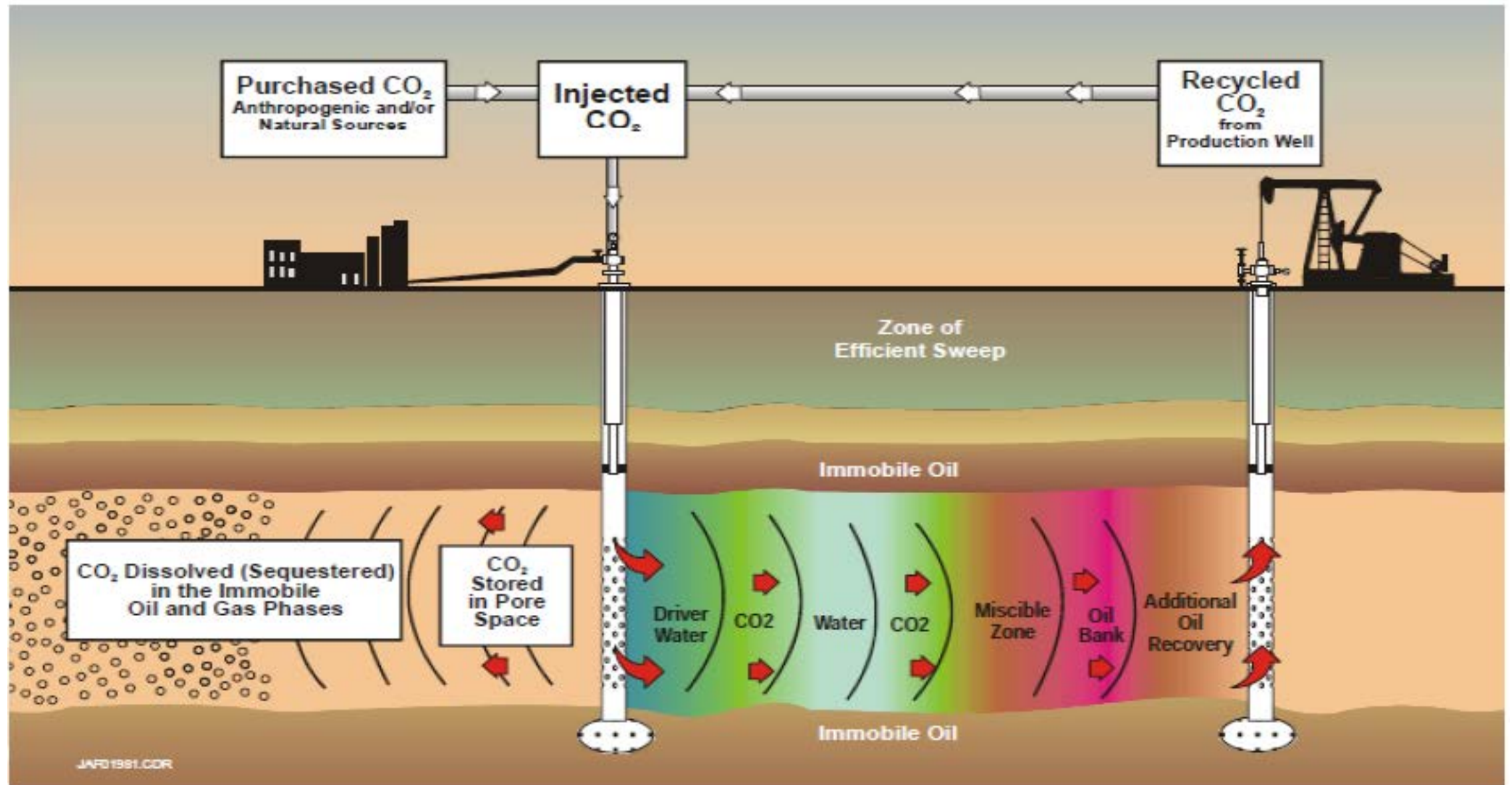
IBIT 13: **US existing CO₂ pipeline infrastructure**



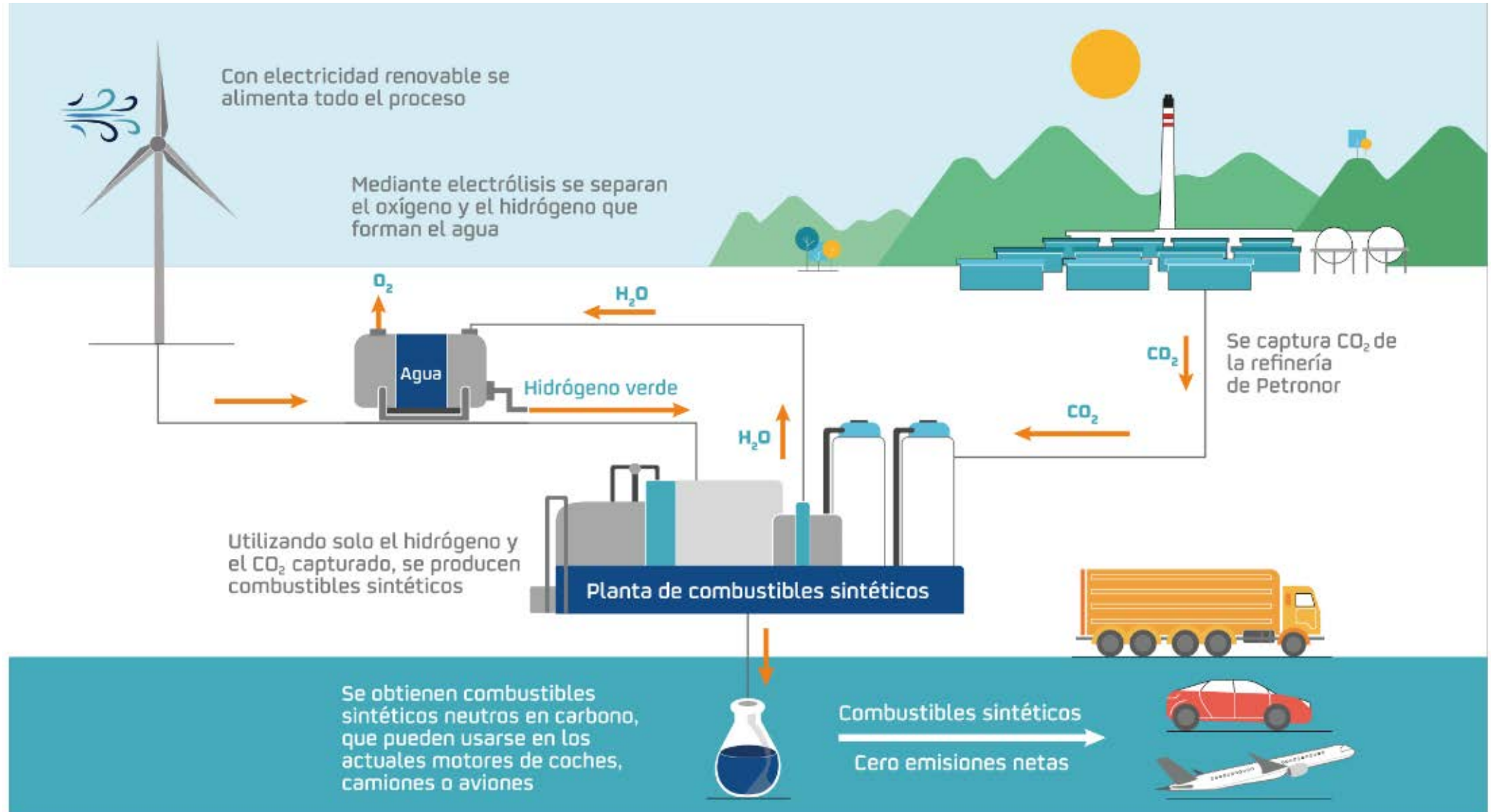
Uso de CO₂



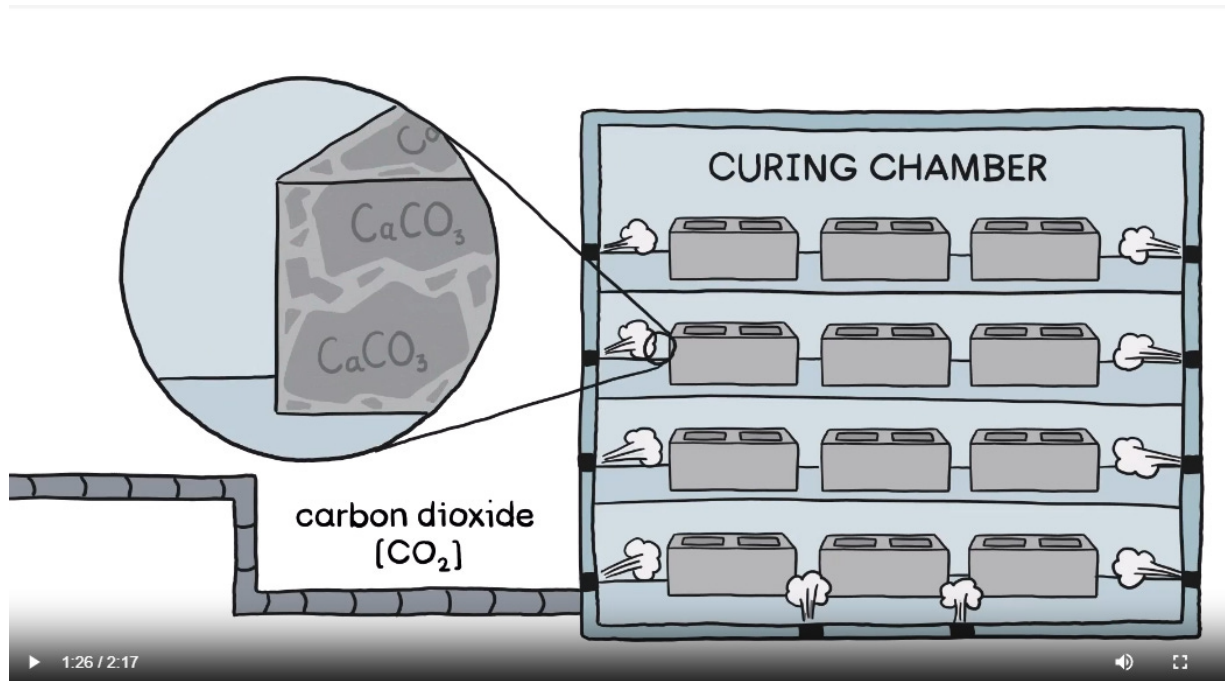
Uso – EOR (Recuperación mejorada del petróleo)



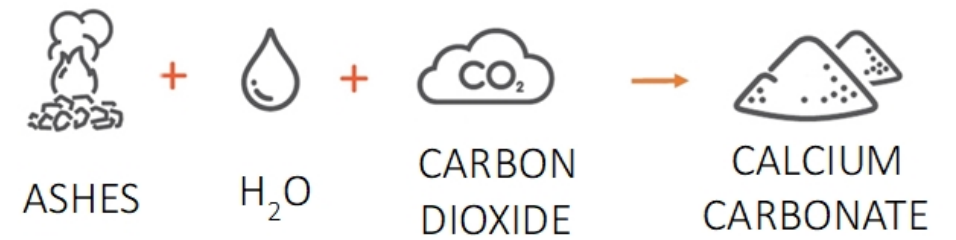
Uso – Combustibles sintéticos



Uso – Mineralización ex-situ



Source: Carbonbuilt

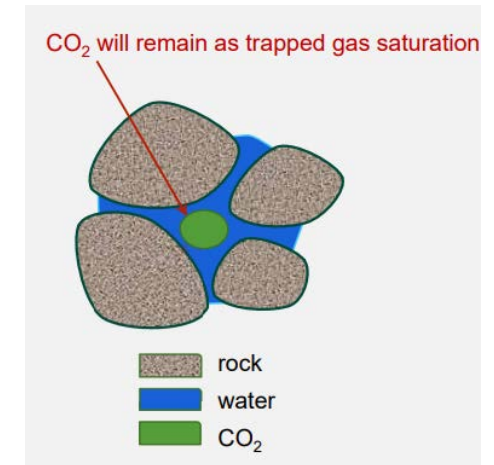
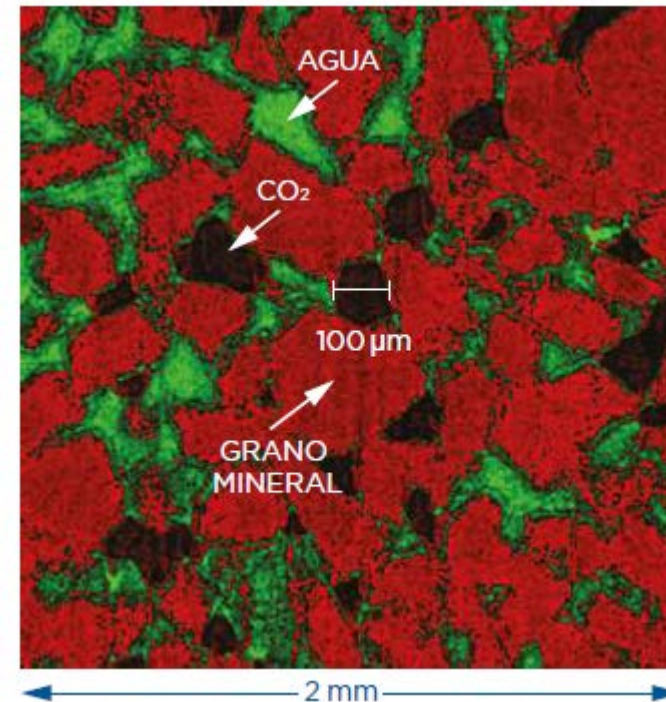


Source: OCO Technology

Almacenamiento de CO₂

Características de la formación para el almacenamiento

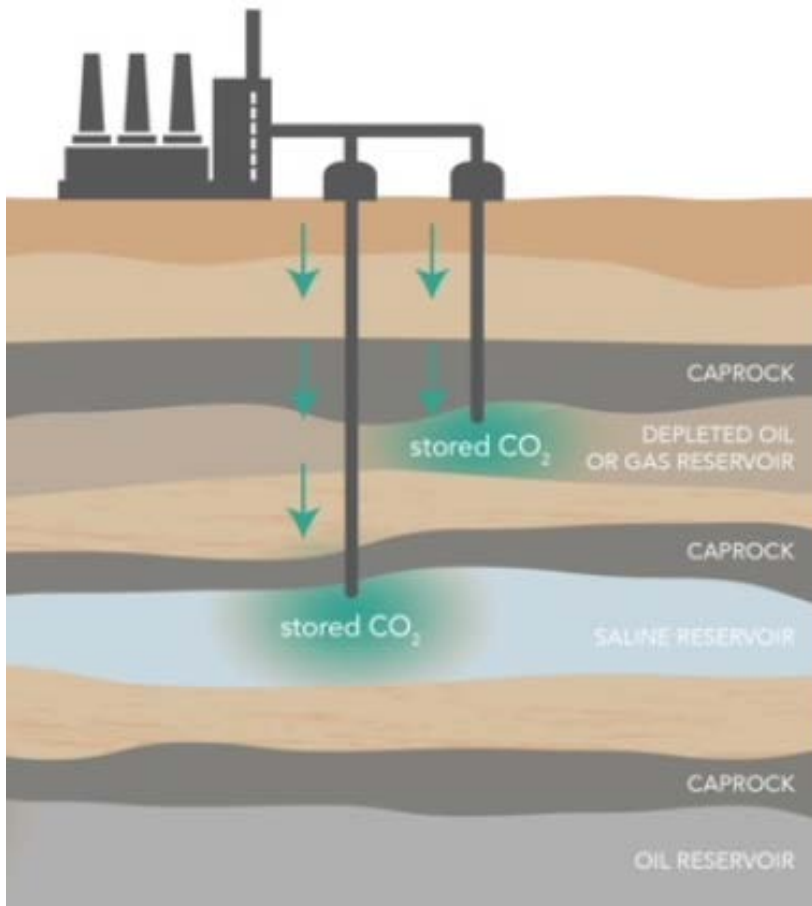
- Porosidad
Los espacios porosos milimétricos en la formación proporcionan la capacidad para almacenar el CO₂
- Permeabilidad
Los poros en la roca de la formación están suficientemente conectados para permitir que el CO₂ se mueva a través de ella y se inyecte al ritmo requerido
- Permanencia
Existe un sello de roca de cubierta sobre la formación para garantizar la contención permanente del CO₂



Almacenamiento de CO₂

Tradicional

CO₂ injection into deep saline formations & depleted oil & gas reservoirs



Source: IEA

TRAPPING MECHANISMS

STRUCTURAL

At the time of injection, CO₂ is structurally trapped beneath an impermeable cap rock layer.

This is how hydrocarbons have been naturally trapped underground for tens of millions of years.

RESIDUAL

Injected CO₂ enters the microscopic pore spaces of a storage formation, where it is permanently trapped by capillary forces that prevent it from exiting.

DISSOLUTION

Over time, injected CO₂ dissolves in a storage formation's saline water, becoming permanently trapped.

MINERAL

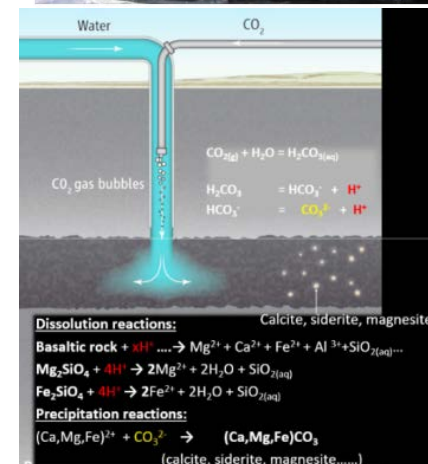
Over an extended period of time, injected CO₂ chemically reacts with the minerals in a storage formation to form a new, stable mineral product – locking it in a solid state permanently.

Mineralización in-situ

EXHIBIT 21 Rock core from the Carbfix project in Iceland shows carbonates created from injected CO₂



Source: CarbFix

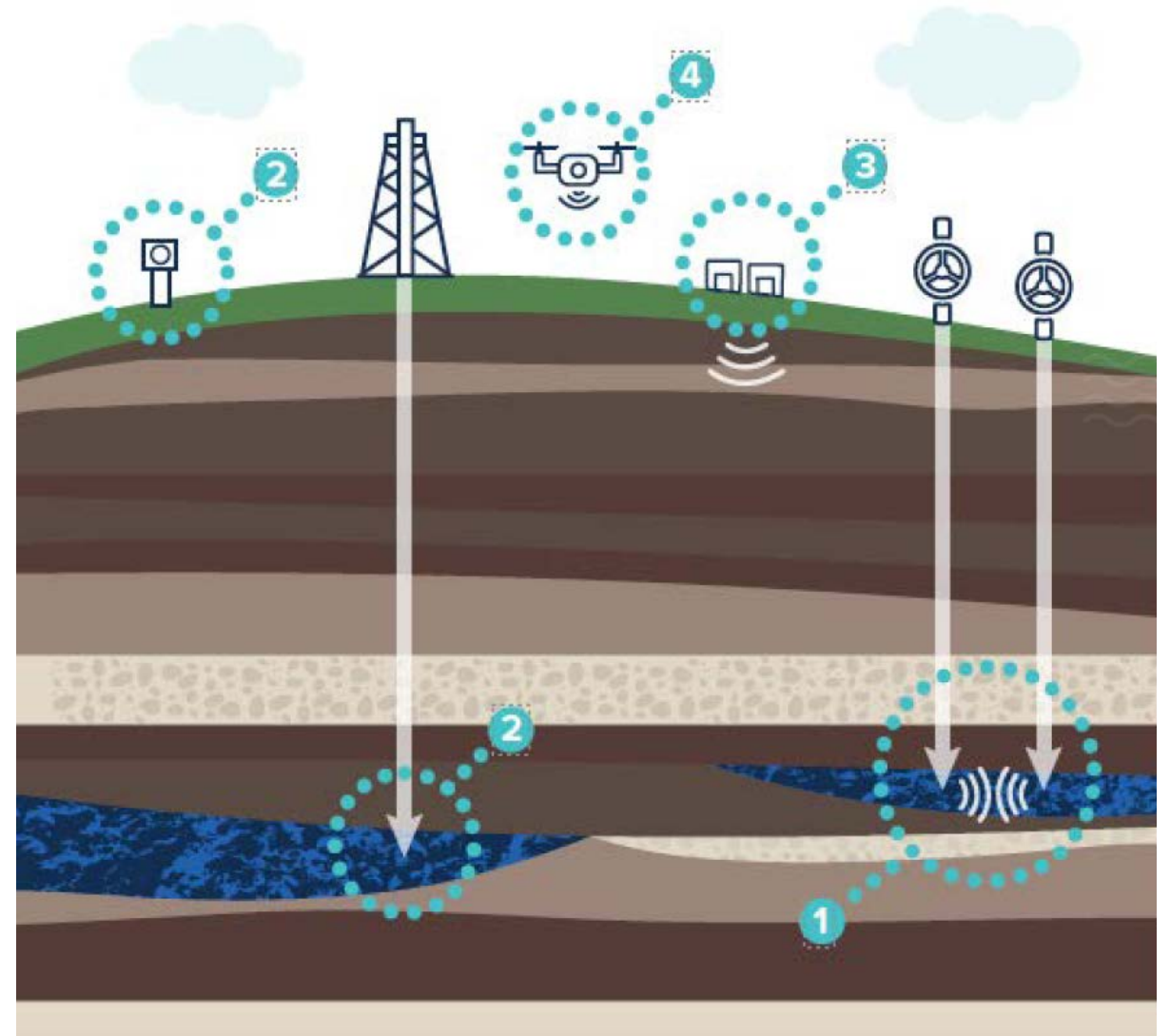


Source: [Gíslason et al., 2018](#).

Almacenamiento de CO₂

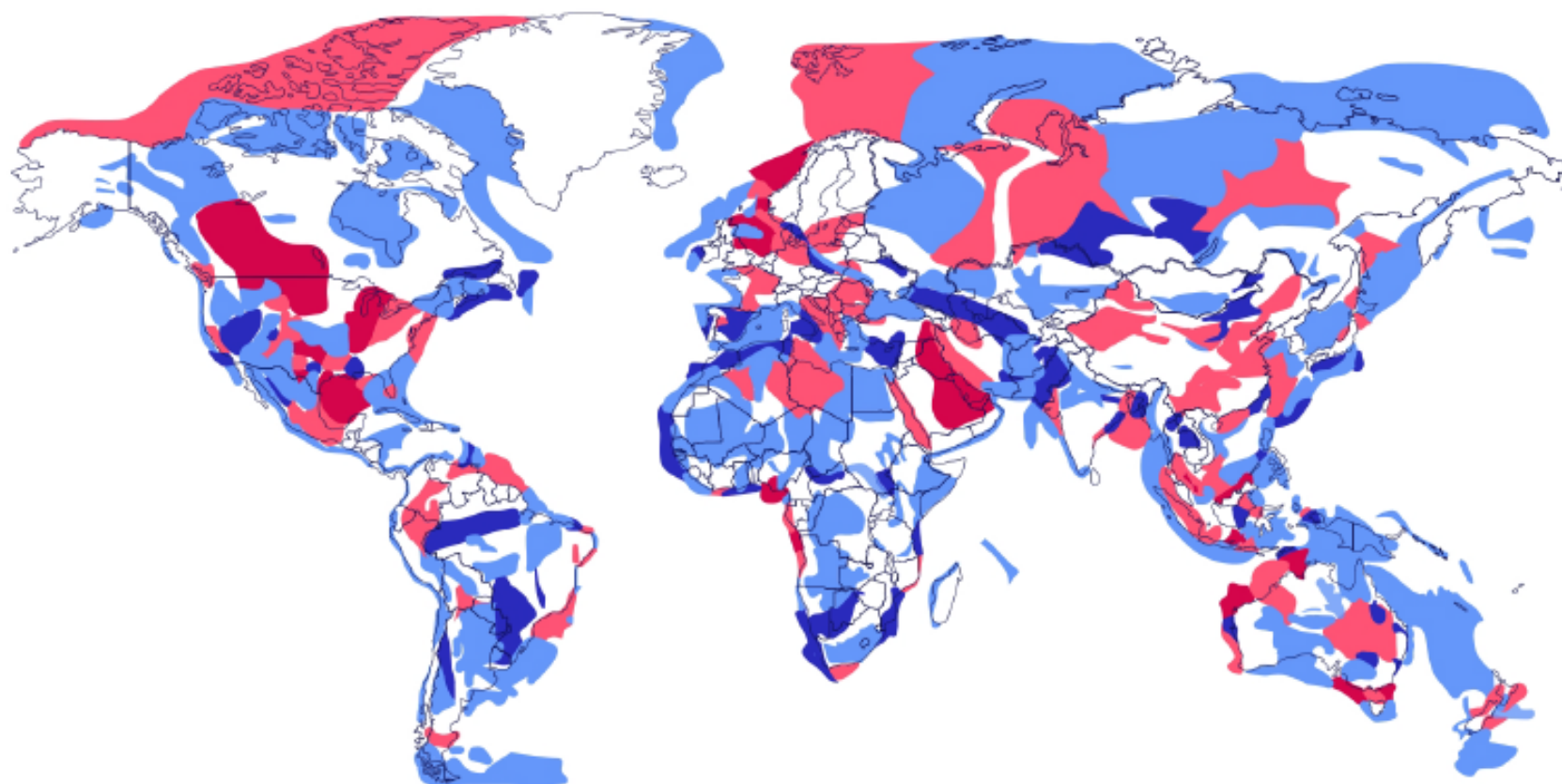
Una vez almacenado bajo tierra, los operadores deben medir, monitorear y verificar que el CO₂ se comporte como se espera. Esto se realiza mediante diversas técnicas de monitoreo, las más comunes son:

1. Monitoreo Sísmico: Utiliza ondas acústicas (sonoras) para generar imágenes del subsuelo y detectar el movimiento de las columnas de CO₂.
2. Monitoreo de Superficie y Subsuelo: Utiliza sensores a diferentes profundidades para monitorear las concentraciones de CO₂, la presión y la temperatura de la formación, así como otros parámetros.
3. Monitoreo de Gas en el Suelo: Mide las concentraciones de CO₂ en el suelo sobre los sitios de almacenamiento en tierra.
4. Monitoreo Aéreo y Satelital: Utiliza tecnologías de teledetección para monitorear extensas áreas en busca de emisiones de CO₂.



Almacenamiento de CO₂

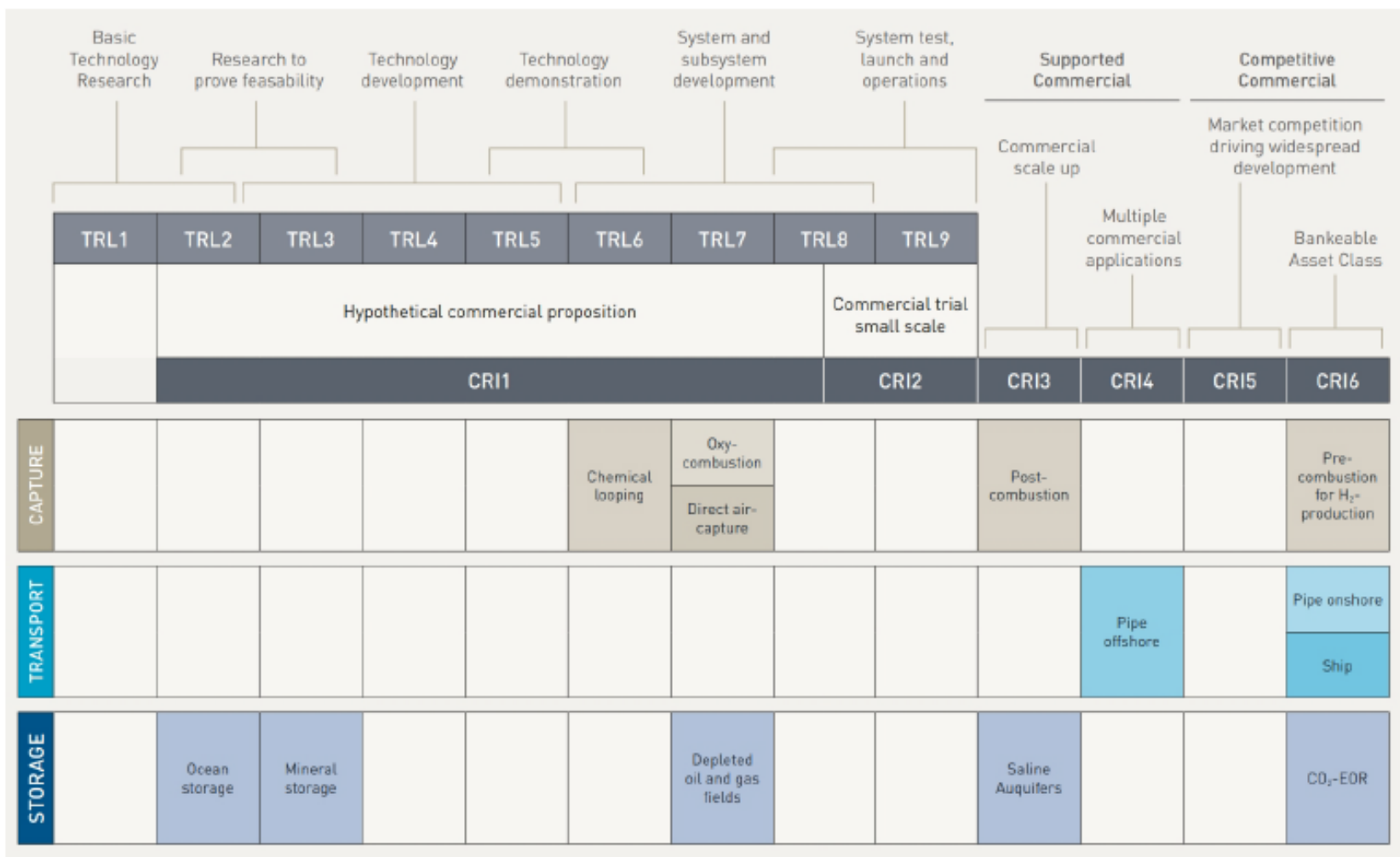
Most suitable areas for CO₂ storage



■ HIGHLY SUITABLE ■ SUITABLE ■ POSSIBLE ■ UNLIKELY

Madurez del CCUS

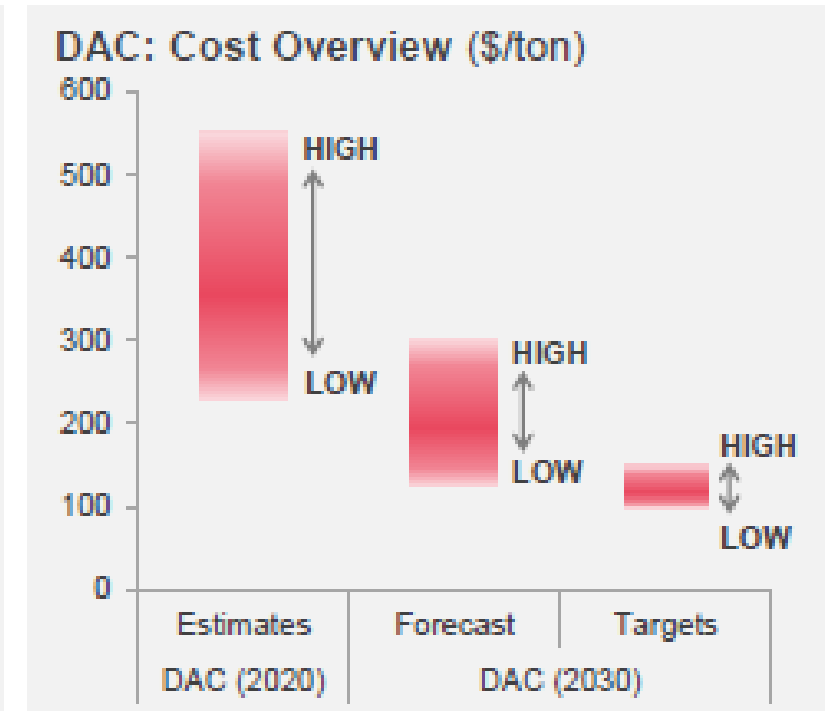
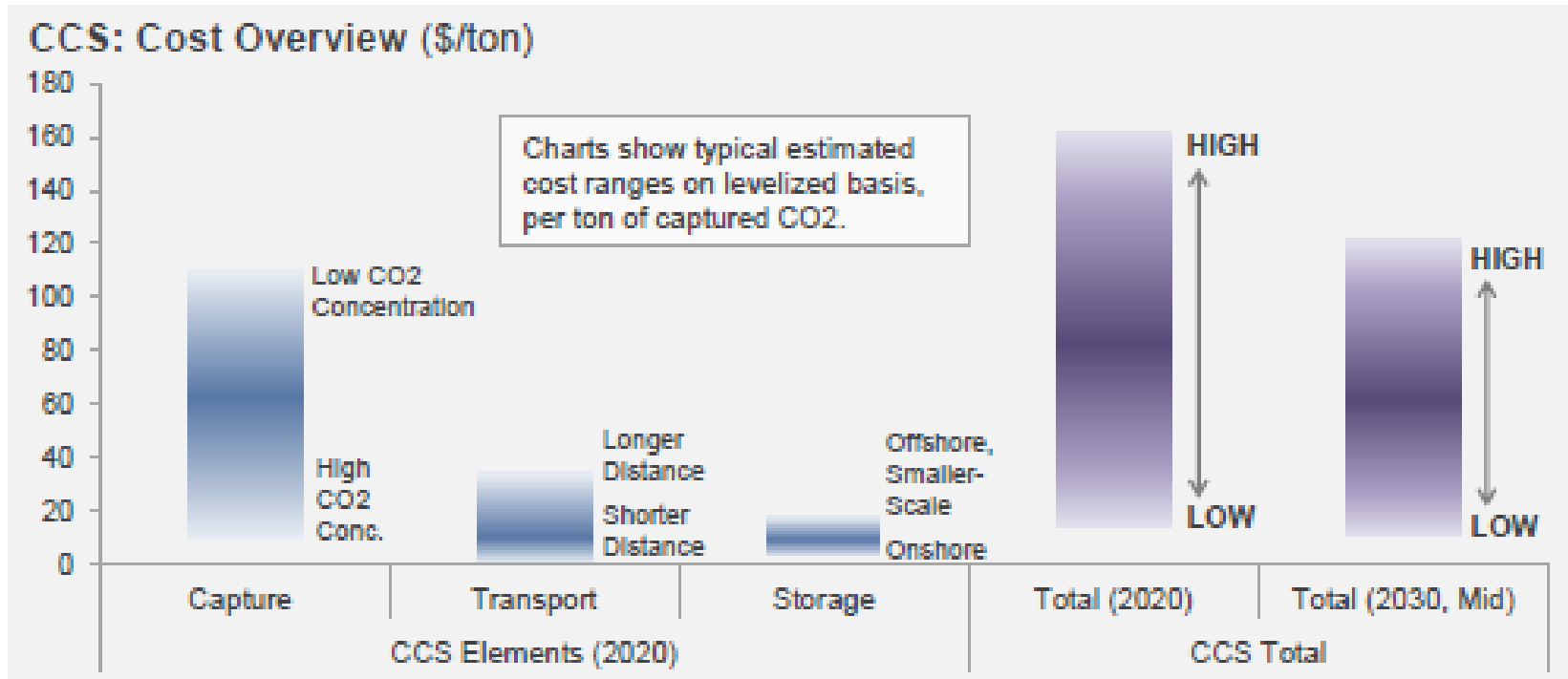
Technology Readiness Levels (TRL) and Commercial Readiness Index (CRI) of CCUS technologies



Source: CCS Norway

Para más Información sobre tecnologías se puede consultar "CCS Technologies 2024" de Global CCS Institute

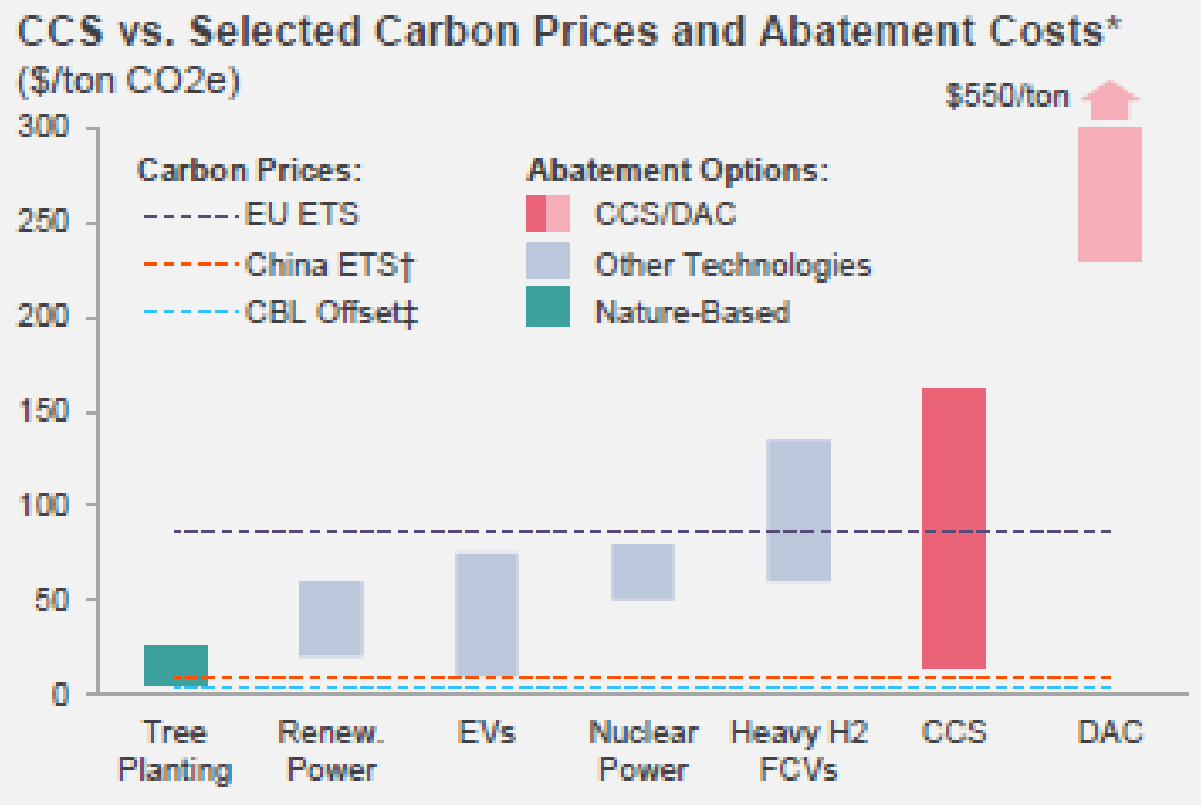
Coste del CCUS



Source: Energy Intelligence Analysis.

- A pesar del papel relevante del CCUS en la transición, persisten los desafíos
- Desglose de costes: de múltiples componentes, aunque la captura de CO₂ es clave
- Se necesita apoyo regulatorio para que el CCUS alcance su potencial

Coste del CCUS



Source: Energy Intelligence

Table B.2 ► CO₂ prices for electricity, industry and energy production in selected regions by scenario

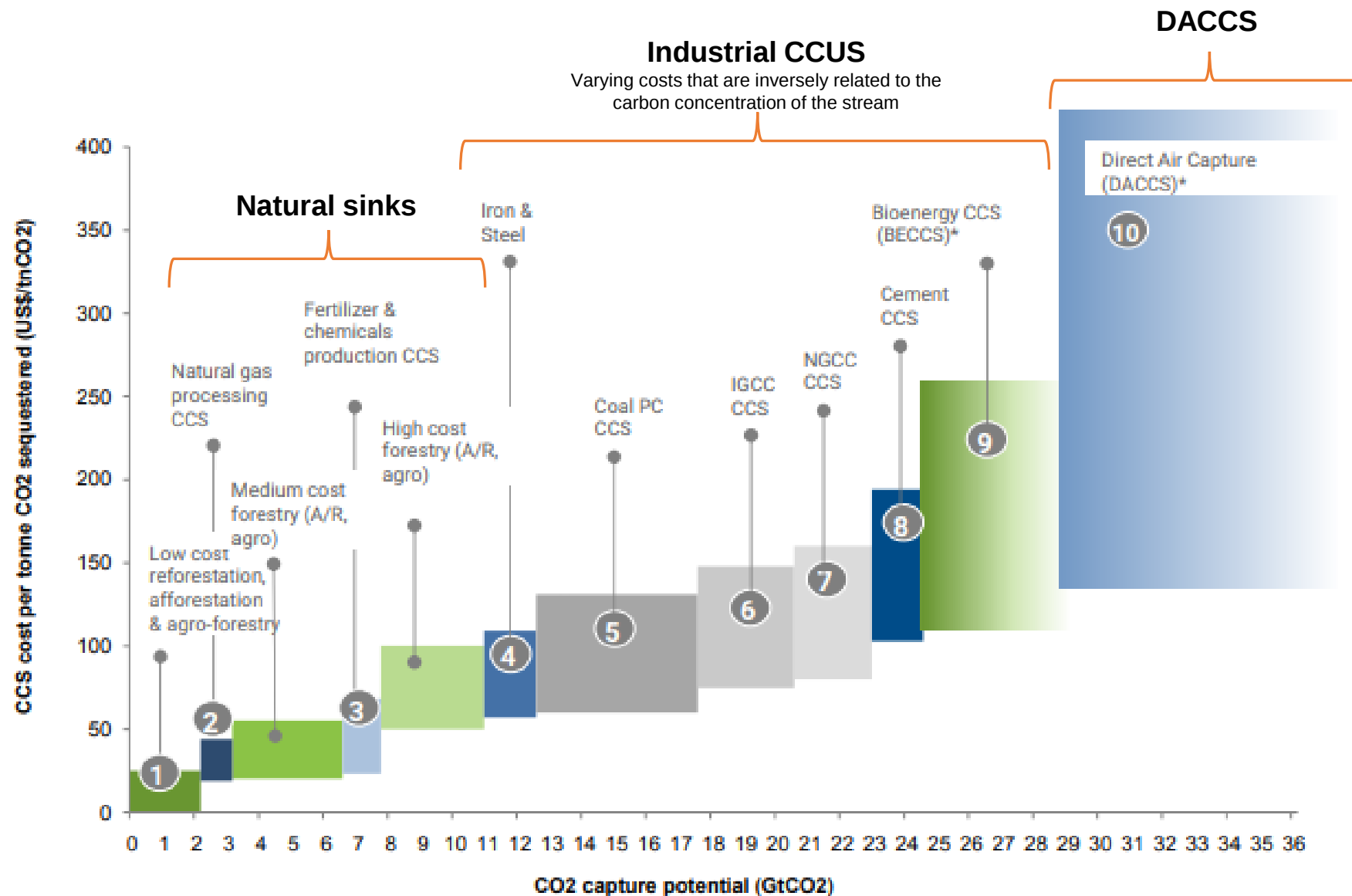
USD (2023, MER) per tonne of CO ₂	2030	2035	2040	2050
Stated Policies Scenario				
Canada	126	126	126	126
Chile and Colombia	21	24	28	28
China	39	43	46	52
European Union	140	145	149	158
Korea	56	65	73	89
Announced Pledges Scenario				
Advanced economies with net zero emissions pledges*	135	160	175	200
Selected emerging market and developing economies with net zero emissions pledges**	40	65	110	160
Other emerging market and developing economies	-	6	17	47
Net Zero Emissions by 2050 Scenario				
Advanced economies with net zero emissions pledges*	140	180	205	250
Selected emerging market and developing economies with net zero emissions pledges**	90	125	160	200
Selected emerging market and developing economies without net zero emissions pledges	25	50	85	180
Other emerging market and developing economies	15	25	35	55

* Includes all OECD countries except Mexico. ** Includes China, India, Indonesia, Brazil and South Africa. *** Regions excluding OECD countries, selected emerging market and developing economies with net zero emissions pledges, developing Asia and sub-Saharan Africa.

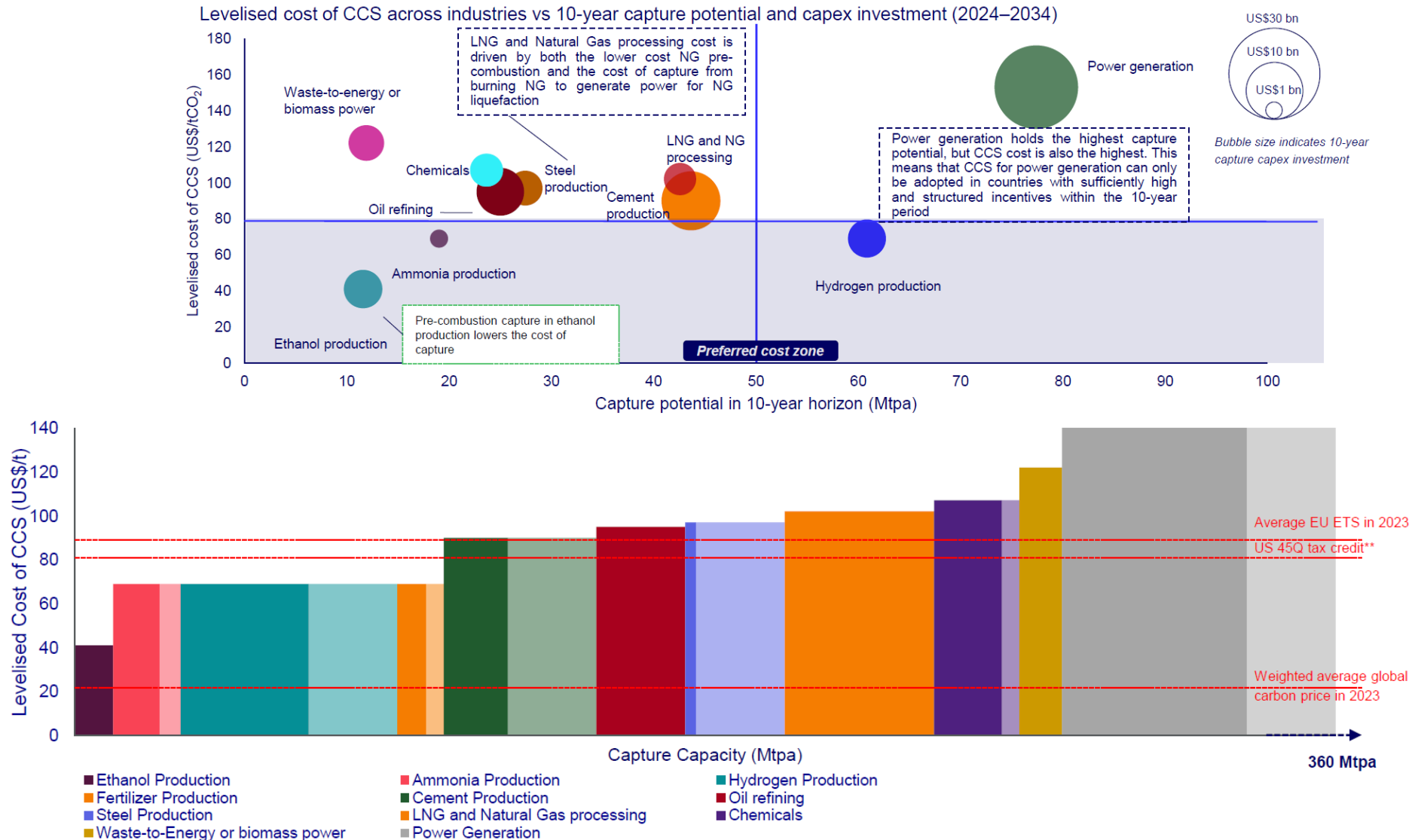
Note: MER = market exchange rate. Values are rounded.

Source: IEA, WEO 2024

Potencial de captura y costes por tonelada de CO₂ retirado



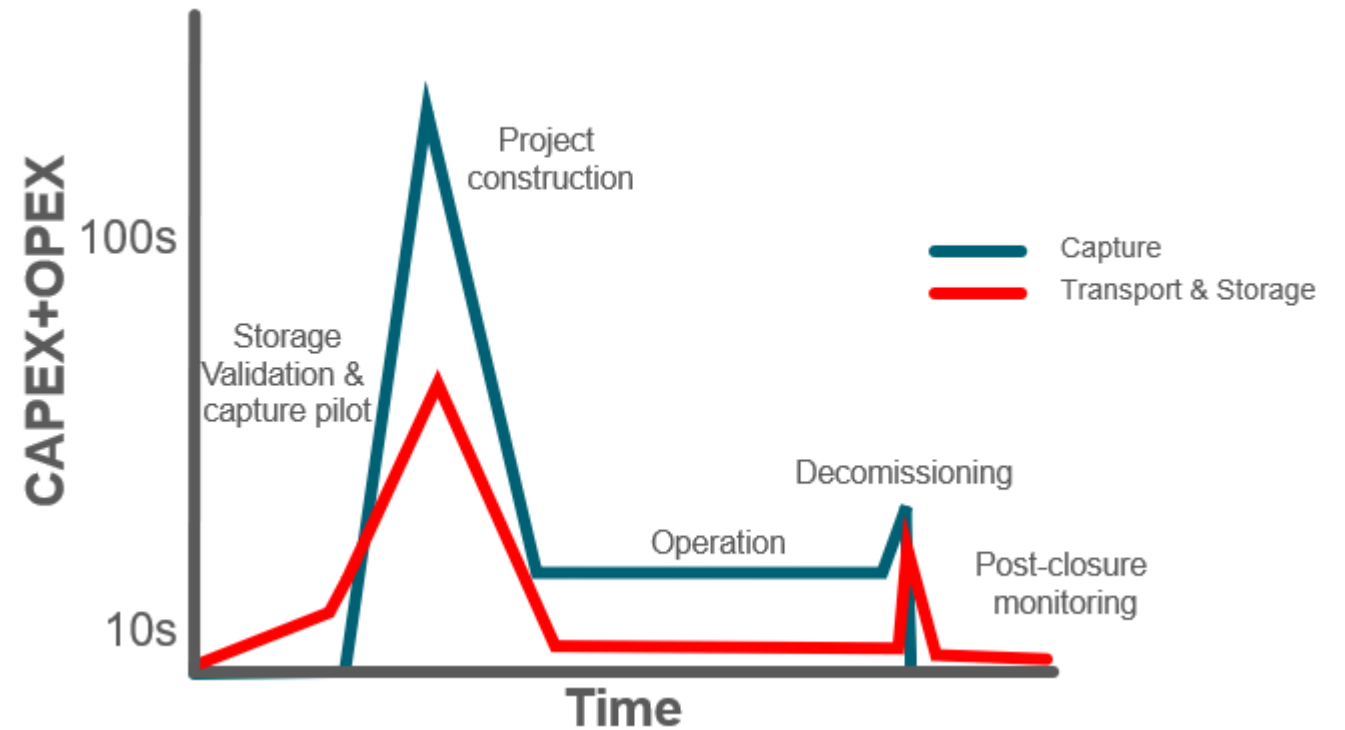
Coste del CCUS y detalle de los sectores difíciles de descarbonizar



Modelo de Negocio del CCUS

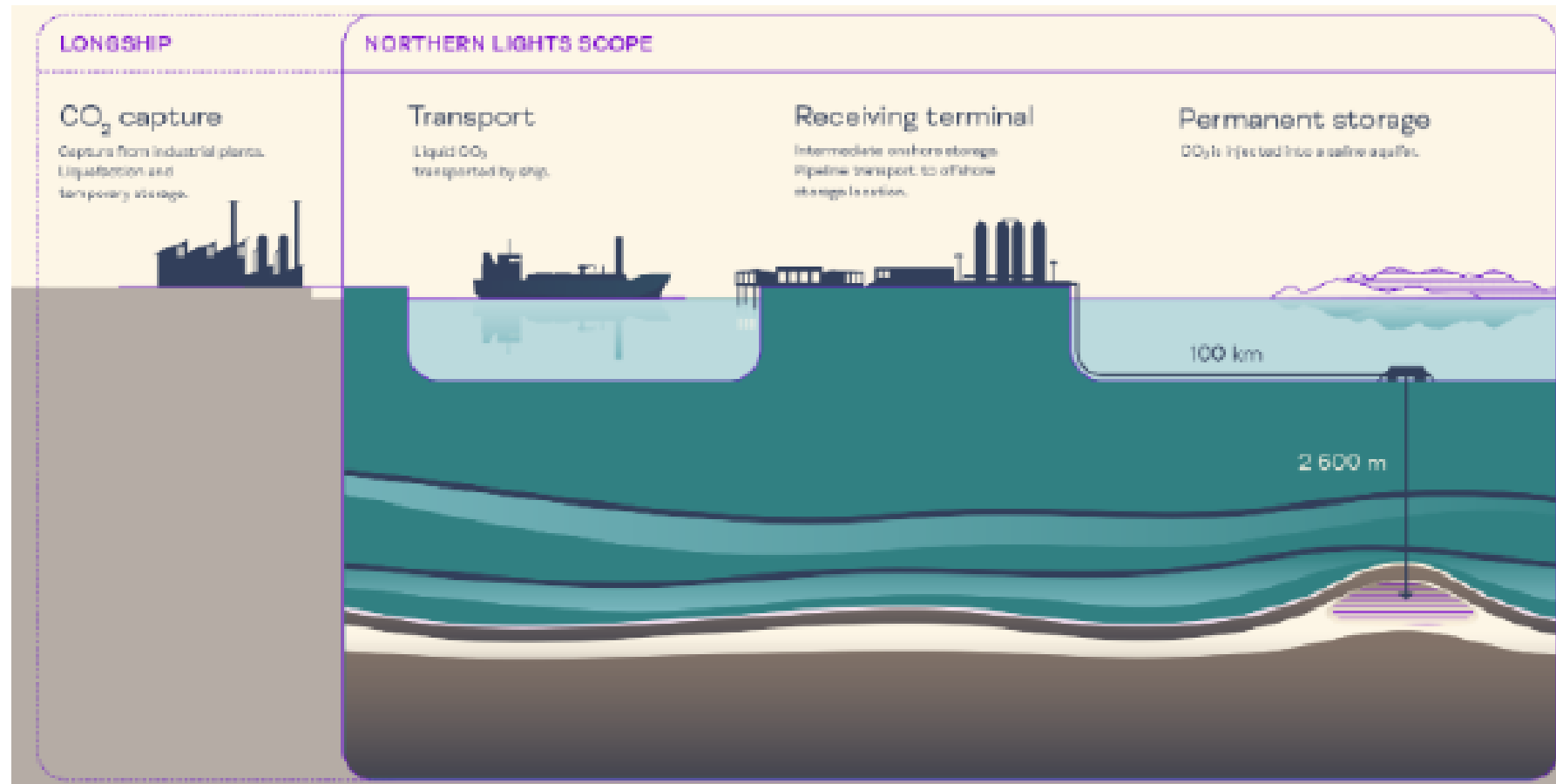


La naturaleza de la actividad de CCS requiere un enfoque de cadena de valor totalmente integrado



Ejemplos de proyectos de CCUS

Exhibit 8 - Norway's Northern Lights CCS storage will commence operation in 2024



Source: Northern Lights JV

Ejemplos de proyectos de CCUS

EXHIBIT 82: The East Coast Cluster consists of two projects: Net Zero Teesside (NZT) and Zero Carbon Humber (ZCH)



Source: East Coast Cluster

Claves del CCUS

1

Se requiere CCUS para lograr emisiones netas cero, más aún para limitar el calentamiento global a 1,5°C

Más de un 20% de la reducción acumulada de emisiones de CO₂ 2018-2050 procederá de CCS bajo IEA NZE (1,5°C, NZE 2050).

2

CCUS es una tecnología clave para sectores difíciles de descarbonizar y sendas de emisión negativa

Para la industria, el CCUS ayuda a reducir las emisiones de CO₂ de procesos a alta temperatura y de procesos con reacciones químicas; para la generación eléctrica, el gas natural con CCUS es un backup descarbonizado de las energías renovables; CCUS es un componente clave de las futuras sendas de emisión negativa.

3

CCUS es una tecnología comprobada y viable

Cerca de 40 instalaciones comerciales en funcionamiento, muchos proyectos en curso, tecnologías disponibles en etapa avanzada de desarrollo

4

El coste de captura difiere entre las aplicaciones. Hay oportunidades a día de hoy con costes de abatimiento por debajo de 100 \$/t

Un reto tecnológico es reducir los altos costes de captura a 30-60 \$/t. El despliegue a corto plazo se concentrará donde existan corrientes de alto volumen y alta concentración de CO₂

5

El desafío de implementación para CCS es ampliar los proyectos hasta la escala Gt

Los proyectos pueden estar dedicados a un solo emisor de gran escala o a centros con múltiples emisores que comparten infraestructuras de transporte y almacenamiento

6

Un desafío clave es el apoyo de los stakeholders

Reconocer un "precio de CO₂" de aplicación a CCUS (como para otras vías de descarbonización), eliminar barreras regulatorias (certificación, permisos) y, en última instancia, obtener una amplia aceptación social

¡MUCHAS GRACIAS!

