

Introducción a tecnologías de captura directa de CO₂



Autores

Matthias Dahlkamp
Investigador Asociado
Centro de Energía UC

Vanessa Roa Gómez
Dra. en Química
Asistente de Dirección
Centro de Energía UC

Arturo Morandé
Magíster en Ciencias de la
Ingeniería
Coordinador Centro de
Energía UC

Alvaro Videla
Director Centro de Energía UC
Profesor Asociado
Departamento de Ingeniería de
Minería UC

Elodie Blanco
Profesor Asistente,
Depto. de Ingeniería Química y
Bioprocesos
Depto. de Ingeniería y Gestión de la
Construcción
Miembro Centro de Energía UC

Roberto Canales
Profesor Asistente
Depto. de Ingeniería Química
y Bioprocesos
Miembro Centro Energía UC

Eduardo Schott
Profesor Asociado
Facultad de Química y Farmacia
Miembro Centro de Energía UC

Tabla de Contenidos

Resumen	3
1. Contexto Global y Motivación.....	3
2. ¿Qué es la Captura Directa de Carbono?	4
2.1. DAC Líquido (L-DAC)	5
2.2. DAC Sólido (S-DAC).....	6
2.3. DAC Pasivo	8
3. Costos estimados de DAC	8
4. Grandes empresas.....	12
5. Estado actual del DAC y planes futuros	16
6. DAC en Chile.....	17
7. Conclusiones.....	18
8. Referencias	20

Resumen

Este reporte presenta un análisis inicial de las tecnologías de captura directa de dióxido de carbono (CO₂), abordando su estado del arte, desafíos técnicos, económicos y ambientales, así como las proyecciones de desarrollo a corto y mediano plazo. Se describen los procesos actuales de captura de CO₂ desde el aire (DAC, por sus siglas en inglés), con especial énfasis en los principios de funcionamiento de los dos enfoques predominantes: el basado en solventes líquidos (L-DAC) y el basado en absorbentes sólidos (S-DAC), incluyendo sus requerimientos energéticos, consumo de agua y capacidad de escalabilidad. Asimismo, se examinan los costos estimados de inversión (CAPEX) y operación (OPEX), identificando los factores que más influyen en la eficiencia económica de cada tecnología y las proyecciones de reducción de costos a medida que la tecnología madura.

El informe también presenta un panorama de las principales instalaciones de DAC en desarrollo a nivel mundial, destacando los avances de empresas líderes, sus innovaciones tecnológicas y modelos de negocio asociados. Se dedica especial atención a la situación en Chile, explorando las oportunidades que el país ofrece para la implementación de estas tecnologías, considerando su disponibilidad de recursos energéticos renovables, condiciones climáticas favorables y potencial industrial para el uso del CO₂ capturado. Finalmente, se discuten los posibles escenarios futuros para la adopción de DAC en Chile, así como los retos regulatorios, logísticos y tecnológicos que podrían influir en su despliegue, ofreciendo una visión integral para investigadores, responsables de políticas y actores industriales interesados en la captura directa de carbono.

1

Contexto Global y Motivación

Es bien sabido que el aumento en la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera está acelerando el cambio climático y el calentamiento global. En el futuro, el calentamiento global provocará condiciones meteorológicas devastadoras en el mundo, como inundaciones, sequías, incendios, lluvias torrenciales, entre otros desbalances en el clima. En pocas palabras, si no se reducen rápidamente las emisiones de CO₂, la vida en la Tierra cambiará drásticamente. Según el informe publicado en marzo de 2025, la Agencia Internacional de la Energía (IEA) estima que en el año 2024 se emitieron 37,8 Gt de CO₂ a la atmósfera, llegando a una concentración de 421 ppm en la atmósfera, lo que supone un incremento de 0,8% respecto a 2023 (1). Varias iniciativas multilaterales están intentando

reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera. La más importante es el «Acuerdo de París», por el que 55 países se comprometieron a reducir a la mitad sus emisiones de CO₂ respecto a 1990 para el año 2030, con el fin de reducir el calentamiento global a 1,5 grados centígrados (2). Los 1,5 grados centígrados se establecieron como la frontera a partir de la cual podrían producirse consecuencias impredecibles y caóticas para la vida en la Tierra. Por ejemplo, las costas podrían sufrir una subida del nivel del mar, lo que provocaría la erosión del litoral, la salinización del suministro de agua dulce e inundación de zonas pobladas (3).

El CO₂ emitido procede principalmente de cuatro sectores: la industria, el transporte, la generación de energía y la agricultura, y para cumplir con los objetivos del Acuerdo de París, se están investigando distintas alternativas para mitigar y reducir las emisiones de CO₂. En el sector transporte se está impulsando la implementación de vehículos eléctricos e híbridos como medida para reducir las emisiones, mientras que en los sectores de industria y generación de energía se están considerando tecnologías de electrificación de procesos, mejoras en la eficiencia energética, instalación de plantas de energías renovables respondiendo al compromiso de mitigación de las emisiones. Sin embargo, para reducir el CO₂ ya presente en la atmósfera, la captura directa del aire es la única tecnología disponible actualmente aparte de los procesos naturales de fijación de CO₂.

2

¿Qué es la Captura Directa de Carbono?

La captura de CO₂ se puede implementar mediante tres enfoques. El primero considera la captura y almacenamiento de carbono (CCS por sus siglas en inglés) desde una fuente puntual, por ejemplo, desde los gases de escape de una central de generación eléctrica térmica (4). El segundo enfoque contempla la captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS por sus siglas en inglés), en el cual el CO₂ se captura desde una fuente fija y se reutiliza posteriormente, por ejemplo, al capturar CO₂ a partir del reformado del metano, para posteriormente almacenarlo y distribuirlo a la industria alimentaria y de bebidas (5). Estos dos enfoques tienen en común que trabajan con flujos de gas que provienen de fuentes puntuales, lo que facilita la captura en comparación con otras alternativas como la captura directa desde el aire.

Finalmente, el tercer enfoque considera la captura directa de CO₂ desde el aire (DAC por sus siglas en inglés), proceso que resulta desafiante y complejo debido a la baja

concentración de CO_2 que posee el aire atmosférico. Debido a su baja concentración en el aire, ca. 441 ppm, el CO_2 debe ser capturado mediante materiales altamente selectivos, para después ser recuperado, y ser almacenado bajo tierra o reutilizarlo por la industria. La idea moderna de las tecnologías DAC se remonta al profesor Klaus Lackner, quien propuso en una conferencia en 1999 capturar el CO_2 directamente del aire para hacer frente al calentamiento global. A partir de su idea surgió toda una nueva rama industrial dedicada a la eliminación del CO_2 del aire ambiente(6).

En general, las tecnologías de DAC se dividen en dos ramas principales. La primera es el DAC líquido, en el cual el CO_2 es capturado por una solución acuosa de hidróxido para formar una solución rica en CO_2 . Tras diferentes transformaciones químicas se obtiene una corriente de CO_2 puro, mientras que los productos químicos utilizados pueden reciclarse a las primeras etapas del proceso. La segunda rama es el DAC sólido, en el cual la captura de CO_2 se realiza mediante una estructura absorbente sólida. Cuando la estructura absorbente está saturada de CO_2 , esta es calentada para liberar una corriente pura de CO_2 y recuperar la estructura absorbente.

2.1 | DAC Líquido (L-DAC)

El proceso del DAC líquido (L-DAC) consta de dos bucles químicos, en los que primero se liga el CO_2 y después se libera una corriente de CO_2 . En el primer bucle, el aire se aspira en el contactor mediante grandes ventiladores. Aquí el aire fluye sobre finas superficies, que contienen una solución de KOH. El CO_2 reacciona selectivamente con el ion hidróxido (OH^-) para formar bicarbonato potásico (Ecuación 1), lo que constituye una solución rica en CO_2 . Posteriormente, esta solución con alto contenido de CO_2 se transfiere a un reactor de pellets, donde reacciona con una solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, precipitando en forma de CaCO_3 (Ecuación 2). Además, en esta reacción se recupera la solución inicial de KOH, que puede utilizarse nuevamente para el primer paso del proceso. Luego, los gránulos precipitados de CaCO_3 (carbonato cálcico) se recogen y se transfieren al calcinador, donde son calentados a temperaturas entre 850 - 900 °C. A dicha temperatura, el CaCO_3 se descompone y libera CO_2 puro (Ecuación 3), el cual es almacenado. La etapa de calcinación produce también óxido de calcio, el cual reaccionará con agua en el apagador. Esta hidratación produce una solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Ecuación 4), que puede introducirse en el reactor de pellets para la reacción de precipitación (5,7,8). El diagrama del proceso se puede apreciar en la Figura 1.

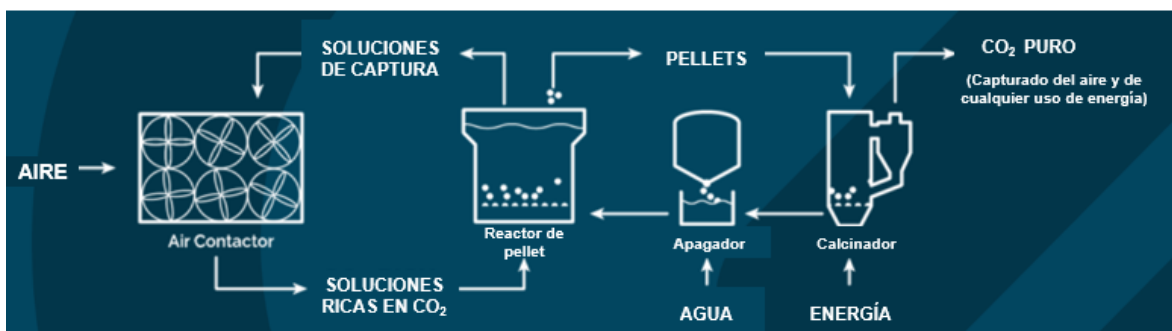
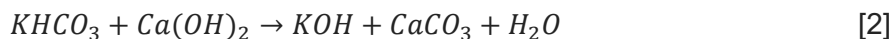


Figura 1. Diagrama del proceso de L-DAC y los principales equipos involucrados: contactor de aire, reactor de pellets, apagador y calcinador.

Fuente: Carbon Engineering, 2023. (Sodiq, y otros, 2023).

El L-DAC es la tecnología más madura, con plantas piloto y comerciales en operación. Empresas como Carbon Engineering han demostrado su viabilidad a escala, aunque el consumo energético sigue siendo elevado. Su nivel de madurez tecnológica se ubica en TRL 7–8.

2.2 | DAC Sólido (S-DAC)

El segundo enfoque utilizado para capturar CO₂ del aire ambiente es el DAC sólido (S-DAC), el cual, a diferencia del L-DAC, no requiere de soluciones químicas, ya que el principio de funcionamiento se basa en mecanismos de adsorción y desorción en estructuras sólidas. El proceso comienza en el contactor, donde el aire se aspira mediante grandes ventiladores y se lo hace pasar a través de un lecho que contiene al material absorbente. Estos adsorbentes consisten en un material de soporte, tales como estructuras metal-orgánicas, celulosa, copolímeros orgánicos o soportes inorgánicos (por ejemplo, SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, etc.)¹. En la diferentes casos, los materiales adsorbentes pueden ser funcionalizados con grupos como amina primaria o secundaria, la cual comienza a

¹ Proceso en el cual las superficies son modificadas químicamente o biológicamente para incorporar grupos funcionales específicos.

saturarse a medida capta el CO₂ del aire a temperatura ambiente (Ecuación 5). Tras la carga completa de las estructuras adsorbentes, se cierra el contactor y se aplica vacío. Al mismo tiempo, la temperatura en el interior del contactor se eleva a 80 – 100 °C mediante la inyección de vapor de agua caliente, lo que causa la liberación del CO₂ adsorbido (Ecuación 6). Posteriormente, el CO₂ capturado se puede almacenar, ya sea disolviéndolo en agua e inyectándolo en el subsuelo, donde se produce un proceso de solidificación natural (formación de minerales carbonatados), o almacenándolo en estanques a presión para utilizarlo con otros fines (9). El esquema del proceso recién descrito se presenta en la Figura 2 (10).

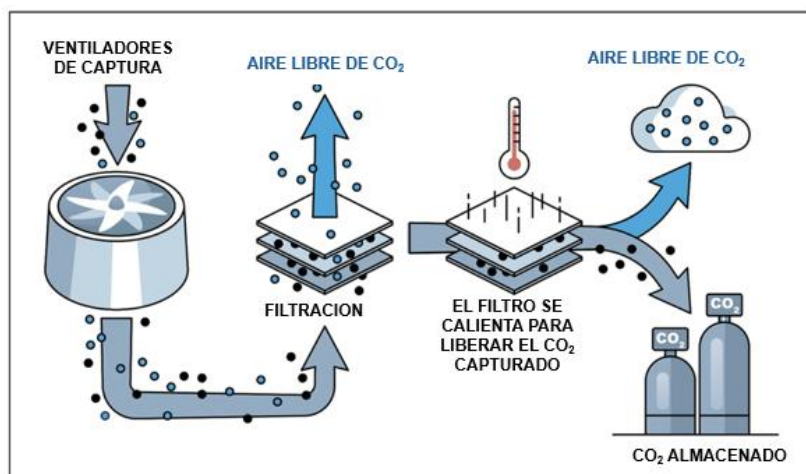
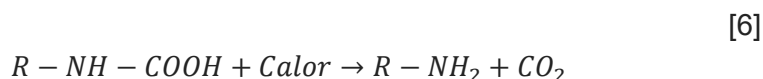
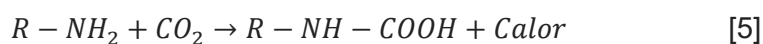


Figura 2. Diagrama del proceso de S-DAC y los principales equipos involucrados.

Fuente: Datos de Long International: Overview of Carbon Capture, Utilization, and Sequestration Projects: Direct Air Capture (2022).

El S-DAC ha experimentado un rápido avance en la última década gracias al desarrollo de adsorbentes sólidos, en particular materiales amina-funcionalizados. Empresas como Climeworks ya operan plantas modulares en Europa, lo que posiciona esta tecnología en una etapa de demostración avanzada (TRL 6–7). Su principal desafío radica en los costos y en la regeneración eficiente de los adsorbentes.

2.3 DAC Pasivo

A diferencia de los procesos mencionados anteriormente, la tecnología P-DAC (DAC Pasiva) utiliza un enfoque diferente, es una de las alternativas menos desarrollada, todavía en fases tempranas de investigación y validación experimental (TRL 3–4). En esta tecnología, se omiten los ventiladores que aspiran el aire. Por ejemplo, CarbonCollect instala sus "Árboles Mecánicos" en zonas con mucho viento. El viento transporta el aire con CO₂ a los colectores, donde este se adsorbe. Tras alcanzar su capacidad máxima, los colectores se regeneran y se obtiene una corriente de CO₂. Los adsorbentes utilizados en este proceso se denominan materiales adsorbentes de oscilación de humedad, que son básicamente resinas de intercambio iónico. Estas resinas son sensibles a la humedad (fijan el CO₂ cuando están secas y lo liberan cuando están húmedas) (11).

Por otro lado, Heirloom publicó su tecnología en el campo de la P-DAC. El proceso de la empresa consiste en colocar estantes con Ca(OH)₂ puro y dejar que reaccione con el CO₂ ambiental para formar CaCO₃ (véase la ecuación 7). Este CaCO₃ se calcina posteriormente para obtener CO₂ y CaO (véase la ecuación 3), que pueden hidratarse para producir Ca(OH)₂. Heirloom informa que su proceso se completa en 2,5 días y que la tasa de carbonatación es del 85 % del Ca(OH)₂ utilizado. Las tecnologías P-DAC consumen menos energía que los otros dos tipos de DAC mencionados anteriormente debido a la ausencia de ventiladores para el contacto del aire ambiente con los materiales selectivos de CO₂ (12).



3 Costos estimados de DAC

Una pregunta importante es la relativa a los costes previstos para las plantas DAC. Esta pregunta es difícil de responder con cifras exactas debido a la escasa experiencia adquirida hasta la fecha. La tecnología DAC es relativamente nueva y, por lo tanto, aún se desconocen importantes conocimientos sobre sus posibles problemas y desafíos. El CAPEX depende en gran medida del ritmo de aprendizaje y, por lo tanto, disminuirá constantemente en los próximos años. Por otro lado, el OPEX depende de la disponibilidad

de energía de bajo coste y, en consecuencia, del precio de la energía (13). Asimismo, las horas de funcionamiento previstas de la planta influyen en los costes OPEX.

National Academics publicó en 2019 los CAPEX y OPEX para las plantas L-DAC y S-DAC. En particular, los valores para las plantas S-DAC deben considerarse con cautela, ya que son una estimación aproximada de los costes previstos. El CAPEX y el OPEX para una planta L-DAC son más importantes, debido a sus componentes ya establecidos para otras aplicaciones industriales (por ejemplo, el apagador o el calcinador). National Academics también publicó dos métodos para la generación de calor en el calcinador de plantas L-DAC. Obviamente, cambiar la generación de calor tradicional mediante la quema de carbón o gas natural a un calcinador de H₂ más sostenible es más costoso. Además, la generación de H₂ verde implica la instalación de un electrolizador y elementos fotovoltaicos para generar la electricidad necesaria. Todo esto se refleja en un mayor costo de la tonelada de CO₂ capturada.

Tabla 1. Costos de L-DAC (gas natural o carbón para energía) para 1Mt de CO₂/año (14)

CAPEX	USD (M\$)	OPEX	USD (M\$/y)
Conjunto de contactores	210-420	Mantenimiento	18-33
Apagador, caustificador, clarificador	130-195	Mano de obra	6-10
Unidad de separación de aire y condensador	65-100	Reposición y eliminación de residuos	5-7
Calcinador oxigenado	270-540	Gas natural	25-35
		Carbón	18-25
		Electricidad	47088
CAPEX total	675-1255	OPEX (gas natural)	66-113
CAPEX anual (M\$/year)	81-151	OPEX (coal)	59-103
Costo de eliminación	199-357		

Tabla 2. Costo para L-DAC (energía renovable) (4) for 1Mt CO₂/año (14).

CAPEX	USD (M\$)	OPEX	USD (M\$/y)
--------------	------------------	-------------	--------------------

Conjunto de contactores	210-420	Mantenimiento	58-91
Apagador, caustificador, clarificador	130-195	Mano de obra	17-27
Calcinador de H ₂	360-720	Recogida y eliminación de residuos	05-jul
Condensador	0.3	Fotovoltaica y baterías	6.7-11.3
Agua	1.1		
Electrolizador	260-420		
PV+batería	865-1465		
Compresor	22-37		
Tanque presurizado	73-207		
CAPEX total	1921-3045		
CAPEX anual (M\$/year)	230-365	OPEX	87-136
Costo de eliminación	317-501		

Tabla 3. Costos anuales estimados para-S-DAC (4) para 1 Mt de CO₂/año (14).

CAPEX	\$/tCO₂	OPEX	\$/tCO₂
Absorbente	70-186	Absorción	9-19
Soplador	2.1-6.7	Vapor	2.2-3
Bomba de vacío	2.6-8.5	Bomba de vacío	0.2-0.24
Condensador	0.07-0.1		
Contactor	1.3-4.1		
CAPEX anual (\$/tCO₂)	76-205	OPEX	12-23
Costo de eliminación	88-228		

La revista alemana “Energiewirtschaftliche Tagesfragen” (15) presenta una comparación entre las dos principales tecnologías DAC. La Tabla 4 muestra de forma exhaustiva las principales características y diferencias de ambas vías de DAC. Cabe mencionar que la diferencia de temperatura es enorme y que la generación de calor requiere de mucha energía. Para los procesos S-DAC, se podría utilizar el calor de otros procesos (por ejemplo, el calor residual de la electrólisis), mientras que para L-DAC el calor debe producirse.

Carbon Engineering utiliza gas natural combinado con CCS como combustible en su planta piloto, lo que ayuda a reducir los costos de eliminación de CO₂. Otra gran diferencia entre las dos tecnologías DAC es el consumo de agua. En los procesos S-DAC, la humedad del aire ambiente se transforma en agua utilizable y, por lo tanto, también es adecuada para regiones con escasos recursos hídricos, mientras que el proceso L-DAC cuenta con un consumo de agua considerable.

Tabla 4. Diferencias entre las dos principales tecnologías DAC.

	S-DAC	L-DAC
Temperatura máxima	100 °C	850 °C
Diseño	Módulos	Planta
Necesidad de energía eléctrica	500 kWh/tCO ₂ (2030)	366 kWh/tCO ₂ (2025)
Necesidad de energía térmica	5,4 GJ/t(CO ₂) (2030)	5,25 GJ/t(CO ₂) (2025)
Agua	0,8 - 2 tH ₂ O/t(CO ₂)	4,7 tH ₂ O/t(CO ₂)
Superficie necesaria	0,26 m ² /t(CO ₂)	0,04 m ² /t(CO ₂)
Costo futuro previsto (2045)	< 100 USD/t(CO ₂)	< 100 USD/t(CO ₂)

Para estimar la fiabilidad de la tecnología DAC, es importante evaluar el precio por tonelada de CO₂ removida. Muchos expertos en procesos DAC sugieren que el precio por tonelada de CO₂ removida debe ser inferior a 100 USD/t(CO₂) para que la tecnología DAC sea una alternativa en el futuro. En 2023, investigadores del Instituto de Estudios Energéticos de Oxford publicaron un promedio trienal de 718 USD por tonelada de CO₂ removida con procesos DAC (16). En el caso de los procesos S-DAC, los altos precios del absorbedor, las necesidades de electricidad para alimentar los ventiladores y las bombas de vacío, y los requisitos de calor para la regeneración del absorbedor son puntos críticos para reducir el precio por tonelada de CO₂ removida. Mientras que para los métodos L-DAC, la generación sostenible de calor para el calcinador es un desafío que debe resolverse. MIT Technology Review informa que el rango actual de CO₂ eliminado oscila entre 200 y 1000 USD por tonelada, lo que aún dista mucho del objetivo sugerido (17). Climeworks vendió créditos a JPMorgan Chase por unos 800 USD por tonelada, según informó Reuters en diciembre de 2023. Esta es la única información fiable sobre el coste actual de una tonelada de CO₂

eliminada por DAC. Recientemente, la startup holandesa Carbyon afirmó ser la primera empresa del mundo en desarrollar un proceso por debajo de los 100 USD/t (CO₂) (18).

4 | Grandes empresas

CLIMEWORKS

Es una empresa suiza pionera en el campo de la DAC, especializada en tecnologías S-DAC que opera en Europa y Estados Unidos. Su objetivo final es eliminar el CO₂ del aire ambiente a escala de gigatoneladas para 2050 y almacenarlo bajo tierra. Climeworks emplea a más de 300 personas en Suiza, Alemania, Islandia y Estados Unidos, y hasta la fecha ha recaudado más de 810 millones de dólares para su misión. La empresa es mundialmente conocida por sus ideas innovadoras, como lo demuestra su inclusión en la lista climática "Time100".

En Europa, Climeworks instaló su primera planta DAC en Suiza en 2017 para la eliminación directa de CO₂ del aire. El CO₂ licuado se destinó a la industria de bebidas. Simultáneamente, Climeworks construyó su primera planta ("Arctic Fox") en Islandia. Posteriormente, también en Islandia, inauguró la planta "Orca" en 2021, con una capacidad total de eliminación de CO₂ de 4000 toneladas al año. Actualmente, Climeworks está construyendo otra planta en Islandia (el "proyecto Mammoth") con una capacidad prevista de 36 t(CO₂)/año (19).

CARBON ENGINEERING

Carbon Engineering se fundó en 2009 en Canadá con el ambicioso objetivo de eliminar el CO₂ del aire ambiente a escala de megatoneladas. Carbon Engineering es uno de los líderes mundiales en tecnología L-DAC. La comercialización de esta tecnología está a cargo de la empresa estadounidense 1Point5.

Entre 2015 y 2020, pusieron en marcha su planta piloto de DAC y combustibles sintéticos. En colaboración con la empresa 1Point5, Carbon Engineering diseñó su primera planta comercial y comenzó su construcción en 2022 en Texas. Se espera que la planta 'Stratos' alcance su capacidad total de captura de 500.000 toneladas de CO₂ al año en los próximos años, con una fase inicial de 250.000 toneladas anuales prevista para finales de 2025 (20).

GLOBAL THERMOSTAT

Global Thermostat se fundó en 2009 en Estados Unidos; su oficina principal se encuentra en Colorado. Su misión de encontrar la forma más económica de eliminar el CO₂ del aire ambiente. Se ha convertido en una de las empresas estadounidenses más importantes dedicadas a las tecnologías DAC. Al igual que Climeworks, Global Thermostat ha adquirido una amplia experiencia en el campo de la S-DAC (21).

Global Thermostat inauguró su primera planta comercial de DAC (serie K) en 2022 en Colorado, con una capacidad de 1000 t(CO₂)/año. Además, anunciaron la puesta en servicio de los primeros sistemas DAC en contenedores de la serie T para un proyecto de investigación en Hawái.

SKYTREE

La empresa se fundó en 2014 tras una investigación pionera de la ESA (Agencia Espacial Europea). La tecnología de Skytree se centra en el campo de la S-DAC y ha recibido numerosos reconocimientos internacionales (de la UE, EE. UU. y Japón) por su trabajo durante los últimos 10 años. Skytree desarrolla diferentes tipos de aplicaciones DAC. Ofrecen procesos a pequeña escala (“Skytree Cumulus” (20 kg (CO₂) /día), soluciones de tamaño mediano (“Skytree Stratus” (1250 kg(CO₂)/día) y el “Skytree Stratus-Hub” para la eliminación de CO₂ a gran escala con la capacidad anual por unidad de 900 tonCO₂/año(22).

HEIRLOOM

Heirloom se fundó en Estados Unidos con su oficina principal en California. Es una *startup* de reciente creación que inauguró su primera planta de eliminación de CO₂ en 2023. Su objetivo es eliminar mil millones de toneladas de CO₂ para 2035. A diferencia de otros enfoques, la tecnología de Heirloom es un convertidor de anión-combustible (DAC) pasivo. En su planta de California, esperan eliminar 1000 toneladas de CO₂ al año y almacenarlas permanentemente bajo tierra encapsulado en hormigón (23).

CARBON COLLECT LIMITED

Carbon collect limited, se fundó en 2019 en Irlanda con su oficina principal en Dublín. Científicos reunidos en torno al profesor Klaus Lackner lanzaron su *startup*. Gracias a la amplia experiencia de Lackner y su equipo, Carbon Collect ha logrado grandes avances en los últimos años, lo que le ha valido reconocimiento internacional. Su árbol mecánico es un

ejemplo de P-DAC y se probó por primera vez en Tempe, Arizona, produciendo corrientes de CO₂ de alta pureza. Se espera que pequeños grupos del árbol mecánico puedan eliminar una tonelada de CO₂ al día, mientras que las granjas de carbono podrían eliminar entre 1 y 4 millones de toneladas al año (24).

CARBON CAPTURE INC.

Carbon capture, se inició en Estados Unidos. La empresa fue fundada por Bill Gross y se dedica a eliminar CO₂ del aire ambiente. CarbonCapture utiliza tecnología de tipo S-DAC para sus procesos. En 2022, anunciaron el proyecto "Bison", que se espera que elimine 5 Mt(CO₂) al año. Se esperaba que los primeros módulos estuvieran en funcionamiento a finales de 2023, pero la empresa tuvo que admitir retrasos en su calendario (25).

CARBYON

Carbyon es una startup neerlandesa fundada en 2019 en Eindhoven. Desarrollaron un proceso único de oscilación rápida, basado en un material de membrana modificado que absorbe CO₂ más rápido que otros absorbentes. Afirman que Carbyon, como la primera empresa a nivel mundial, alcanzó el objetivo de 100 USD por tonelada de CO₂ eliminada gracias a su material altamente eficiente. Además, los costos de energía se redujeron drásticamente, según la empresa, ya que la regeneración del material absorbente solo requiere un breve pulso de calor. Carbyon y Deep Sky han anunciado su colaboración para la instalación de una planta piloto en Canadá con la tecnología de captura de CO₂ de Carbyon. Las empresas esperan que las dos unidades de procesamiento de aire alcancen una capacidad total de 100 toneladas de CO₂ al año (26).

MAN Energy Solutions

MAN Energy Solutions, fundada en Alemania, es una empresa líder en ingeniería avanzada, especializada en motores industriales, turbomáquinas, compresores y soluciones energéticas a gran escala. Con más de 250 años de historia, la compañía ha evolucionado para enfocarse en la descarbonización de sectores difíciles de electrificar, incluyendo transporte marítimo, generación industrial de energía y captura de carbono.

En 2025, la empresa cambió su nombre a Everllence, reflejando su compromiso con soluciones sostenibles y la transición hacia una economía global libre de emisiones netas. MAN Energy Solutions/Everllence ha desarrollado proyectos de captura directa de aire (DAC) en colaboración con HIF Global para la planta Haru Oni en Punta Arenas, Chile, suministrando e instalando los equipos clave provenientes de Alemania. La compañía opera a nivel mundial con aproximadamente 15.000 empleados y más de 140 localidades,

consolidándose como un actor estratégico en tecnologías de descarbonización y soluciones energéticas integrales (27).

5

Estado actual del DAC y planes futuros

Actualmente, solo hay unas pocas plantas de DAC en funcionamiento. La mayoría se encuentran aún en una fase inicial de desarrollo, por lo que sus tasas de eliminación de CO₂ son bastante bajas. Según el informe del Agencia Internacional de la Energía (IAE) sobre DAC, existen 27 plantas de DAC en funcionamiento en Europa, Norteamérica, Japón y Oriente Medio, con una capacidad total de eliminación de 0,01 Mt de CO₂ por año. La planta de DAC más grande en funcionamiento fue construida por Climeworks en Islandia y se denomina "Orca". Allí, Climeworks puede eliminar 4.000 toneladas de CO₂ al año con su tecnología S-DAC (28).

Se anuncian importantes inversiones en DAC y varias plantas se encuentran en las primeras fases de planificación. Según el informe del IAE, 16 proyectos en todo el mundo están en construcción o en fase avanzada de planificación. De comenzar a operar sin demoras, la capacidad mundial de eliminación de CO₂ mediante tecnologías DAC aumentaría a 4,1 Mt de CO₂ al año, lo que aún dista mucho del objetivo necesario de 75 Mt para alcanzar cero emisiones netas para 2050 (29).

Tabla 5. Resumen de la capacidad anual de captura de CO₂ de varias empresas de DAC en millones de toneladas (Mt CO₂) para los años 2022 y 2030.

Company	2022 (Mt CO ₂)	2030(Mt CO ₂)
Climeworks	5	1.200
Global Thermostat	1,5	1.500
1Point5/Carbon Engineering	0,4	59.000
CarbonCapture	0	5.000

Estos proyectos planificados incluyen una nueva instalación construida por Climeworks en Islandia. Se espera que el proyecto "Mammoth" comience a operar este año y Climeworks espera eliminar hasta 36.000 toneladas de CO₂ al año mediante almacenamiento subterráneo. El almacenamiento de CO₂ se lleva a cabo con la empresa asociada Carbfix e incluye la disolución del CO₂ en agua y su posterior bombeo a las rocas basálticas subterráneas, donde se mineralizará de forma natural y se almacenará permanentemente (30).

Climeworks y Heirloom colaboran con Batelle en el proyecto "Cypress" en EE. UU., que pretende eliminar más de 1 millón de toneladas de CO₂ al año y almacenarlo permanentemente bajo tierra. Obviamente, se utilizará tecnología S-DAC en esta planta y se prevé que esté plenamente operativa para 2029 (31).

Otro gran proyecto es el proyecto "Bison", planificado por CarbonCapture en Wyoming. CarbonCapture anunció que su planta podrá eliminar 5 millones de toneladas de CO₂ al año. Aquí se emplearán tecnologías S-DAC y el CO₂ producido será almacenado permanentemente bajo tierra por su socio Frontier Carbon Solutions LLC (25).

1PointFive comenzó con la construcción de una gran planta de DAC en Texas. Cuando esté plenamente operativa, se espera que la capacidad de CO₂ sea de 500.000 toneladas de CO₂ al año, lo que la convertiría en la planta de DAC más grande del mundo. 1PointFive empleará la tecnología L-DAC de Carbon Engineering para esta planta. El CO₂ obtenido se almacenará bajo tierra en formaciones salinas (32).

Además, 1PointFive ya está planeando su próxima gran planta en el sur de Texas. Esta instalación, conocida hasta ahora como "South Texas DAC Hub", cuenta con impresionantes dimensiones. 1PointFive, Carbon Engineering y Worley se han asociado para eliminar potencialmente hasta 30.000.000 toneladas de CO₂ al año. Esto equivaldría al consumo eléctrico de 6,6 millones de coches eléctricos a casi 6 millones de hogares. Se está planeando una capacidad de almacenamiento subterráneo de 3.000 millones de toneladas de CO₂. El futuro dirá si se pueden mantener estas impresionantes cifras (33).

6 | DAC en Chile

En 2022, HIF Global, en conjunto con Porsche, Volkswagen y MAN Energy, anunció la incorporación de una unidad de captura directa de dióxido de carbono (DAC) en la planta Haru Oni, ubicada en Magallanes. Esta tecnología permitirá obtener CO₂ directamente desde el aire para emplearlo en la producción de e-combustibles como e-gasolina y e-metanol. En esta instalación piloto, ya se produce hidrógeno verde a partir de energía eólica, y el objetivo futuro es combinarlo con CO₂ capturado del aire ambiente para sintetizar combustibles sintéticos. La capacidad estimada de la unidad DAC sería de 600 t/año de CO₂. Hasta ahora, el proceso no se encuentra plenamente operativo y el CO₂ utilizado proviene de importaciones desde Argentina (34).

En 2021, la agencia alemana GIZ, en colaboración con el Ministerio de Energía de Chile, publicó un informe en el que se resalta la importancia estratégica de la DAC para abordar las emisiones inevitables de sectores industriales como el cemento, la celulosa y la madera (35).

Aunque actualmente no existen proyectos de gran escala, Chile presenta condiciones particularmente favorables para el desarrollo de estas tecnologías. El norte del país, gracias a su radiación solar excepcional y clima estable, podría convertirse en una ubicación ideal para plantas DAC, especialmente en modalidades sólidas (S-DAC), dada su menor demanda de agua. Desde puertos industriales como Antofagasta, el CO₂ capturado podría exportarse o destinarse a la producción de e-combustibles. En contraste, en el sur de Chile, si bien existe una alta disponibilidad de recursos hídricos y energías eólicas, las condiciones climáticas de baja temperatura y humedad relativa reducen la viabilidad de tecnologías de base líquida (L-DAC), resultando más favorables las opciones de tipo sólido (S-DAC).

En conjunto, estos factores posicionan a Chile como un país con alto potencial para la implementación futura de DAC, tanto para aplicaciones domésticas como para integrarse a los mercados internacionales de captura y utilización de carbono.

7 Conclusiones

La captura directa de dióxido de carbono (DAC) se perfila como una tecnología clave en la transición hacia la carbono-neutralidad, no tanto para sustituir métodos más competitivos de mitigación en fuentes puntuales, como la captura post-combustión en sectores industriales, sino porque constituye, junto con la reforestación, una de las pocas alternativas disponibles para reducir directamente la concentración de CO₂ en la atmósfera. Aunque enfrenta desafíos asociados a sus elevados costos, consumo energético y escalabilidad, la experiencia obtenida en proyectos piloto y plantas en operación alrededor del mundo demuestra que la tecnología atraviesa una etapa de maduración acelerada. No obstante, las proyecciones indican que, a futuro, la DAC podría representar cerca de un 35% de la captura global de CO₂, lo que equivaldría a instalar del orden de miles de plantas de gran escala a nivel mundial, un desafío logístico y económico sin precedentes. Además, si bien se esperan reducciones progresivas de costos, se estima difícil bajar de los 100 USD por tonelada de CO₂ capturado, cifra aún superior a la captura en fuentes puntuales (≈50 USD/ton). En este contexto, más que una solución inmediata, la DAC debe entenderse

como una tecnología en desarrollo cuyo despliegue requerirá innovación sostenida, marcos regulatorios adecuados y una fuerte cooperación internacional.

En el caso de Chile, si bien actualmente no existen plantas de DAC de gran escala en operación, la instalación de la primera unidad en la planta Haru Oni, junto con el creciente interés gubernamental, académico e industrial en estas tecnologías, posiciona al país como un escenario atractivo para su desarrollo futuro. La combinación de recursos renovables excepcionales, con energía solar abundante en el norte y energía eólica e hidráulica en el sur, ofrece ventajas comparativas únicas para sostener energéticamente proyectos de DAC y, al mismo tiempo, potenciar la producción de e-combustibles y otras aplicaciones industriales del CO₂ capturado.

Además, la implementación de DAC en Chile podría generar un efecto multiplicador al incentivar la innovación tecnológica, la creación de capacidades locales en ingeniería y la integración de cadenas de valor vinculadas a la captura y utilización de carbono. No obstante, avanzar en esta dirección requerirá la articulación de políticas públicas claras, inversión privada comprometida, incentivos regulatorios y cooperación internacional que permitan transformar el potencial tecnológico y energético del país en resultados tangibles, contribuyendo de manera significativa a los compromisos climáticos globales y al desarrollo sostenible.

En síntesis, la DAC no debe considerarse como una solución aislada, sino como un complemento estratégico dentro de un portafolio integral de medidas de mitigación del cambio climático, capaz de asegurar la reducción de emisiones difíciles de eliminar y de reforzar la transición hacia un modelo energético más sostenible.

1. IEA [Internet]. [citado 29 de agosto de 2025]. CO2 Emissions – Global Energy Review 2025 – Analysis. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions>
2. PDF [Internet]. [citado 22 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/UN-Climate-Change-Annual-Report-2018.pdf>
3. El Acuerdo de París | CMNUCC [Internet]. [citado 8 de septiembre de 2025]. Disponible en: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
4. State of the Art: CCS Technologies 2023 [Internet]. Global CCS Institute. [citado 22 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/state-of-the-art-ccs-technologies-2023/>
5. IEA [Internet]. 2024 [citado 22 de agosto de 2025]. World Energy Outlook 2024 – Analysis. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
6. FOEN FO for the E. Bilateral climate agreements [Internet]. [citado 20 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/themen/thema-klima/klimawandel-stoppen-und-folgen-meistern/klima--internationales/staatsvertraege-umsetzung-klimauebereinkommen-von-paris-artikel6.html>
7. Credits C. The Ultimate Guide to Understanding Carbon Credits [Internet]. Carbon Credits. 2024 [citado 22 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://carboncredits.com/the-ultimate-guide-to-understanding-carbon-credits/>
8. Carbon Engineering [Internet]. [citado 22 de agosto de 2025]. Carbon Engineering | Direct Air Capture of CO2 | Home. Disponible en: <https://carbonengineering.com/>
9. Read «Direct Air Capture and Mineral Carbonation Approaches for Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration: Proceedings of a Workshop—in Brief» at NAP.edu [Internet]. [citado 22 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://nap.nationalacademies.org/read/25132/chapter/1>
10. ccrevey. Direct Air Carbon (CO2) Capture Process & Technologies [Internet]. Long International. 2022 [citado 22 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://www.long-intl.com/blog/direct-air-capture/>
11. MechanicalTree™ – Carbon collect [Internet]. [citado 22 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://carboncollect.com/mechanical-tree/>
12. Ngwu G, Suleman H, Ahmad F, Qadir D, Shamair Z, Nasir Q, et al. Passive Direct Air Capture of Carbon Dioxide with an Alkaline Amino Acid Salt in Water-Based Paints. *Energies*. enero de 2024;17(2):320.

13. Breitschopf B, Dütschke E, Duscha V, Haendel M, Hirzel S, Kantel A, et al. A game changer in climate policy?
14. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda [Internet]. Washington, D.C.: National Academies Press; 2019 [citado 22 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://www.nap.edu/catalog/25259>
15. Carbon Removal | 1PointFive [Internet]. [citado 22 de agosto de 2025]. Disponible en: https://www.1pointfive.com/carbon-removal?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=dac&utm_term=co2%20capture&utm_content=698038151247&gad_source=1&gad_campaignid=20517887953&gbraid=0AAAAABY_EpWosEL0gpkpDie2zIUyZLn&gclid=Cj0KCQjwqqDFBhDhARIsAIHTlkt5hkpSHts8Hc1RMJQxJEKgGgY5Wny_j-tCyjF59o5Q2AW0sZdSYaAieDEALw_wcB
16. Trendafilova P. New Oxford Institute Study Examines What Is Needed To Scale Direct Air Capture [Internet]. Carbon Herald. 2024 [citado 1 de septiembre de 2025]. Disponible en: <https://carbonherald.com/new-oxford-institute-study-examines-what-is-needed-to-scale-direct-air-capture/>
17. page MS. MIT Technology Review. [citado 1 de septiembre de 2025]. 2023 Climate Tech Companies to Watch: Climeworks and its carbon-sucking fans. Disponible en: <https://www.technologyreview.com/2023/10/04/1080109/2023-climate-tech-companies-climeworks-carbon-removal-direct-air-capture/>
18. 2023 Climate Tech Companies to Watch: Climeworks and its carbon-sucking fans | MIT Technology Review [Internet]. [citado 22 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://www.technologyreview.com/2023/10/04/1080109/2023-climate-tech-%20companies-climeworks-carbon-removal-direct-air-capture/>
19. Climeworks [Internet]. 2025 [citado 21 de agosto de 2025]. High-quality carbon removal company. Disponible en: <https://climeworks.com>
20. Meet the Carbon Engineering Team [Internet]. Carbon Engineering. [citado 21 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://carbonengineering.com/our-team/>
21. gasworld. gasworld. 2024 [citado 22 de agosto de 2025]. Global Thermostat DAC tech supports algae growth for biofuel production. Disponible en: <https://www.gasworld.com/story/global-thermostat-dac-tech-supports-algae-growth-for-biofuel-production/2133631.article/>
22. About Us: Engineering Advanced DAC Technology | Skytree [Internet]. [citado 21 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://skytree.tech/en-en/about-us>
23. Remove CO2 [Internet]. [citado 21 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://www.heirloomcarbon.com/remove-co2>
24. Carbon collect – RADICAL BREAKTHROUGH IN CARBON CAPTURE [Internet]. [citado 21 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://carboncollect.com/>
25. CarbonCapture Inc. | Direct air capture for a net zero future [Internet]. [citado 20 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://www.carboncapture.com>

26. Carbyon - Direct air capture of CO₂ to clean up our atmosphere [Internet]. [citado 21 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://www.carbyon.com/>
27. MAN Energy Solutions [Internet]. [citado 8 de septiembre de 2025]. MAN Energy Solutions Chile. Disponible en: <https://www.man-es.com/global/chile>
28. Climeworks [Internet]. [citado 20 de agosto de 2025]. Orca is Climeworks' new large-scale carbon dioxide removal plant. Disponible en: <https://climeworks.com/plant-orca>
29. IEA [Internet]. [citado 20 de agosto de 2025]. Direct Air Capture - Energy System. Disponible en: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-%20storage/direct-air-capture>
30. Climeworks [Internet]. [citado 20 de agosto de 2025]. Mammoth: our newest direct air capture and storage facility. Disponible en: <https://climeworks.com/plant-mammoth>
31. Project Cypress [Internet]. [citado 20 de agosto de 2025]. Advancing Direct Air Capture in Louisiana. Disponible en: <https://projectcypress.com/>
32. 1PointFive [Internet]. [citado 20 de agosto de 2025]. Ector County DAC - STRATOS. Disponible en: <https://www.1pointfive.com/projects/ector-county-tx>
33. 1PointFive [Internet]. [citado 20 de agosto de 2025]. South Texas DAC Hub - King Ranch. Disponible en: <https://www.1pointfive.com/projects/south-texas-dac>
34. Default [Internet]. [citado 8 de septiembre de 2025]. HIF Global begins installation of the first Direct Air Capture unit in Chile. Disponible en: <https://hifglobal.com/media/news-description/2024/12/12/02-hif-global-begins-installation-of-the-first-direct-air-capture-unit-in-chile>
35. Iniciativa de GIZ junto al Ministerio de Energía: Presentan maqueta interactiva sobre el camino de Chile a la carbono neutralidad | Ministerio de Energía [Internet]. [citado 8 de septiembre de 2025]. Disponible en: <https://energia.gob.cl/noticias/nacional/iniciativa-de-giz-junto-al-ministerio-de-energia-presentan-maqueta-interactiva-sobre-el-camino-de-chile-la-carbono-neutralidad>