



**Politecnico  
di Torino**

**Politecnico di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea Aprile 2025

**Carbon Capture and Utilization – Tendenze  
Globali, Stato dell'Arte e Prospettive di  
Sviluppo Tecnologico: Analisi Econometrica  
dell'Avanzamento Tecnologico dei Progetti  
su Scala Globale\***

Relatrice:

Prof.ssa Laura Rondi

Correlatore:

Marco Illich

Candidato:

Riccardo Monaco

\*Questa tesi è stata realizzata nell'ambito del progetto NODES, finanziato dal MUR sui fondi M4C2 - Investimento 1.5 Awiso "Ecosistemi dell'Innovazione", nell'ambito del PNRR finanziato dall'Unione europea - NextGenerationEU (Grant agreement Cod. n.ECS00000036).



### **Abstract**

La crescente urgenza di contrastare il cambiamento climatico ha portato allo sviluppo e all'adozione di tecnologie di Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS), che sono considerate essenziali per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione, soprattutto nei settori hard-to-abate. Ciononostante, il ruolo delle tecnologie relative all'utilizzo della CO<sub>2</sub> (Utilization) nel contesto della transizione green risulta non essere ancora stato approfondito a dovere, soprattutto in relazione agli aspetti tecnologici, politici ed economici legati a progetti di questo tipo. Questa tesi propone, prima di tutto, una panoramica introduttiva sui processi CCUS, per poi entrare nel dettaglio dell'utilizzo della CO<sub>2</sub> in prodotti e processi industriali. A questo proposito, la tesi presenta una rassegna della letteratura relativa allo stato attuale delle tecnologie di utilizzo della CO<sub>2</sub>, identificando cinque percorsi di utilizzo principali. Viene presentata successivamente una panoramica sul ruolo delle politiche ambientali a supporto dello sviluppo tecnologico in questo ambito. Si discutono quindi, a livello di policy adottate dai governi, gli approcci principali in questo contesto: incentivi economici, appalti pubblici, mandati normativi, etichette/certificazioni/test e fondi per research development and demonstration (RD&D). Viene poi indagato l'aspetto della collaborazione nel contesto dei progetti CCUS, presentando i modelli di collaborazione principali, sia inter-progetto sia intra-progetto e si cerca di comprendere quale struttura di governance risulta più adatta per progetti di questo tipo. Attraverso la costruzione di un dataset ad hoc, sono stati raccolti tutti i principali progetti CCU sviluppati negli ultimi venti anni, con le relative informazioni strutturali, finanziarie e politiche. Viene quindi proposta un'analisi descrittiva delle principali tendenze relative ai progetti CCU contenuti nel dataset. Per concludere è stata sviluppata un'analisi empirica, in particolare un'analisi econometrica. In particolare, vengono ricercati i fattori che più influenzano l'avanzamento tecnologico nel contesto dei progetti CCU, tramite tre modelli di regressione sui dati.

	4
<b>ABSTRACT</b>	<b>3</b>
<b>FIGURE</b>	<b>8</b>
<b>TABELLE</b>	<b>10</b>
<b>1. INTRODUZIONE</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Panoramica sul processo CCUS</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Panoramica sulla diffusione e sullo stato di avanzamento CCUS</b>	<b>15</b>
1.2.1 Tendenze dei brevetti	15
1.2.2 Tendenze delle pubblicazioni scientifiche	19
1.2.3 Diffusione dei progetti CCUS	22
<b>1.3 Rassegna della letteratura sullo stato attuale dell'utilizzo di CO<sub>2</sub> - Principali pathways di utilizzo della CO<sub>2</sub></b>	<b>25</b>
1.3.1 Enhanced Oil Recovery	25
1.3.2 Conversione chimica, carburanti e materiali durevoli	29
1.3.3 Mineralizzazione della CO <sub>2</sub> e materiali da costruzione derivati dalla CO <sub>2</sub>	34
1.3.4 Conversione biologica e coltivazione di alghe	35
1.3.5 Utilizzo diretto	37
<b>2. IL RUOLO DELLE POLITICHE AMBIENTALI A SUPPORTO DELL'UTILIZZO DI CO<sub>2</sub></b>	<b>38</b>
<b>2.1 Introduzione alle politiche per la CCU</b>	<b>38</b>
<b>2.2 Principali strumenti incentivanti utili a spingere le tecnologie e i progetti CCU</b>	<b>40</b>
2.2.1 Incentivi economici	40
2.2.2 Appalti pubblici	41
2.2.3 Mandati normativi	42

	5
2.2.4 Etichette, certificazioni e test	42
2.2.5 Research Development and Demonstration (RD&D)	43
<b>2.3 Confronto tra Europa e Nord America</b>	<b>47</b>
2.3.1 Quadro normativo dell'Unione Europea	47
2.3.2 Quadro normativo del Nord America	48
<b>3. PRINCIPALI MODELLI DI COLLABORAZIONE NEL CONTESTO CCUS</b>	<b>50</b>
<b>3.1 Modelli di collaborazione tra più progetti CCUS: Project Hubs</b>	<b>51</b>
<b>3.2 Modelli di collaborazione intra-progetto</b>	<b>55</b>
3.2.1 I motivi della collaborazione e le caratteristiche dei progetti complessi	55
3.2.2 Qual è la struttura ottimale per l'alleanza?	57
<b>3.3 Carbon Credits, un'opportunità anche per le SMEs</b>	<b>63</b>
<b>3.4 Advanced Market Commitment, un modello di investimento innovativo</b>	<b>64</b>
3.4.1 Come funziona un AMC nel contesto CCU	65
<b>4. ANALISI E REPORT DEL DATASET SUI PROGETTI CCU</b>	<b>67</b>
<b>4.1 Fonti dataset e numero per progetti per fonte</b>	<b>67</b>
<b>4.2 Panoramica variabili dataset con tab aggregata per macro-voce</b>	<b>69</b>
<b>4.3 Distribuzione geografica dei progetti CCU</b>	<b>70</b>
<b>4.4 Trend evolutivo dei progetti CCU</b>	<b>72</b>
<b>4.5 Origine della CO2 nei progetti CCU</b>	<b>75</b>
<b>4.6 Categorie di prodotto dai progetti CCU</b>	<b>83</b>

	6
<b>4.7 Livelli TRL per progetti CCU in Europa</b>	<b>87</b>
<b>4.8 Project Budget dei progetti CCU in Europa</b>	<b>91</b>
<b>4.9 Focus Italia</b>	<b>93</b>
<b>4.10 Progetto Nord Overst Digitale e Sostenibile (NODES) Spoke 2 - Green technologies and sustainable industries</b>	<b>96</b>
<b>5. ANALISI EMPIRICA</b>	<b>100</b>
<b>5.1 Descrizione del database e delle sue variabili</b>	<b>100</b>
<b>5.2 Analisi esplorativa del dataset</b>	<b>101</b>
<b>5.3 Matrice di correlazione tra le variabili</b>	<b>105</b>
<b>5.4 Modelli di regressione lineare – Analisi dei fattori determinanti il livello tecnologico finale e dei fattori determinanti l'avanzamento tecnologico nei progetti CCUS</b>	<b>108</b>
5.4.1 Prima regressione: domanda di ricerca, ipotesi e aspettative del modello di regressione lineare	108
5.4.2 Interpretazione dei risultati ottenuti	111
5.4.3 Seconda regressione: domanda di ricerca, ipotesi e aspettative del modello di regressione lineare	116
5.4.4 Interpretazione dei risultati ottenuti	119
<b>5.5 Modello di regressione logistica – Qual è la probabilità di avere un avanzamento significativo sulla scala TRL?</b>	<b>123</b>
5.5.1 Modello di regressione Logit e domanda di ricerca	123
5.5.2 Output e interpretazione dei risultati ottenuti	124
<b>6. CONCLUSIONE</b>	<b>129</b>

**BIBLIOGRAFIA****133**

## Figure

Figura 1: Ecosistema CCUS. Source: Chauvy, R., & Weireld, G. D. (2020). CO2 Utilization Technologies in Europe: A Short Review.	15
Figura 2: Tendenza annuale nel numero di brevetti 1964-2022. Source: Zhu, Y. et al. (2023), A Patent Bibliometric Analysis of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technology.	16
Figura 3: Tendenza del numero di brevetti per i primi tre paesi. Source: Zhu, Y. et al. (2023), A Patent Bibliometric Analysis of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technology.	18
Figura 4: Mappa del mondo che mostra dove vengono protetti i brevetti CCUS, 2001-2018. Source: Intellectual Property Office, 2021. Carbon capture, usage and storage: a worldwide overview of patenting related to the UK's ten-point plan for a Green Industrial Revolution.	19
Figura 5 Numero di articoli peer-reviewed relativi alla cattura di CO2 per gli anni 2011-2021 nei primi 5 paesi al mondo. Source: Clean Energy Technology Observatory: Carbon capture utilization and storage in the European Union - 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg.	20
Figura 6: Numero di articoli peer-reviewed relativi all'utilizzo di CO2 per gli anni 2011-2021 nei primi 5 paesi al mondo. Source: Clean Energy Technology Observatory: Carbon capture utilization and storage in the European Union - 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg.	21
Figura 7: Progetti cumulati per evoluzione dello stato nel tempo. Source: Illich, M.; Rondi, L. (2023). Carbon Capture Use and Storage Projects (1990-2023).	23
Figura 8: Numero di progetti CCUS per stato del progetto per macroarea geografica. Source: Illich, M.; Rondi, L. (2023). Carbon Capture Use and Storage Projects (1990-2023).	24
Figura 9: Numero di progetti EOR in funzione a livello globale, 1971-2017. Source: IEA, Number of EOR projects in operation globally, 1971-2017, IEA.	27
Figura 10 Distribuzione degli hub di progetto in base all'ambito della catena del valore e alla regione. Fonte: Barchi, Illich e Rondi (2024).	53

Figura 11 Emissioni di gas serra catturate annunciate da progetti all'interno o all'esterno di un hub CCUS. Fonte: Barchi, Illich e Rondi (2024).	55
Figura 12 Diverse modalità di governance al crescere del grado di comunicazione e di coordinamento. Fonte: Choi, J., & Contractor, F. J. (2017). Improving the Progress of Research & Development (R&D) Projects by Selecting an Optimal Alliance Structure and Partner Type. British Journal of Management.	60
Figura 13 Effetto della struttura di governance delle alleanze sulla probabilità di progresso in R&D (performance). Fonte: Choi, J., & Contractor, F. J. (2017). Improving the Progress of Research & Development (R&D) Projects by Selecting an Optimal Alliance Structure and Partner Type. British Journal of Management.	61
Figura 14 Interazione di ODCC e diversità organizzativa. Fonte: Fonte: Choi, J., & Contractor, F. J. (2017). Improving the Progress of Research & Development (R&D) Projects by Selecting an Optimal Alliance Structure and Partner Type. British Journal of Management.	63
Figura 15 Schema illustrativo di come funziona Frontier. Fonte: <a href="https://frontierclimate.com/">https://frontierclimate.com/</a>	65
Figura 16: Numero di progetti CCU per continente.	70
Figura 17: Evoluzione dei progetti CCU per facility stage nel tempo.	73
Figura 18: Numero di progetti CCU per tipo di fonte di CO2.	76
Figura 19: Quantità attuale di CO2 utilizzata per fonte di CO2 nei progetti CCU operativi.	80
Figura 20: Quantità di CO2 utilizzata per fonte di CO2 nei progetti CCU entro il 2030.	82
Figura 21: Volume di produzione [Mt/anno] per categoria di prodotto.	87
Figura 22: attuale distribuzione TRL dei progetti CCU per product category.	89
Figura 23: a) Attuale distribuzione dei livelli TRL dei progetti CCU operativi (Normalizzata); b) Distribuzione dei livelli TRL di tutti i progetti CCU (Normalizzata).	91
Figura 24: Project Budget, in milioni di €, divisa per partecipazione privata/pubblica e paese (UE).	93
Figura 25: Boxplot relativo alla variabile duration_yr.	103
Figura 26: Boxplot relativo alla variabile partner_count.	104
Figura 27: Heatmap della matrice di correlazione tra le variabili indipendenti.	106

## Tabelle

Tabella 1: Primi 10 paesi per numero di brevetti e relative statistiche. Source: Zhu, Y. et al. (2023), A Patent Bibliometric Analysis of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technology.	17
Tabella 2: Indicatori importanti per CCU EOR	29
Tabella 3: Confronto economico tra l'impianto proposto e quello convenzionale.	30
Tabella 4: Indicatori importanti per CCU produzione di urea.	31
Tabella 5: Confronto costi di produzione e-fuels e combustibili fossili.	32
Tabella 6: Indicatori importanti per CCU produzione carburanti sintetici	33
Tabella 7: Indicatori importanti per CCU Mineral Carbonation.	35
Tabella 8: Indicatori importanti per CCU sintesi di alghe.	37
Tabella 9 Principali programmi di supporto RD&D ad oggi. Fonte: Putting CO2 to Use, IEA 2019.	45
Tabella 10 Strumenti incentivanti per la creazione di un mercato per prodotti e servizi derivati dalla CO2 catturata. Fonte: Putting CO2 to Use, IEA 2019.	46
Tabella 11 Descrizione dei database utilizzati.	67
Tabella 12: Panoramica delle variabili del dataset e loro descrizione.	69
Tabella 13: Primi 15 paesi per numero di progetti CCU e la loro attuale Facility Stage.	71
Tabella 14: a) Numero di progetti CCU per conteggio di categoria di prodotto associato; b) Numero di progetti CCU per categoria di prodotto.	85
Tabella 15: Percentuale di progetti per ogni stato di progetto suddivisi per categoria di prodotto; TRL medio di inizio e TRL medio di fine per categoria di prodotto.	85
Tabella 16: panoramica dei Technology Readiness Levels (TRL).	88
Tabella 17: Panoramica dei progetti italiani di CCU.	94
Tabella 18: Panoramica dei progetti CCU nell'ambito dell'iniziativa NODES Spoke 2.	98
Tabella 19 Descrizione delle variabili presenti nel database.	101
Tabella 20: statistiche descrittive delle variabili	102

Tabella 21: Output regressioni sul livello finale di TRL (end_trl).	113
Tabella 22: Output regressioni sull'avanzamento tecnologico (delta_trl).	120
Tabella 23: distribuzione della variabile dipendente significant_delta_trl.	124
Tabella 24: Output regressioni logit sul livello significativo di variazione TRL.	126
Tabella 25: Effetti marginali relativi alle variabili nelle diverse regressioni Logit.	128

## 1. Introduzione

La crescente attenzione della comunità scientifica, sociale e istituzionale, unita all'urgenza di affrontare i cambiamenti climatici, sta accelerando la transizione verso una low-carbon economy, un modello economico a basse emissioni di carbonio e ad alta efficienza nell'uso delle risorse. Questo cambiamento ha spinto numerosi attori a livello globale a ricercare soluzioni innovative per affrontare le sfide ambientali. In questo contesto, molti governi e policy makers hanno spinto e supportato finanziariamente i settori industriali maggiormente carbon-intensive ad investire ingente liquidità nello sviluppo di tecnologie ed infrastrutture Carbon Capture, Utilization e Storage (CCUS) volte a decrementare il loro impatto ambientale. Secondo la International Energy Agency (IEA), le pratiche CCUS sono ad oggi ritenute tecnologie essenziali per limitare l'aumento della temperatura media globale al di sotto dei 1,5 °C rispetto ai livelli preindustriali<sup>1</sup> (IEA, 2024). Nello specifico, nel report *IEA Net Zero Emission by 2050* l'Agenzia riporta che circa 1000 MtCO<sub>2</sub> devono essere catturate e stoccate entro il 2030 per rispettare gli obiettivi sopracitati (IEA, 2024).

Il CCUS è un insieme di tecnologie progettate per ridurre l'impatto ambientale delle emissioni di CO<sub>2</sub> attraverso un processo strutturato in più fasi. Questo approccio integrato prevede la cattura della CO<sub>2</sub> direttamente dalle grandi fonti di emissione, come impianti industriali o centrali energetiche alimentate da combustibili fossili o biomassa, impedendone il rilascio in atmosfera. Il CCUS si configura come uno strumento strategico per ridurre le emissioni dei settori cosiddetti hard-to-abate, caratterizzati da processi produttivi intrinsecamente difficili da decarbonizzare. Inoltre, il CCUS non si limita a prevenire nuove emissioni, ma può contribuire anche alla rimozione della CO<sub>2</sub> già presente nell'atmosfera, attraverso tecnologie come la Direct Air Carbon Capture (DACC), che consentono di assorbire direttamente l'anidride carbonica dall'aria. Una volta catturata, la CO<sub>2</sub> può essere

---

<sup>1</sup> Questo è uno degli accordi sottoscritti 12 dicembre 2015 da 196 paesi al termine della Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (COP21) a Parigi. In particolare, questo mira a mantenere "l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali" e di proseguire gli sforzi "per limitare l'aumento della temperatura a 1,5 °C rispetto ai livelli preindustriali" UNFCCC, 2015.

immediatamente riutilizzata nel sito di origine oppure compressa e trasportata, generalmente tramite condutture o navi, verso il punto di utilizzo o stoccaggio. A seconda della destinazione finale, le pratiche CCUS si suddividono in due sottocategorie principali: Carbon Capture and Utilization (CCU) o Carbon Capture e Storage (CCS). Nel primo caso, la CO<sub>2</sub> viene catturata per essere riutilizzata direttamente (previo giusto trattamento) in altri processi industriali, oppure in altri svariati processi downstream per la produzione di molecole chimiche utili a molteplici industrie. Questi sottoprodotti possono essere finalizzati a loro volta alla realizzazione, ad esempio, di cementi sostenibili, polimeri o fertilizzanti. In altri casi, invece, la CO<sub>2</sub> può essere direttamente sfruttata per la realizzazione di carburanti sostenibili (e-fuels). Nel secondo caso, la CO<sub>2</sub> può essere stoccata permanentemente in formazioni geologiche sotterranee, come giacimenti esauriti di petrolio e gas o falde acquifere saline, sia onshore che offshore. Nonostante le pratiche CCS siano ad oggi quelle più diffuse a livello globale, l'interesse verso il CCU registra una costante crescita, sia da parte della comunità scientifica, sia da parte degli attori industriali che vedono il riutilizzo della CO<sub>2</sub> per la creazione di nuovi prodotti e materiali come potenziale diversificazione delle revenue streams in grado di rendere i progetti maggiormente sostenibili a livello economico. Il CCU può rappresentare una leva importante per la decarbonizzazione industriale, favorendo il passaggio a una low-carbon economy più efficiente e sostenibile, in cui la CO<sub>2</sub> viene reintegrata nei cicli produttivi invece di essere semplicemente smaltita tramite stoccaggio. Alla luce di queste considerazioni e data la novità tecnologica qui rappresentata dalle tecnologie CCU, l'analisi seguente contenuta in questo elaborato si concentrerà proprio sulle pratiche CCU, approfondendo le potenzialità dell'utilizzo della CO<sub>2</sub> catturata e le sue possibili applicazioni industriali, con l'obiettivo di valutare le opportunità offerte da un modello economico sempre più orientato alla circolarità e alla sostenibilità.

In secondo luogo, poiché il quadro normativo a supporto di queste tecnologie è un fattore determinante per la loro scalabilità, si è ritenuto utile analizzarne l'evoluzione. Attualmente, la maggior parte delle politiche e delle regolamentazioni si concentra quasi esclusivamente sulla cattura e/o sullo stoccaggio della CO<sub>2</sub>, trascurando l'aspetto del suo utilizzo. Per questo motivo, verrà esaminato il contesto

normativo e le politiche attualmente in vigore che favoriscono lo sviluppo di questi progetti, con un confronto tra lo scenario europeo (focus di questo studio), e quello nordamericano.

Successivamente, si cercherà di comprendere il fenomeno delle cooperative R&D applicato allo sviluppo di progetti di cattura e utilizzo della CO<sub>2</sub> e come questo possa influire sul raggiungimento degli obiettivi prefissati, attraverso una rassegna della letteratura a disposizione per determinare quali forme di collaborazione risultino più efficaci in termini di successo dei progetti.

In seguito, si procederà a presentare il quadro attuale della diffusione e del progresso dei progetti CCU; questa analisi sarà elaborata a partire da un dataset creato specificamente per questo lavoro e per future analisi, che integra diversi databases reperiti da fonti online, dai quali sono stati selezionati esclusivamente i progetti relativi allo sviluppo di tecnologie CCU, a cui sono state aggiunte tutte le informazioni necessarie per lo studio in questione.

Infine, partendo da questo database si realizzerà un'analisi empirica sui dati, in particolare un'analisi econometrica, mediante la creazione di più modelli di regressione, per comprendere meglio quali fattori influenzano maggiormente l'avanzamento tecnologico dei progetti CCU.

## **1.1 Panoramica sul processo CCUS**

In un processo CCUS, la CO<sub>2</sub> viene prima catturata dai gas di scarico, solitamente proveniente dalla combustione di combustibili fossili. Sono disponibili principalmente tre tecnologie di cattura: post-combustione, pre-combustione e ossi-combustione. Una volta catturata l'anidride carbonica questa viene purificata mediante processi di separazione al fine di ottenere un flusso di CO<sub>2</sub> altamente puro (Ghiat, I., & Al-Ansari, T., 2021). A questo punto la CO<sub>2</sub> è compressa e trasportata per essere sequestrata (storage) o per essere utilizzata (utilization). In Fig. 1 è riportato uno schema del processo CCUS dove vengono raffigurate le principali pratiche CCUS e i vari sottoprodotti che potenzialmente possono essere ottenuti dal suo utilizzo.

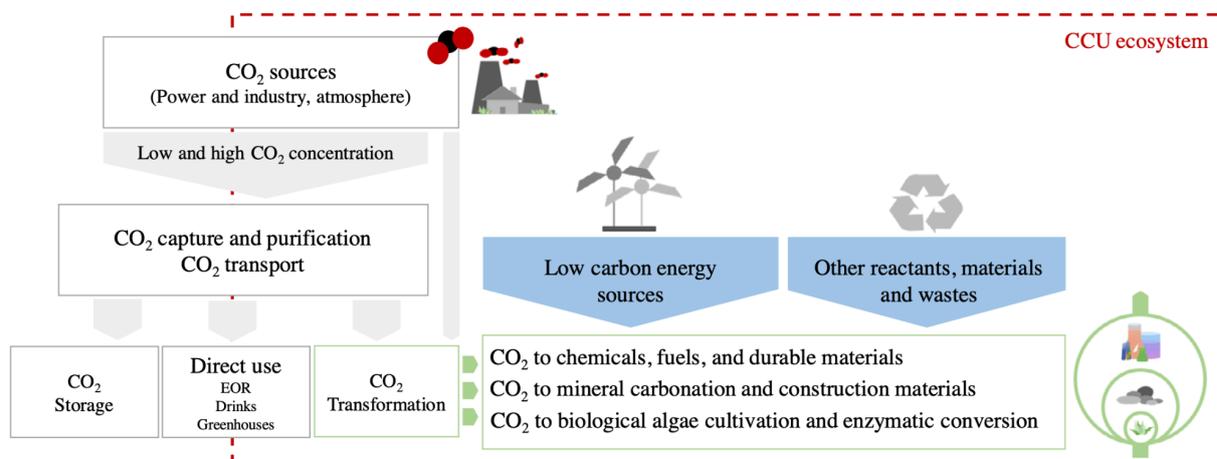


Figura 1: Ecosistema CCUS. Source: Chauvy, R., & Weireld, G. D. (2020). *CO<sub>2</sub> Utilization Technologies in Europe: A Short Review*.

## 1.2 Panoramica sulla diffusione e sullo stato di avanzamento CCUS

Viene presentata ora una panoramica sullo stato attuale e la diffusione globale delle pratiche CCUS servendosi delle analisi sull'andamento dei brevetti pubblicati, delle pubblicazioni scientifiche e sulla diffusione dei progetti a livello globale, considerati indicatori significativi per valutare il progresso tecnologico e la competitività di un determinato settore tecnologico.

### 1.2.1 Tendenze dei brevetti

L'andamento e la diffusione dei brevetti forniscono un'idea di come, dove e in che misura le imprese si stanno muovendo per proteggere le loro tecnologie innovative e possono essere interpretati come una buona stima dell'interesse generale nell'ambito dei brevetti analizzati. Sono disponibili svariati studi sullo stato e sull'andamento dell'attività brevettuale, e per questo elaborato è stata scelta un'analisi bibliometrica relativa ai brevetti CCUS svolta da Zhu, Y. et al., in quanto è quella con dati più recenti (fino al 2022). Questo studio è stato condotto su 11.915 brevetti estratti dal Derwent Innovations Index.

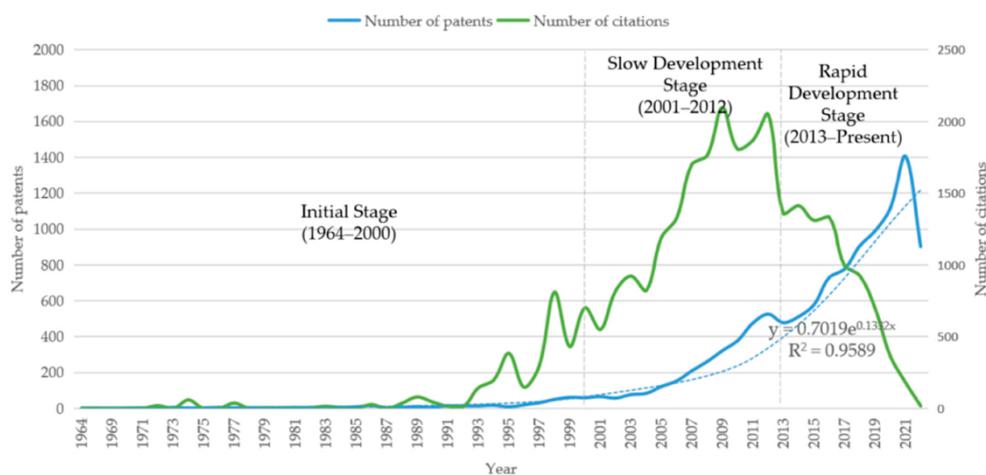


Figura 2: Tendenza annuale nel numero di brevetti 1964-2022. Source: Zhu, Y. et al. (2023), *A Patent Bibliometric Analysis of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technology*.

In Fig. 2, si può osservare la tendenza riguardante il numero di domande di brevetto e le loro citazioni nel tempo, dal 1964 al 2022. Il trend mostra un aumento nel tempo, con una crescita maggiore che inizia all'inizio degli anni 2000, con un accelerazione più significativa dal 2013 in poi. Si possono quindi distinguere tre fasi di sviluppo e diffusione delle tecnologie CCUS:

1. **1964 - 2000, fase iniziale:** il numero di domande di brevetti CCUS era limitato, con una media di soli 10 all'anno.
2. **2001 - 2012, fase di sviluppo lento:** durante questa fase, la tecnologia ha iniziato a evolversi e dal 2001 è progredita lentamente, con un incremento dei brevetti che è avvenuto di anno in anno, superando annualmente i 200 brevetti in media.
3. **2013 - Presente, fase di sviluppo rapido:** la quantità di brevetti ha avuto un'impennata e a partire dal 2013 la tecnologia CCUS ha iniziato un processo di crescita e sviluppo veloce, con una media di richieste all'anno superiore a 800 brevetti.

È importante precisare che la decrescita visibile nel grafico nel 2021 e nel 2022 è attribuibile al fatto che i dati per il 2021 e il 2022 potrebbero essere parziali, a causa del tempo necessario all'elaborazione delle domande di brevetto. Per quanto riguarda la distribuzione geografica dei brevetti CCUS, in Tab. 1 è presentato l'elenco dei dieci Stati/regioni con il maggior numero di domande di brevetto e i relativi dati statistici sui brevetti.

*Tabella 1: Primi 10 paesi per numero di brevetti e relative statistiche. Source: Zhu, Y. et al. (2023), A Patent Bibliometric Analysis of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technology.*

<b>Paese</b>	<b>TA (%)</b>	<b>TC</b>	<b>AC</b>	<b>H</b>	<b>AYS</b>
Cina	7102 (61.56%)	9852	1.39	22	1993
Stati Uniti	1739 (15.08%)	10685	6.14	49	1971
Giappone	1056 (9.15%)	3523	3.34	25	1971
Corea del Sud	562 (4.87%)	776	1.38	12	1986
Ufficio Brevetti Europeo (EPO)	173 (1.50%)	1025	6.32	16	1999
Germania	125 (1.08%)	619	5.35	1	1964
India	123 (1.07%)	46	0.37	4	1999
Regno Unito	123 (1.07%)	452	4.07	12	1975
Australia	85 (0.74%)	464	5.46	10	2001
Francia	61 (0.53%)	410	7.12	10	1984

TA (%) numero totale di brevetti e percentuale sul totale globale; TC numero totale di citazioni ricevute dai brevetti; AC citazioni medie per brevetto; H H-index (misura combinata di quantità e qualità dei brevetti); AYS anno della prima registrazione di brevetto.

I primi tre paesi per numero totale di brevetti sono Cina, Stati Uniti e Giappone che rappresentano l'85.79% sul totale globale, con la Cina che detiene il 61.58% dei brevetti totali. L'Europa si posiziona quinta dopo la Corea del Sud, con l'Ufficio Brevetti Europeo (EPO) che detiene 173 brevetti, ovvero l.5% sul totale globale. Nei primi dieci paesi ci sono quattro nazioni europee, con una percentuale di brevetti del 4.18% e un numero totale di 482 brevetti, un numero nettamente inferiore se confrontato con quelli dei primi tre paesi.

Per quanto riguarda il numero di citazioni ricevute, gli Stati Uniti sono i primi con 10685 citazioni, seguiti dalla Cina e dal Giappone. Al quarto posto si trova questa volta l'Ufficio Brevetti Europeo con 1025. Le citazioni medie per brevetto mostrano invece come l'EPO abbia 6.32 citazioni per brevetto in media, seguito dagli Stati Uniti con 6.14; la Cina, che detiene il maggior numero di brevetti ha un numero medio di citazioni di brevetto molto basso, 1.39. Essendo le citazioni tra gli indicatori adottati per attribuire un valore ai brevetti, maggiore è il numero di citazioni di un brevetto, maggiore sarà il

suo valore.<sup>2</sup> Seguendo questa logica sembrerebbe che l’EPO e gli Stati Uniti detengano i brevetti con maggior valore.

In Fig. 3 è riportato l’andamento dei brevetti nel tempo per i primi tre paesi per numero totale di brevetti. Guardando il trend per la Cina è possibile notare come fino al 2010 risulti essere in linea con Stati Uniti e Giappone e come dopo ci sia stata una crescita marcata nel numero di brevetti registrati. Questa improvvisa crescita coincide con il Chinese National People’s Congress e la Chinese Political Consultative Conference (NPC e CPPCC) avvenuta nel 2010, nelle quali la decarbonizzazione è stata citata esplicitamente per la prima volta, diventando così un argomento di rilevante interesse, venendo citata anche all’interno del Premier’s “Government Work Report”. Da questo momento in poi il numero di brevetti è iniziato ad aumentare fortemente, soprattutto grazie al supporto del governo cinese.

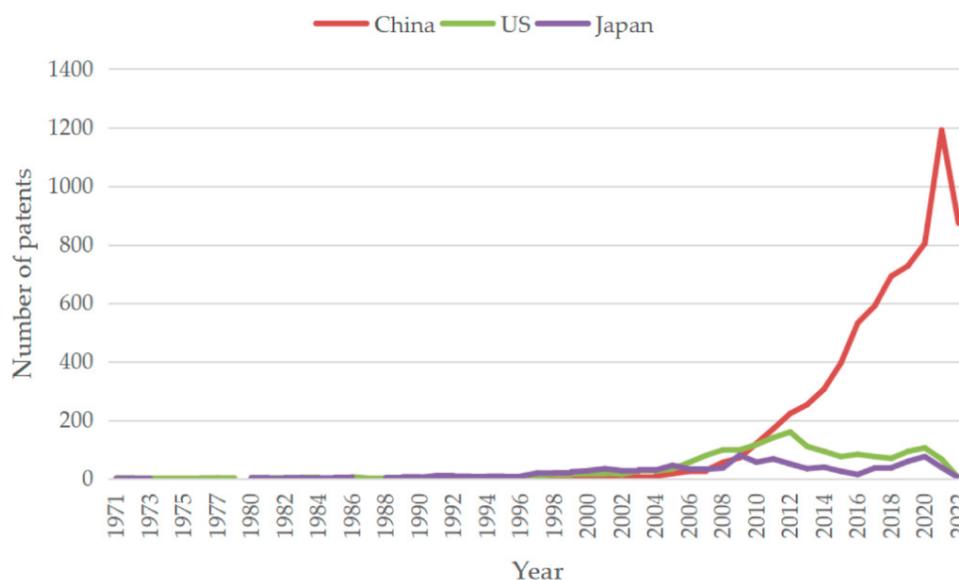


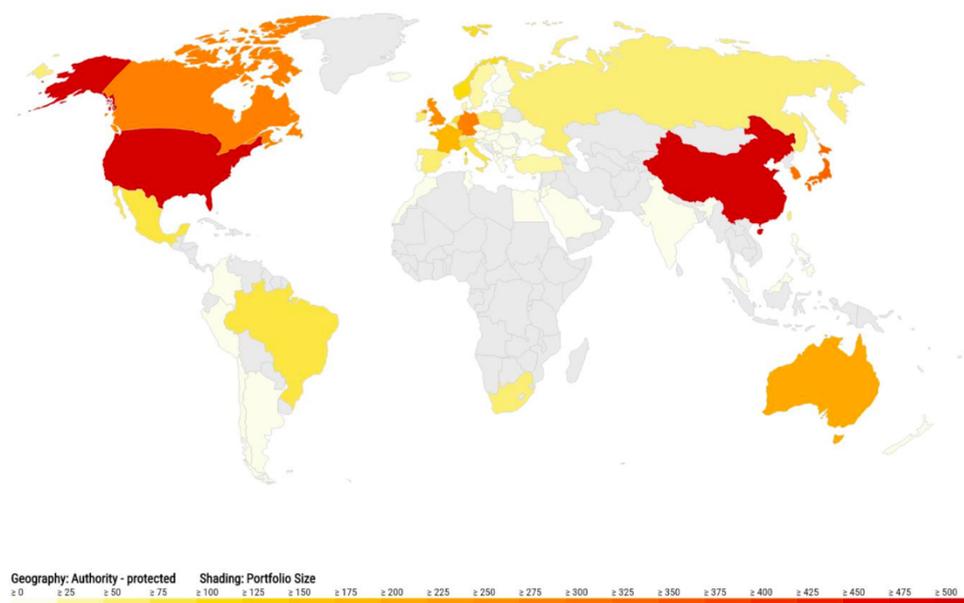
Figura 3: Tendenza del numero di brevetti per i primi tre paesi. Source: Zhu, Y. et al. (2023), *A Patent Bibliometric Analysis of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technology*.

Per avere anche un’idea visiva della distribuzione geografica dei brevetti viene presentata, in Fig. 4, una mappa globale che illustra le aree in cui i brevetti CCUS vengono protetti. Questa volta si fa

---

<sup>2</sup>Informazione presa dal portale SPRINT - Sistema Proprietà Intellettuale:  
<https://sistemaproprietaintellettuale.it/startup-e-tech-transfer/21001-le-citazioni-brevettuali.html>

riferimento ad uno studio svolto dall'Intellectual Property Office<sup>3</sup> nel 2021 e i dati analizzati coprono l'intervallo temporale 2001-2018.



*Figura 4: Mappa del mondo che mostra dove vengono protetti i brevetti CCUS, 2001-2018. Source: Intellectual Property Office, 2021. Carbon capture, usage and storage: a worldwide overview of patenting related to the UK's ten-point plan for a Green Industrial Revolution.*

Come si può notare, questo studio si allinea ai dati presentati precedentemente con la maggior parte dei brevetti protetti in Cina, Stati Uniti, mostrando un'attività notevole in Europa, Australia e Canada, nonché in Corea del Sud e Giappone.

### 1.2.2 Tendenze delle pubblicazioni scientifiche

Come l'andamento dei brevetti, anche quello delle pubblicazioni scientifiche può essere interpretato come un buon indicatore per lo sviluppo tecnologico e per l'interesse accademico. Dato il potenziale che è stato attribuito a queste tecnologie nell'aiutare a raggiungere gli obiettivi climatici e di decarbonizzazione, si riscontra un aumento nell'interesse accademico, specialmente negli ultimi anni.

---

<sup>3</sup> Intellectual Property Office, 2021. Carbon capture, usage and storage: a worldwide overview of patenting related to the UK's ten point plan for a Green Industrial Revolution.

In un rapporto redatto dalla Commissione Europea<sup>4</sup>, sullo stato dello sviluppo tecnologico e sulle principali tendenze relative alle tecnologie CCUS in Europa, viene anche approfondito l'aspetto legato ai trend delle pubblicazioni scientifiche. Anche in questo report l'analisi svolta è di tipo bibliometrico, nella quale vengono analizzate separatamente le pubblicazioni relative alle varie fasi della catena del valore CCUS, per offrire una panoramica più approfondita ed evidenziare quali paesi sono più interessati e coinvolti nella ricerca delle singole fasi. In Fig. 5 viene riportato l'andamento del numero di articoli scientifici relativi alla fase di cattura della CO<sub>2</sub> dal 2011 al 2021, per i primi 5 paesi al mondo.

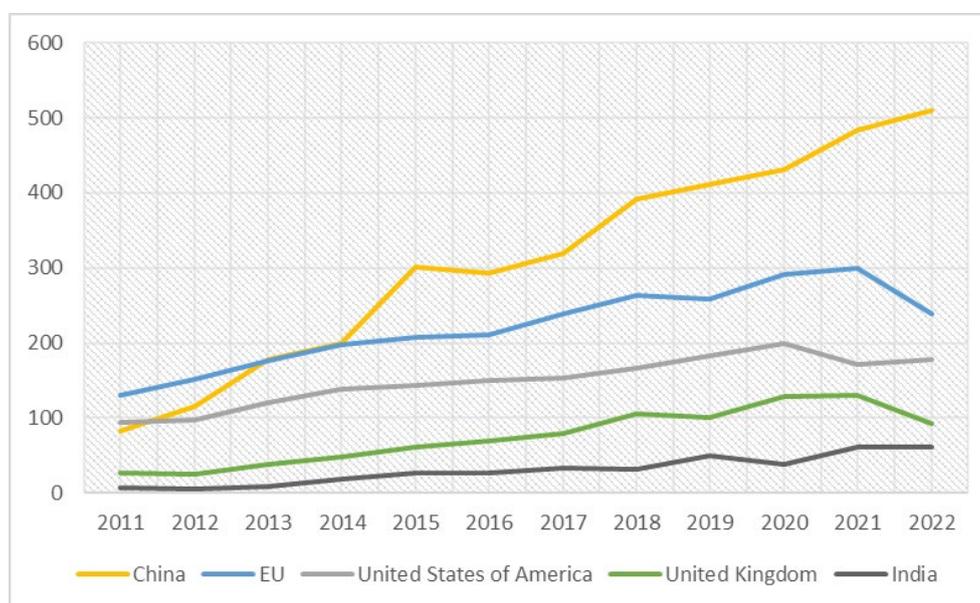


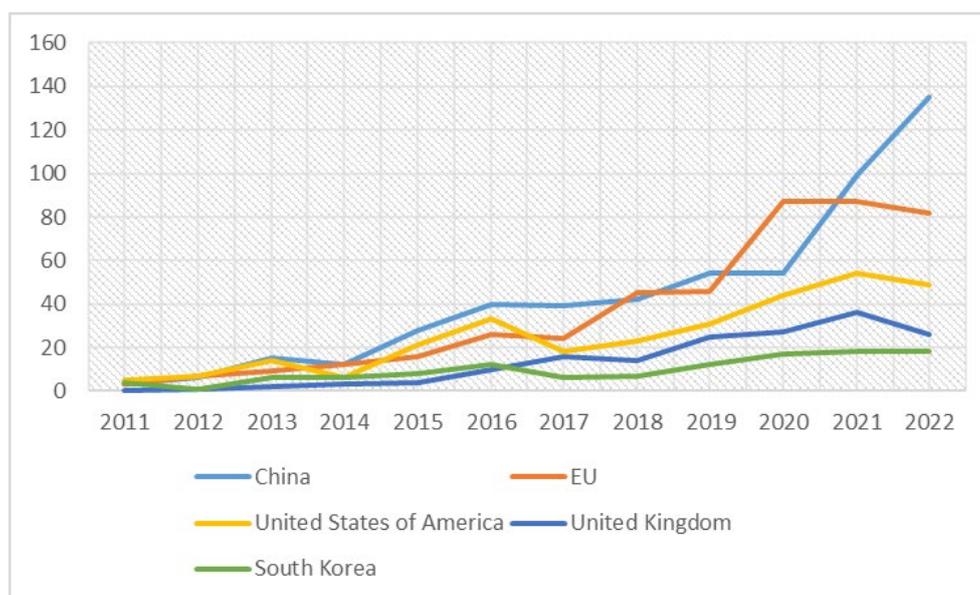
Figura 5 Numero di articoli peer-reviewed relativi alla cattura di CO<sub>2</sub> per gli anni 2011-2021 nei primi 5 paesi al mondo. Source: Clean Energy Technology Observatory: Carbon capture utilization and storage in the European Union - 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Per quanto riguarda la fase di cattura della CO<sub>2</sub> le pubblicazioni, nel decennio analizzato, sono aumentate in maniera costante, con l'Unione Europea che è stata sorpassata nel 2013 dalla Cina, che da

<sup>4</sup> Itul, A., Diaz Rincon, A., Eulaerts, O.D., Georgakaki, A., Grabowska, M., Kapetaki, Z., Ince, E., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Shtjefni, D. and Jaxa-Rozen, M., *Clean Energy Technology Observatory: Carbon capture utilisation and storage in the European Union - 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023.

quel momento in poi è stato il paese con il maggior numero di pubblicazioni. L'Europa ad oggi è seconda seguita dagli Stati Uniti, Regno Unito e India. All'interno dell'Unione Europea, il maggior numero di articoli scientifici a riguardo è stato pubblicato da Spagna, Italia e Germania.

In Fig. 6 viene riportato l'andamento del numero di articoli scientifici relativi alla fase di utilizzo della CO<sub>2</sub> dal 2011 al 2021, per i primi 5 paesi al mondo.



*Figura 6: Numero di articoli peer-reviewed relativi all'utilizzo di CO<sub>2</sub> per gli anni 2011-2021 nei primi 5 paesi al mondo. Source: Clean Energy Technology Observatory: Carbon capture utilization and storage in the European Union - 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg.*

I dati relativi alla fase di utilizzo della CO<sub>2</sub> indicano che anche in questo caso la Cina, nel 2021, detiene il maggior numero di pubblicazioni scientifiche, seguita dall'Unione Europea, gli Stati Uniti, la Gran Bretagna e la Corea del Sud. Dal 2011 al 2014 l'interesse per questo tipo di tecnologie è stato debole, con il numero di pubblicazioni che risultava essere minore di 20 per ognuno dei paesi. Dal 2014 in poi l'interesse è aumentato principalmente in Cina, Europa e Stati Uniti. La crescita più importante è avvenuta però dal 2017 in poi, con l'Unione Europea che ha superato la Cina nel periodo 2017-2020, per poi essere nuovamente sorpassata dalla Cina. Il fatto che l'Unione Europea dal 2017 si sia mossa in anticipo, nell'indagare questo tipo di tecnologie attraverso la ricerca scientifica, rispetto a Cina e Stati

Uniti, può suggerire che abbia colto prima il potenziale dell'utilizzo come strumento fondamentale alla decarbonizzazione.

Tra gli stati membri dell'Unione Europea si riscontra che nell'intervallo 2013-2021 la Germania è stata al primo posto, seguita da Spagna e Italia; dal 2022 la Spagna ha sorpassato la Germania.

Come per i brevetti, anche per le pubblicazioni scientifiche, il numero di citazioni è usato come mezzo per misurare l'impatto o l'influenza del lavoro accademico. A questo proposito, è stato trovato che le citazioni sulle ricerche pubblicate dalle organizzazioni dell'UE sono al secondo posto al mondo, dopo la Cina che è al primo posto. Per la cattura della CO<sub>2</sub> sono stati identificati 569 articoli altamente citati<sup>5</sup>, che rappresentano il 20% di quelli relativi questo argomento. La stessa situazione è stata osservata per l'utilizzo della CO<sub>2</sub> con 105 articoli altamente citati, che rappresentano anche in questo caso il 20% del totale su questo argomento. Queste tendenze mostrano come i lavori accademici a più alto valore sono prodotti principalmente dalla Cina e dagli stati membri dell'Unione Europea.

### **1.2.3 Diffusione dei progetti CCUS**

Per concludere questa panoramica sul mondo CCUS viene presentato lo stato attuale dei progetti e la loro diffusione globale. Si presenta un report pubblicato da Illich M. e Rondi L. (2023) sullo stato attuale delle iniziative di cattura, utilizzo e stoccaggio del carbonio (CCUS) in tutto il mondo, dall'inizio degli anni Novanta al 2023 (marzo)<sup>6</sup>. Questo lavoro si basa su dati contenuti nel database dei progetti IEA 2023 CCUS e per questo motivo potrebbe risultare parzialmente incompleto, perché contiene progetti che hanno una capacità di cattura superiore a 0,1 MtCO<sub>2</sub>/anno, il che significa che probabilmente al giorno d'oggi sono in corso più progetti, ma su scala inferiore. Ciononostante, questo lavoro sembra presentare una buona approssimazione di quella che è la diffusione e l'avanzamento dei progetti a livello globale, anche perché non sono presenti molti dataset completi e aggiornati sui progetti CCUS.

---

<sup>5</sup> Pubblicazioni con un Category Normalized Citation Impact (CNCI) superiore a 2.25. (Category Normalized Citation Impact (CNCI) è calcolato dividendo numero di citazioni per il tasso di citazione previsto per documenti con lo stesso tipo di documento, anno di pubblicazione e area tematica).

<sup>6</sup> Illich, M., & Rondi, L. (2023). Carbon Capture Use and Storage Projects (1990-2023).

Nel marzo 2023 lo stato dei progetti vedeva 431 progetti pianificati, 75 in costruzione e 58 operativi in tutto il mondo. In Fig. 7 si può osservare l'andamento dei progetti CCUS dal 1990 al 2023. I progetti di CCUS hanno preso slancio tra il 2019 e il 2021; da quel momento in poi si è riscontrato un forte aumento nel numero di nuovi progetti annunciati, ma con il un numero di progetti effettivamente operativi che non ha seguito lo stesso ritmo. Il tempo medio stimato tra l'annuncio di un progetto e la sua operatività è di 6.4 anni secondo gli autori e questo, combinato con il tasso nettamente inferiore di nuovi progetti operativi, sembra suggerire un divario tra la progettazione/pianificazione e l'effettiva implementazione. Gli autori ipotizzano che la causa di tale discrepanza tra i progetti annunciati e quelli operativi sia dovuta a diversi fattori come il quadro politico frammentato e non uniforme a livello internazionale, la difficoltà nell'accedere ai fondi necessari allo sviluppo di progetti molto costosi, i lunghi processi burocratici per ottenere le autorizzazioni necessarie e le ancora acerbe politiche ambientali a supporto della decarbonizzazione.

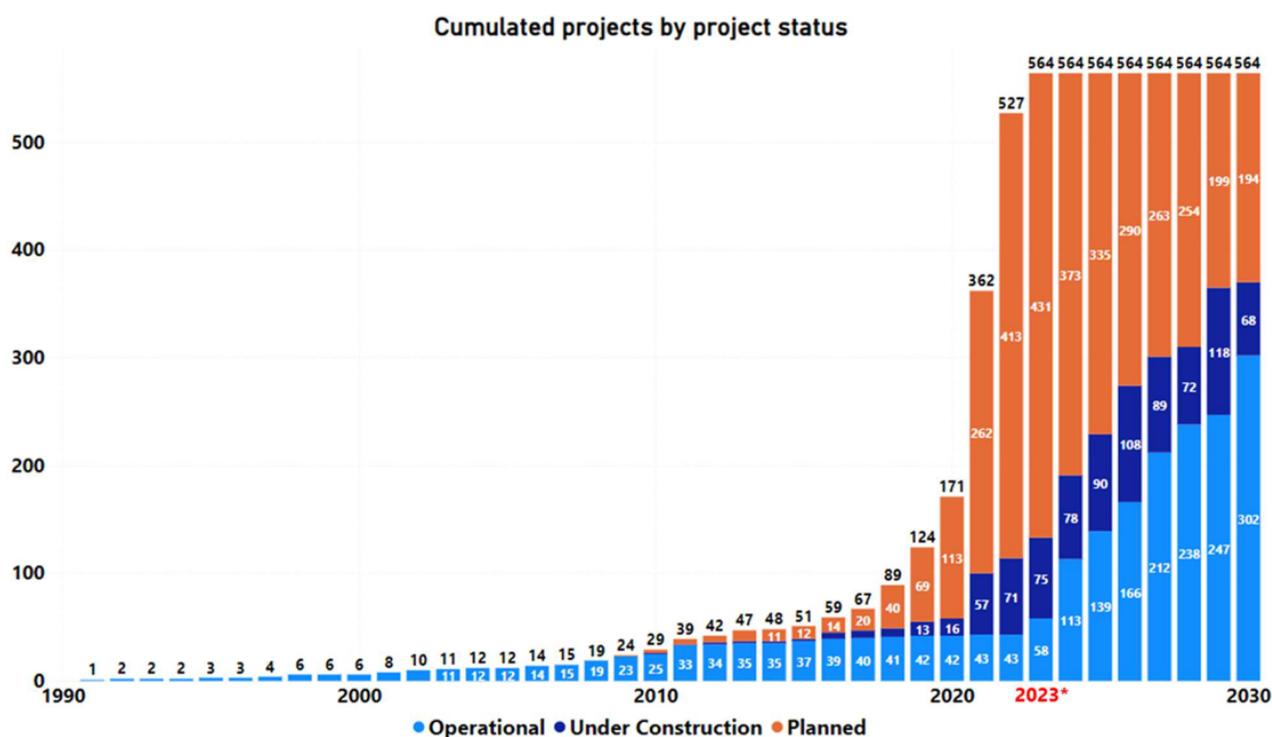


Figura 7: Progetti cumulati per evoluzione dello stato nel tempo. Source: Ilich, M.; Rondi, L. (2023). *Carbon Capture Use and Storage Projects (1990-2023)*.

I dati del grafico presenti in Fig. 7 sono aggiornati fino al 2023, da quella data in poi mostrano delle simulazioni fino al 2030. Queste suggeriscono una continua crescita nei progetti annunciati, anche grazie agli sforzi pubblici nel finanziare tali progetti, mentre il numero di progetti operativi crescerà ad un tasso nettamente inferiore, in linea con quanto detto prima, a causa delle difficoltà nel superare la fase di FID.

In Fig. 8 è invece possibile osservare la diffusione geografica in base allo stato del progetto. La maggior concentrazione di progetti CCUS è in Nord America ed Europa, circa l'83% di tutti i progetti. Guardando allo stato dei progetti si può però notare come quelli operativi sia nettamente inferiore in Europa rispetto al Nord America, evidenziando così come gli Stati Uniti siano i primi ad essersi mossi sia a livello tecnologico che industriale grazie ai loro, generalmente, maggiori investimenti in R&D. Tuttavia, la maggior parte dei progetti operativi in Nord America sono relativi all'EOR nel contesto del gas e del petrolio, tecnologie ormai fortemente consolidate.

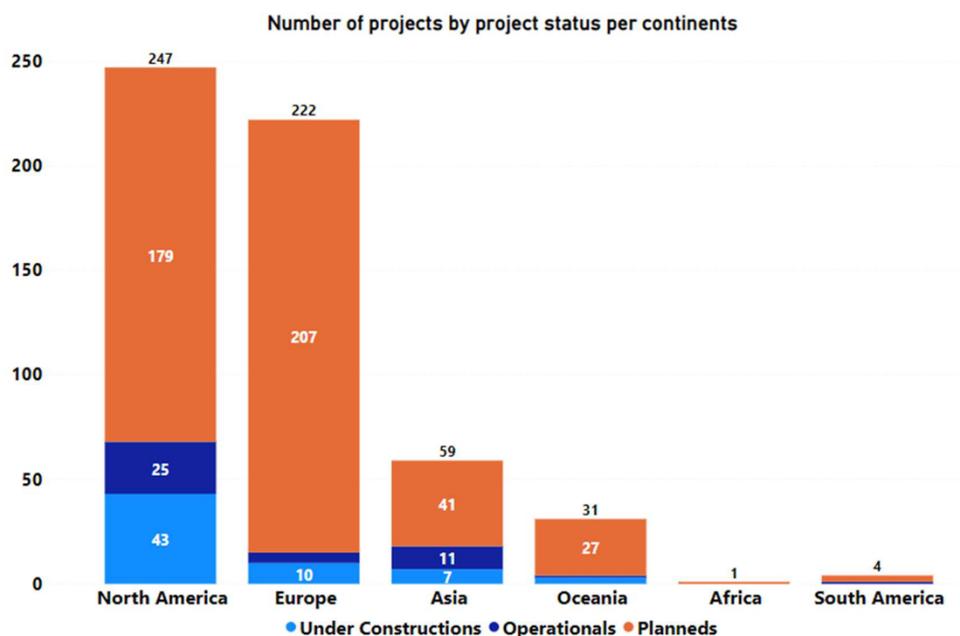


Figura 8: Numero di progetti CCUS per stato del progetto per macroarea geografica. Source: Illich, M.; Rondi, L. (2023). *Carbon Capture Use and Storage Projects (1990-2023)*.

È interessante osservare come per i brevetti e per la ricerca accademica la Cina stia dominando il panorama globale, mentre per i progetti sembra essere particolarmente indietro rispetto al Nord America

e all'Europa. Questo però, come suggerito da Illich M. e Rondi L. (2023), potrebbe essere dovuto ad una sottostima da parte del IEA nel raccogliere i dati presenti nel database. Questo problema potrebbe essere principalmente legato al contrasto politico tra il blocco occidentale e quello asiatico. Infatti, nonostante l'IEA sia un'organizzazione intergovernativa, questa ha sede a Parigi e potrebbe aver quindi avuto difficoltà nell'accedere a tutte le informazioni sui progetti nel blocco asiatico.

Per concludere, possiamo riassumere brevemente quanto analizzato in questi primi paragrafi evidenziando un crescente interesse per le tecnologie e per la ricerca dal 2010 in poi, per poi osservare una conversione di queste conoscenze in progetti effettivi dal 2019 in avanti.

### **1.3 Rassegna della letteratura sullo stato attuale dell'utilizzo di CO<sub>2</sub> - Principali pathways di utilizzo della CO<sub>2</sub>**

Andando ad analizzare la letteratura scientifica disponibile riguardante questo argomento si è potuto constatare che vengono riconosciute principalmente cinque macro-categorie di utilizzo della CO<sub>2</sub>: enhanced oil recovery (recupero avanzato del petrolio), conversione chimica (es. carburanti, chemical feedstocks), mineral carbonation (es. materiali da costruzione), conversione biologica (es. coltivazione biologica di alghe) e utilizzo diretto (es. carbonatazione delle bevande, conservazione alimentare). Nei prossimi paragrafi verranno presentati i principali percorsi di conversione e utilizzo della CO<sub>2</sub>, accompagnati da approfondimenti tecnico-economici, tra cui il Technology Readiness Level (TRL), i costi coinvolti in ciascun percorso e le principali industrie a cui sono rivolte queste tecnologie.

#### **1.3.1 Enhanced Oil Recovery**

Questo metodo di utilizzo della CO<sub>2</sub> viene presentato per primo dato che il suo avanzamento tecnologico e il suo impiego ha già raggiunto la fase commerciale da molto tempo (soprattutto negli Stati Uniti). Di fatto, fa parte della più ampia categoria di utilizzo diretto della CO<sub>2</sub>, ma viene discussa separatamente a causa della sua elevata importanza e delle grandi dimensioni del mercato.

L'Enhanced Oil Recovery (EOR) (recupero avanzato del petrolio), è una tecnica che serve ad aumentare l'efficacia dell'estrazione del petrolio dai giacimenti petroliferi rispetto ai metodi convenzionali. Quando il petrolio greggio non può più essere estratto mediante il recupero primario (che sfrutta unicamente la pressione propria del giacimento per convogliare l'olio in superficie) e secondario (talvolta applicato contemporaneamente al primario, che integra l'energia del giacimento in fase di esaurimento, tramite l'immissione di un fluido) dai giacimenti petroliferi, allora viene utilizzata il recupero terziario, ovvero l'EOR. Una delle tecniche principali per l'EOR prevede proprio l'iniezione di CO<sub>2</sub> direttamente nei serbatoi di petrolio per facilitare l'estrazione dell'olio e viene applicato come soluzione per le riserve di petrolio che non possono essere estratte attraverso il processo convenzionale. (Zhang, Z., Pan, S.-Y., Li, H., Cai, J., Olabi, A. G., Anthony, E. J., & Manović, V., 2020), (Treccani, 2013), (Ghiat, I., & Al-Ansari, T., 2021).

Questa applicazione fa un uso abbondante della CO<sub>2</sub> per aumentare la resa del processo di estrazione petrolifera, principalmente a causa della sua grande disponibilità e del suo costo relativamente basso. Consente un recupero del 30-60% rispetto a un'estrazione del 20-40 % ottenuta tramite un processo di recupero primario e secondario convenzionale. Questo processo è stato utilizzato dall'industria petrolifera per 40 anni e rappresenta, ad oggi, uno dei mercati principali per l'utilizzo della CO<sub>2</sub> catturata (secondo solo alla produzione di Urea).

In Fig. 9 si possono osservare il numero di progetti a livello globale CO<sub>2</sub>-EOR dal 1971 al 2017.

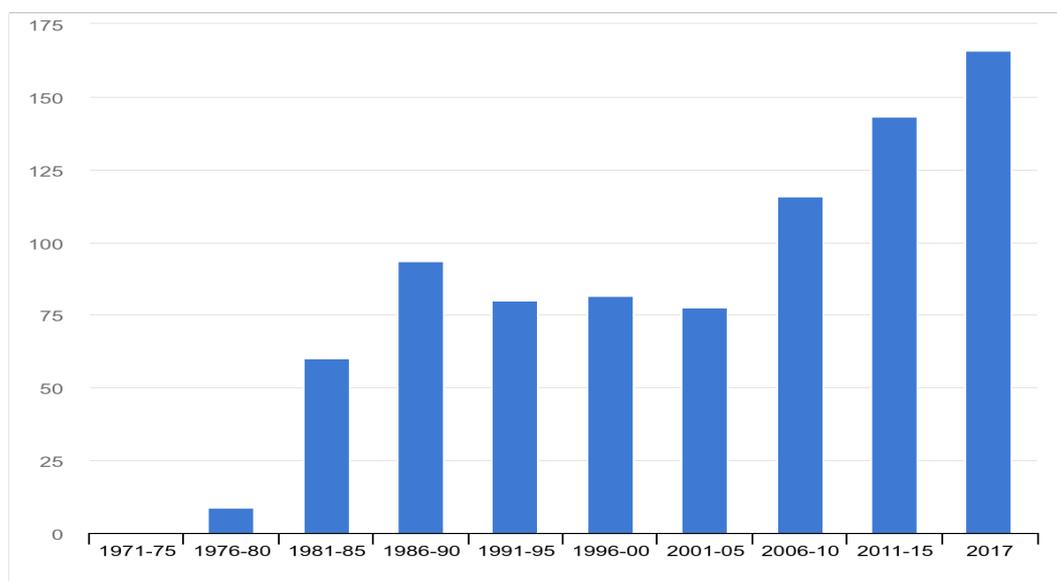


Figura 9: Numero di progetti EOR in funzione a livello globale, 1971-2017. Source: IEA, Number of EOR projects in operation globally, 1971-2017, IEA.

Dato l'elevato numero di applicazioni industriali su larga scala sviluppati negli ultimi anni, lo stato di sviluppo e diffusione di questa tecnologia è avanzato molto posizionandola al livello più alto della scala TRL (9)<sup>8</sup>.

La prospettiva di utilizzo della CO<sub>2</sub>-EOR è molto interessante soprattutto come opzione a breve termine. Infatti, sembra che oltre il 90% dei giacimenti petroliferi presenti al mondo potrebbe essere adatto allo sfruttamento di questa tecnologia, con una elevata capacità inutilizzata di iniezione per il futuro, con una capacità di iniezione teorica cumulativa di CO<sub>2</sub> nell'intervallo di 70-140 Gt (Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J. R., Carter, E. A., Fuss, S., Dowell, N. M., Minx, J. C., Smith, P., & Williams, C. K., 2019) (Dowell, N. M., Fennell, P. S., Shah, N., & Maitland, G. C., 2017).

<sup>7</sup> IEA, Number of EOR projects in operation globally, 1971-2017, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/number-of-eor-projects-in-operation-globally-1971-2017>, Licence: CC BY 4.0

<sup>8</sup> Dziejarski, B., Krzyżyńska, R., & Andersson, K. (2023); Report UNECE, Technology Brief - Carbon Capture, Use and Storage (CCUS) (2021); Clean Energy Technology Observatory: Carbon capture utilization and storage in the European Union - 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023.

Durante il processo di CO<sub>2</sub>-EOR vengono iniettati tra i 300 kg di CO<sub>2</sub> e 600 kg di CO<sub>2</sub> per ogni barile di petrolio (42 galloni USA ovvero a circa 158,99 litri, il che significa circa 140 kg di greggio<sup>9</sup>) prodotto negli Stati Uniti. Questo significa che servono circa 2,14 - 4,28 ton di CO<sub>2</sub> per produrre una tonnellata di petrolio<sup>10</sup>. Bisogna tenere conto che in questo processo la CO<sub>2</sub> viene utilizzata come materia prima, che ha un costo associato, e quindi chi la utilizza cerca di minimizzare l'utilizzo della CO<sub>2</sub> e quindi lo stoccaggio di essa. Il costo della CO<sub>2</sub> per questo tipo di processo negli stati uniti si aggira intorno ai 20€/tCO<sub>2</sub><sup>11</sup>, tuttavia, il prezzo che un operatore è disposto a pagare per la CO<sub>2</sub> dipende principalmente dal prezzo del petrolio, che, in alcuni periodi, può essere volatile. Un intervallo abbastanza realistico e non pessimistico del costo potrebbe essere tra i 15€ e i 35€ per tonnellata di CO<sub>2</sub>.

Nonostante sia una delle modalità di utilizzo più sviluppate e tecnologicamente avanzate, sembrano essere diffuse le preoccupazioni all'interno delle pubblicazioni analizzate sull'efficacia di questa tecnica in termini di mitigazione delle emissioni di CO<sub>2</sub>. Bisogna infatti chiedersi se l'utilizzo della EOR porti o meno ad un beneficio climatico; questo lo si può capire solamente guardando il ciclo di vita completo del processo di cattura e utilizzo della CO<sub>2</sub>. In sintesi, la rimozione netta di CO<sub>2</sub> non è così semplice da ottenere in un processo EOR. Per avere rimozioni nette di CO<sub>2</sub>, questa dovrebbe essere catturata direttamente dall'atmosfera e più anidride carbonica dovrebbe essere iniettata rispetto a quanta ne viene prodotta dall'utilizzo del petrolio estratto (Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J. R., Carter, E. A., Fuss, S., Dowell, N. M., Minx, J. C., Smith, P., & Williams, C. K., 2019).

L'idea che il petrolio possa essere "carbon-negative" è allettante. Potrebbe aiutare a ridurre le emissioni da settori difficili da decarbonizzare che dipendono fortemente da combustibili liquidi ad alta densità

---

9

[https://it.wikipedia.org/wiki/Barile\\_\(unit%C3%A0\\_di\\_misura\)#:~:text=Un%20barile%20corrisponde%20a%2042,140%20kg%20\(310%20libbre\).](https://it.wikipedia.org/wiki/Barile_(unit%C3%A0_di_misura)#:~:text=Un%20barile%20corrisponde%20a%2042,140%20kg%20(310%20libbre).)

<sup>10</sup> IEA (2019), Can CO<sub>2</sub>-EOR really provide carbon-negative oil?, IEA, Paris <https://www.iea.org/commentaries/can-co2-eor-really-provide-carbon-negative-oil>

<sup>11</sup> Itul, A., Diaz Rincon, A., Eulaerts, O.D., Georgakaki, A., Grabowska, M., Kapetaki, Z., Ince, E., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Shtjefni, D. and Jaxa-Rozen, M., Clean Energy Technology Observatory: Carbon capture utilisation and storage in the European Union - 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/882666, JRC134999.

energetica. Tuttavia, la logica del petrolio “carbon-negative” dipende fortemente dai confini dell'analisi e dall'origine della CO<sub>2</sub>.

In Tab. 2 sono riassunti i principali indicatori tecnologici ed economici dell'Enhanced Oil Recovery.

*Tabella 2: Indicatori importanti per CCU EOR*

<b>Indicatore</b>	<b>Valore</b>
TRL	9
Costo CO <sub>2</sub> (€/t CO <sub>2</sub> )	15 - 35
Prezzo del prodotto (€/t Petrolio)	448,2 <sup>12</sup>
Utilizzo netto di CO <sub>2</sub> (t/t Petrolio)	2,4 - 4,8
Potenziale capacità di utilizzo di CO <sub>2</sub> (Mt/anno)	150 - 200
Principali industrie interessate	Oil & Gas

### **1.3.2 Conversione chimica, carburanti e materiali durevoli**

La conversione del carbonio in sostanze chimiche è un altro importante percorso di utilizzo, la CO<sub>2</sub> catturata può essere convertita in vari prodotti chimici e combustibili sintetici che possono sostituire gli attuali componenti chimici di partenza nelle industrie chimiche, farmaceutiche e polimeriche.

In questo ambito ci sono diverse applicazioni, alcune più tecnologicamente mature altre più acerbe, ma tutte potenzialmente interessanti per l'utilizzo della CO<sub>2</sub>. I principali prodotti che possono essere derivati da tale conversione sono: urea, combustibili (metano, metanolo, benzina e carburanti per aviazione), materiali a base di carbonio (polimeri, fibre di carbonio, compositi e sostanze chimiche pregiate). Questa modalità di utilizzo rappresenta una grande opportunità di sequestro per la CO<sub>2</sub> catturata, con una capacità stimata di circa 500 Mt/anno (Ghiat, I., & Al-Ansari, T., 2021).

---

<sup>12</sup> Prezzo calcolato il 30/10/2024: quotazione di 68\$/barile, Cambio Euro/Dollaro 1,08. Quotazione di 62,75 €/barile.

### ***Produzione di Urea***

La produzione di urea è, ad oggi, la conversione chimica più diffusa e viene utilizzata principalmente come fertilizzante, ma viene impiegata anche in altre applicazioni, tra cui la produzione di alcuni farmaci, sostanze chimiche fini e inorganiche e nella sintesi polimerica. L'urea è un prodotto derivato dall'ammoniaca formato dalla reazione dell'ammoniaca con la CO<sub>2</sub> ad alta pressione. Questa tecnologia è attualmente matura e ampiamente implementata sul mercato, trovandosi pienamente nella fase di commercializzazione, TRL (9).

La produzione globale di urea si stima che abbia superato i 195,5 Mt nel 2023, in crescita del 6% rispetto al 2022, mentre l'attuale prezzo di mercato (ottobre 2024) per l'urea è di circa 304 €/t.

Dal punto di vista di un'impresa operante nella sintesi di urea è interessante quanto analizzato da Edrisi, A., Mansoori, Z., & Dabir, B. (2016)<sup>13</sup> che hanno condotto uno studio tecnico-economico su un impianto di sintesi dell'urea usando un processo di *chemical looping* (metodo di cattura della CO<sub>2</sub> in pre-combustione) confrontandolo con un impianto tradizionale, un investimento in questo tipo di impianto risulta essere economicamente vantaggioso rispetto ad uno in un impianto tradizionale. In Tab. 3 è riportato il confronto economico tra l'impianto proposto e quello convenzionale.

*Tabella 3: Confronto economico tra l'impianto proposto e quello convenzionale.*

Tipo di impianto	Convenzionale	Proposto (chemical looping)
NPV all'avvio (Milioni \$)	-53.24	-34.95
IRR	15	28.91
Costo totale del progetto	180.46	138.56

Il risultato è presentato per un tasso di produzione di urea pari a 0,5 Mton/anno. Si presume che la durata del progetto sia di 25 anni con 24 ore lavorative al giorno e 330 giorni lavorativi all'anno.

<sup>13</sup> Edrisi, A., Mansoori, Z., & Dabir, B. (2016). Urea synthesis using chemical looping process—Techno-economic evaluation of a novel plant configuration for a green production. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 44, 42-51.

Lo studio evidenzia che per costruire un impianto che produce 0,5 Mt/anno di urea, l'investimento iniziale in un impianto che sfrutta chemical looping è inferiore rispetto ad un impianto tradizionale, così come è inferiore il costo totale di progetto, mentre l'IRR è quasi il doppio per l'impianto con chemical looping rispetto all'impianto tradizionale. Inoltre, l'impianto con chemical looping presenta un periodo di payout accettabile, che varia da 4 ad 8 anni in base allo scenario analizzato. Per un impianto che produce 1,5 Mt/anno di urea, i CAPEX e gli OPEX stimati si aggirano intorno ai 348 M\$ e 265 M\$/anno, rispettivamente. Data la durata stimata del progetto di 25 anni, i capex all'anno sono di 9,28 M\$/anno. Questo processo è dal punto di vista ambientale vantaggioso, in quanto utilizza la CO<sub>2</sub> direttamente come materia prima chimica, con una conversione relativamente elevata, intorno a 0,735-0,75 tonnellate di CO<sub>2</sub> per tonnellata di urea prodotta. In Tab. 4 sono riassunti i principali indicatori tecnologici ed economici per la produzione di urea.

*Tabella 4: Indicatori importanti per CCU produzione di urea.*

Indicatore	Valore
TRL	9
Prezzo del prodotto (€/t urea)	304
CAPEX totali (€/t urea)	8,6
OPEX totali (€/t urea)	163,6
Utilizzo netto di CO <sub>2</sub> (t/t urea)	0,74
Potenziale capacità di utilizzo di CO <sub>2</sub> (Mt/anno)	145
Principali industrie interessate	Fertilizzanti, Chimica

### ***Produzione di carburanti***

Nella conversione chimica per la produzione di combustibili come metano, metanolo, benzina e carburanti per aviazione il processo prevede l'utilizzo della CO<sub>2</sub> in combinazione con l'idrogeno (la produzione di H<sub>2</sub> richiede molta energia) e produce un combustibile contenente carbonio che è più facile da gestire e utilizzare rispetto all'idrogeno puro. La maggior parte dei combustibili viene utilizzata nel settore dei trasporti, mentre alcuni (ad esempio il metano) possono essere utilizzati anche nell'industria,

nel riscaldamento e nella produzione di energia. Il processo di sintesi *Fischer-Tropsch* (FT), è ad oggi quello più diffuso per la produzione di carburanti sintetici liquidi come e-diesel, e-benzina ed e-kerosene. Questo processo converte il syngas (una miscela di monossido di carbonio e idrogeno), attraverso dei catalizzatori, in una miscela prevalentemente composta da idrocarburi. Questo processo di sintesi è completamente commercializzato e implementato su scala globale. Per questo motivo l'avanzamento tecnologico è un TRL 9; tuttavia, la maggior parte dei progetti operativi utilizza materie prime e processi non rinnovabili, traducendosi in un'elevata emissione di CO<sub>2</sub>. Per poter implementare dei progetti che sfruttano la tecnologia FT in maniera sostenibile, è necessario che vengano integrati dei processi di conversione rinnovabili della CO<sub>2</sub> in syngas, come ad esempio la reazione di *reverse water-gas shift* (RWGS), che hanno un avanzamento tecnologico ben inferiore. Per questo motivo questa applicazione rientra in quelle tecnologie che non hanno ancora un avanzamento tecnologico sufficiente alla completa commercializzazione andando a posizionarsi nell'intervallo 5 - 9 della scala TRL. Nonostante ciò, numerose aziende hanno già realizzato impianti pilota e dimostrativi che producono metano e metanolo a partire da CO<sub>2</sub> e idrogeno, convertendo centinaia/migliaia di tonnellate di CO<sub>2</sub> all'anno (IEA, 2019). Ad oggi, i carburanti prodotti utilizzando il processo di sintesi FT sono ancora troppo costosi e questo influisce in maniera netta sulla diffusione di progetti di questo tipo. In Tab. 5, sono riportati i risultati di due studi tecnico economici che evidenziano proprio questo aspetto.

*Tabella 5: Confronto costi di produzione e-fuels e combustibili fossili.*

Costo di produzione	Capacità produttiva	Tipo di combustibile	Anno dello studio	Costo di produzione combustibile fossile
<sup>14</sup> 2055 €/tonnellata	100 t/giorno	Diesel	2022	904 €/tonnellata
<sup>15</sup> 1150 €/tonnellata	140 t/giorno	SAF	2022	600 €/tonnellata

<sup>14</sup> Choe, C., Lee, B., & Lim, H. (2022). Sustainable and carbon-neutral green diesel synthesis with thermochemical and electrochemical approach: Techno-economic and environmental assessments. *Energy Conversion and Management*, 254, 115242. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115242>

<sup>15</sup> Collis, J., Duch, K., & Schomäcker, R. (2022). Techno-economic assessment of jet fuel production using the Fischer-Tropsch process from steel mill gas. *Frontiers in Energy Research*, 10, 1049229.

Nel primo dei due studi viene evidenziato come i costi siano dominati principalmente dalla produzione (o dall'acquisto) dell'idrogeno, che può raggiungere fino al 60% del costo totale. È necessario far presente che il costo di produzione è fortemente correlato a fattori esterni, come il costo dell'elettricità o ad aspetti politici (es. guerra che fa aumentare il prezzo del petrolio) e normativi (es. carbon tax), che potrebbero influenzare la fattibilità economica.

L'IEA sostiene, in base ai progetti di conversione in carburanti sintetici da loro monitorati, che entro il 2030 questi impianti su larga scala potrebbero catturare e utilizzare circa 8 Mt CO<sub>2</sub>, di cui circa 4 Mt verrebbero catturate dall'aria o da fonti biogeniche. Questa capacità di cattura ed utilizzo non sarebbe in grado di soddisfare gli obiettivi fissati nello Scenario NZE by 2050 che richiedono una cattura e utilizzo di circa 12 Mt CO<sub>2</sub> entro il 2030 (IEA, 2024<sup>77</sup>). Questo evidenzia come questo approccio per la conversione della CO<sub>2</sub> sia in ritardo rispetto a quanto necessario per rispettare gli obiettivi fissati; ciononostante, l'elevato tasso di utilizzo di CO<sub>2</sub>, che si attesta intorno alle 2,6 tonnellate per tonnellata di prodotto finale ottenuto dalla sintesi FT, rappresenta un'importante opportunità di mitigazione dei gas serra. In Tab. 6 sono riassunti i principali indicatori tecnologici ed economici per la produzione di carburanti sintetici.

*Tabella 6: Indicatori importanti per CCU produzione carburanti sintetici*

Indicatore	Valore
TRL	5-9
Prezzo del prodotto (€/t combustibile liquido)	Consultare Tab. 4
Utilizzo netto di CO <sub>2</sub> (t/t combustibile liquido)	2,6
Potenziabile capacità di utilizzo di CO <sub>2</sub> (Mt/anno)	8
Principali industrie interessate	Oil & Gas, Trasporti, Chimica

### ***Materiali a base di carbonio - polimeri***

Per quanto riguarda gli altri percorsi che utilizzano la CO<sub>2</sub> come materia prima per produrre materiali a base di carbonio (polimeri, fibre di carbonio, compositi e sostanze chimiche pregiate), la produzione di polimeri è la più interessante, in quanto rispetto alle applicazioni discusse precedentemente, non

necessita di un input energetico elevato per il processo di conversione (meno dipendenza dal prezzo dell'energia). Attualmente, la capacità produttiva di polimeri a base di CO<sub>2</sub> è limitata rispetto a quella dell'industria petrolchimica, ma esistono già un certo numero di applicazioni di successo, come *Asahi Kasei* (Tokyo, Giappone) con la produzione di policarbonati aromatici (PC), la statunitense *LanzaTech* (Skokie, IL) che recentemente ha stretto una partnership con importanti aziende, come L'Oréal e Danone (Francia), On (Svizzera), Lululemon (Canada) e Zara (Spagna), con l'obiettivo di utilizzare microbi per convertire la CO<sub>2</sub> catturata dai processi industriali in polimeri utili alla produzione di articoli da imballaggio, scarpe e tessuti; altri progetti si stanno sviluppando in tutto il mondo, ma l'avanzamento tecnologico non ha ancora raggiunto un livello tale da permettere la commercializzazione di queste tecnologie di conversione, che sembrano invece proporre impianti pilota (TRL 6) o nella fase di dimostrazione (TRL 7) (Magni, A., 2023, November 30).

### **1.3.3 Mineralizzazione della CO<sub>2</sub> e materiali da costruzione derivati dalla CO<sub>2</sub>**

La mineralizzazione della CO<sub>2</sub> è un altro percorso interessante per l'utilizzo a lungo termine della CO<sub>2</sub>. È una tecnologia utile allo stoccaggio permanente della CO<sub>2</sub> all'interno di minerali, utilizzata sia per l'iniezione e lo stoccaggio di CO<sub>2</sub> nelle formazioni geologiche (mineralizzazione in situ) sia per la produzione di materiali da costruzione (mineralizzazione ex situ), come ad esempio il calcestruzzo.

Per quanto riguarda la mineralizzazione della CO<sub>2</sub> *ex situ* si possono distinguere due principali approcci: utilizzo della CO<sub>2</sub> come materia prima nel calcestruzzo e il processo di *concrete curing* (cura del calcestruzzo). Nel primo caso l'anidride carbonica catturata viene utilizzata direttamente come materia prima per produrre aggregati alternativi da utilizzare nel calcestruzzo, in sostituzione di parte dei materiali attuali. Può essere impiegata come materia prima per produrre aggregati solidi, e può essere utilizzata nella produzione di cemento. La letteratura assegna a questo tipo di tecnologia l'intervallo della scala TRL 4-8, in quanto ci sono dei progetti che vanno dalla fase sperimentale, fase pilota e arrivano alla fase pre-commerciale.

Nel secondo caso invece l'anidride carbonica viene utilizzata per sostituire l'acqua durante la miscelazione dei componenti (calcestruzzo), questo processo è chiamato *concrete curing*. Per questo tipo di tecnologia l'avanzamento tecnologico è maggiore e si riscontra un livello TRL 7-8.

Le reazioni di carbonatazione hanno tassi di utilizzo di CO<sub>2</sub>, che variano tra lo 0,02% e il 3% in peso di calcestruzzo, molto più bassi rispetto a quelli presentati in precedenza per gli altri percorsi di conversione, ma hanno come vantaggio lo stoccaggio a lungo termine del carbonio sotto forma di carbonato (IEA, 2019).

I principali motivi per cui un'azienda dovrebbe utilizzare la CO<sub>2</sub> è quella di produrre calcestruzzo con prestazioni più elevate e un'impronta di CO<sub>2</sub> inferiore rispetto ai materiali da costruzione convenzionali. Altri potenziali vantaggi sono un minor consumo di acqua e una maggiore resistenza del calcestruzzo rispetto alle pratiche e ai prodotti convenzionali. In Tab. 7 sono riassunti i principali indicatori tecnologici ed economici per la produzione di materiali da costruzione.

*Tabella 7: Indicatori importanti per CCU Mineral Carbonation.*

Indicatore	Valore
TRL	4-8
Utilizzo netto di CO <sub>2</sub> (t/t di materiale)	0,0002-0,03
Potenziale capacità di utilizzo di CO <sub>2</sub> (Mt/anno)	100+ <sup>16</sup>
Principali industrie interessate	Produzione di materiali da costruzione, cemento e calcestruzzo

### 1.3.4 Conversione biologica e coltivazione di alghe

La conversione biologica di CO<sub>2</sub> è un altro percorso di utilizzo con un importante potenziale di sequestro di anidride carbonica. Infatti, il maggiore scambio di CO<sub>2</sub> tra l'atmosfera e la terra si ottiene attraverso la fotosintesi, dove vengono scambiati circa 440 Gt/anno di CO<sub>2</sub> (Ghiat, I., & Al-Ansari, T., 2021). Questa metodologia di utilizzo prevede che attraverso processi naturali di fotosintesi, diverse specie di alghe possono essere utilizzate per assorbire e convertire la CO<sub>2</sub> in una varietà di composti,

<sup>16</sup> IEA (2019), Putting CO<sub>2</sub> to Use, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>, Licence: CC BY 4.0

tra cui diversi tipi di idrocarburi, lipidi e altri oli complessi, che sono utilizzati in diverse applicazioni, dalla produzione di biodiesel ai mangimi per animali.

Queste microalghe possono essere coltivate in sistemi di crescita sia aperti che chiusi (controllati). Nel primo caso le alghe vengono coltivate all'interno di lagune o stagni e le condizioni di crescita sono meno controllate. Nel secondo caso invece le alghe vengono fatte crescere all'interno di fotobioreattori che richiedono condizioni di crescita altamente controllate (principale limite di questa applicazione).

La crescita di queste alghe è strettamente dipendente anche da molti altri fattori quali luce (quantità e qualità), pH, salinità, temperatura, disponibilità di ossigeno e nutrienti, CO<sub>2</sub>, nonché elementi biotici come i batteri.

Secondo Chauvy, R., & Weireld, G. D., uno studio condotto da W. Wu, K.-H. Lin, J.-S. Chang sostiene che la capacità di assorbimento efficiente della biomassa delle alghe è di circa 1,83 tonnellate di CO<sub>2</sub> per tonnellata di biomassa.

La coltivazione di microalghe specifiche può essere utilizzata per produrre biocarburanti, che risulta essere l'applicazione più interessante ed avanzata. È stato studiato che i biocarburanti derivanti da alghe riducono le emissioni nette di CO<sub>2</sub> del 78% rispetto ai combustibili a base di petrolio, questo a causa del ciclo chiuso del carbonio dei biocarburanti; infatti, la CO<sub>2</sub> emessa tramite la combustione viene riassorbita dalle alghe in crescita, che vengono successivamente trasformate in biocombustibile (Chauvy, R., & Weireld, G. D., 2020).

Alcuni studi sulla fattibilità economica di queste metodologie sono stati condotti ed è emerso che i prezzi di pareggio per il diesel e l'etanolo erano leggermente più alti dei prezzi di pareggio di altri processi di conversione dei biocarburanti alimentati da fonti animali e altre fonti vegetali (Ghiat, I., & Al-Ansari, T., 2021). Di contro la conversione di CO<sub>2</sub> tramite le alghe porta con sé alcuni vantaggi quali l'essere efficiente anche in condizioni di bassa concentrazione di CO<sub>2</sub> e il processo non necessita requisiti specifici di qualità/purezza della CO<sub>2</sub>. Mentre i principali svantaggi nell'utilizzo delle alghe per la conversione sono la sensibilità alle impurità delle alghe (ph), il costo del monitoraggio delle condizioni per la crescita e le ampie aree necessarie per gli stagni nel caso di sistemi aperti.

Secondo la Commissione Europea la sintesi delle alghe ha un livello TRL che si trova nell'intervallo 3-5 ed è stata oggetto di numerosi progetti di RD&D e progetti semi-commerciali negli ultimi anni, ma è ancora in una fase iniziale di sviluppo. Diverse strutture di coltivazione di alghe su scala pilota, a sistema chiuso, sono state messe in piedi in diverse parti del mondo utilizzando principalmente CO<sub>2</sub> purificata da centrali elettriche o impianti industriali. Le sfide principali per questo ambito di applicazione includono i bassi tassi di rendimento, la sensibilità del sistema alle impurità delle alghe e gli elevati requisiti energetici per la lavorazione dei prodotti delle alghe (IEA, 2019). Tutti aspetti che fanno aumentare fortemente i costi operativi. In Tab. 8 sono riassunti i principali indicatori tecnologici ed economici per la coltivazione di alghe.

*Tabella 8: Indicatori importanti per CCU sintesi di alghe.*

Indicatore	Valore
TRL	3-5
Utilizzo netto di CO <sub>2</sub> (t/t di biomassa)	1.83
Potenziale capacità di utilizzo di CO <sub>2</sub> (Mt/anno)	-
Principali industrie interessate	Produzione biofuels

### **1.3.5 Utilizzo diretto**

La CO<sub>2</sub> può essere utilizzata direttamente come materia prima in molte industrie e settori, tra cui il riscaldamento e il raffreddamento in cui la CO<sub>2</sub> viene utilizzata come refrigerante, la carbonazione delle bevande e la conservazione degli alimenti.

Una delle destinazioni al mercato più importanti in questo mercato è rappresentata dall'industria del food and beverage, il cui utilizzo di CO<sub>2</sub> è approssimativamente 11 Mt/anno. In alternativa, l'adozione della CO<sub>2</sub> supercritica come refrigerante sta ricevendo crescente attenzione perché diversi studi affermano che i sistemi di riscaldamento e raffreddamento a base di CO<sub>2</sub> possono raggiungere prestazioni tecniche più elevate rispetto all'uso di altri refrigeranti come gli idrofluorocarburi.

## **2. Il ruolo delle politiche ambientali a supporto dell'utilizzo di CO2**

Gli investimenti in progetti CCU sono considerevolmente aumentati negli ultimi venti anni (come verrà mostrato in maniera esaustiva nel cap. 4 di questo elaborato). Questa crescita è stata favorita da una maggiore attenzione da parte degli stati e dei governi verso la decarbonizzazione dei processi industriali carbon-intensive. Infatti, il crescente interesse verso l'utilizzo della CO2, a seguito delle numerose conferenze delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, tra cui il Protocollo di Kyoto del 1997 e, in particolare, gli Accordi di Parigi del 2015, è guidato principalmente dall'obiettivo comune di mitigare le emissioni globali di CO2.

### **2.1 Introduzione alle politiche per la CCU**

Le politiche per i processi CCU hanno quindi tre obiettivi principali:

1. La riduzione delle emissioni globali di CO2: il riutilizzo della CO2 offre una soluzione alternativa e complementare a quella dello stoccaggio permanente della CO2.
2. Stimolare l'innovazione industriale: permettere alle aziende di posizionarsi sulla frontiera tecnologica espandendo il proprio raggio di azione su nuovi mercati.
3. Supportare un approccio economico circolare: trasformare un prodotto di scarto in risorsa, ottenendo sia un vantaggio ambientale sia economico.

Le tecnologie CCU, data la complessità del loro caratteristico avanzamento tecnologico, presentano diverse sfide legate alla loro scalabilità commerciale. Infatti, nonostante le numerose opportunità ad esse associate, molte di queste risultano essere ancora in una fase sperimentale. Una delle sfide è sicuramente il divario economico che c'è tra il costo dei prodotti derivanti dalla CO2 catturata e quelli prodotti in maniera tradizionale. Spesso, infatti, la produzione dello stesso prodotto, ma integrata con i processi di cattura e riutilizzo del carbonio, risulta essere molto più costosa dell'equivalente tradizionale, rendendo queste tecnologie meno attraenti per le aziende. È quindi facile intuire come, senza un adeguato sistema di politiche a supporto dello sviluppo tecnologico, i prodotti derivanti dal riutilizzo della CO2 catturata non possono competere sul mercato con i prodotti tradizionali, principalmente a causa degli elevati costi associati alla cattura e alla conversione dell'anidride

carbonica. Un'altra sfida, come spiega l'IEA, risulta legata ai limiti normativi e legali associati a queste tecnologie. È necessario dimostrare chiaramente che questi tipi di soluzione contribuiscono all'effettiva riduzione delle emissioni globali. È quindi necessario mettere in piedi dei sistemi di misurazione, rendicontazione e verifica (MRV - measurement, reporting and verification) trasparenti e robusti. Nella creazione di questi sistemi devono essere considerate una moltitudine di variabili, tra cui la grande diversità che c'è tra i prodotti e i mercati coinvolti, il che li rende molto complessi.

Per poter ridurre il divario che c'è tra i costi e i benefici associati a queste soluzioni e superare le barriere normative è quindi necessario un insieme di politiche mirate. Ad oggi, le regioni occidentali, come EU e Nord America, sembrano aver intrapreso una strategia comune che comprende due meccanismi principali:

- Programmi di sovvenzione economica/finanziaria rivolti a settori identificati come strategici per la decarbonizzazione industriale.
- Introduzione di un prezzo sul carbonio; uno strumento che impone a chi emette CO<sub>2</sub> un corrispettivo per le proprie emissioni, o sotto forma di una tassa sul carbonio o di un sistema di limiti e scambi.

Tuttavia, queste due soluzioni non risultano essere, ad oggi, del tutto efficaci. Ad esempio, il prezzo del carbonio, nonostante possa risultare un efficace strumento incentivante, risulta essere ad oggi troppo basso per far sì che queste tecnologie alternative di CCU risultino più vantaggiose rispetto a quelle tradizionali. Nella maggior parte dei casi il prezzo del carbonio risulta essere troppo basso, a tal punto da rendere più conveniente il pagamento delle tasse relative alle emissioni di carbonio o semplicemente lo stoccaggio della CO<sub>2</sub> catturata, piuttosto che sviluppare applicazioni di utilizzo della CO<sub>2</sub>.

È pertanto necessario combinare le soluzioni già in atto (vedi carbon pricing) con altre politiche di supporto. In questa sezione vengono discussi i principali strumenti che potrebbero essere utilizzati per dare uno slancio al mercato dei prodotti e dei servizi derivati dalla CO<sub>2</sub>.

## 2.2 Principali strumenti incentivanti utili a spingere le tecnologie e i progetti CCU

### 2.2.1 Incentivi economici

È il meccanismo più diretto per sostenere lo sviluppo dei progetti. Posso essere sottoforma di sussidi per coprire i costi del progetto, di incentivi fiscali e di garanzie sui ricavi. Questo tipo di meccanismo permette di abbassare le spese di capitale ed operative, nonché di creare dei flussi di entrata stabili, fondamentali per creare un modello di business solido, con un profilo di rischio accettabile. Già in passato, gli incentivi economici e fiscali sono stati utilizzati, in maniera efficace, per promuovere diverse tecnologie a basse emissioni di carbonio in numerose regioni del mondo. Il che rende questo meccanismo particolarmente interessante anche per le tecnologie CCU.

Il miglior esempio disponibile, ad oggi, per dimostrare l'efficacia di questo tipo di meccanismo nel contesto dell'utilizzo della CO<sub>2</sub> nei prodotti risulta essere la legge di bilancio del 2018 negli US. In particolare, nel febbraio del 2018, il Congresso degli Stati Uniti ha approvato una legge per espandere e riformare un credito d'imposta denominato 45Q, introdotto originariamente nel 2008. Le novità del 45Q sono state progettate per incoraggiare l'innovazione e l'adozione di tecnologie CCUS, comprese le tecnologie CCU. Il credito d'imposta è disponibile per 12 anni dall'inizio dell'attività. Nel contesto CCU, si prevede che il livello del credito d'imposta aumenterà progressivamente da 17 USD/tCO<sub>2</sub> nel 2018 a 35 USD/tCO<sub>2</sub> nel 2026; successivamente, i crediti saranno indicizzati all'inflazione. I progetti devono essere in costruzione entro il 2024 e devono soddisfare altre tre condizioni: la CO<sub>2</sub> catturata sarebbe dovuta essere rilasciata nell'aria; 25 ktCO<sub>2</sub>/anno devono essere convertite in prodotti da ogni impianto di cattura; ci deve essere una valutazione del ciclo di vita da parte di un ente regolatore per dimostrare un effettivo beneficio per il clima, così da poter applicare il credito d'imposta solamente alla parte della CO<sub>2</sub> convertita che effettivamente riduce le emissioni complessive.

Questi aspetti limitano quindi l'applicazione di questo incentivo nel contesto CCU. Infatti, per prodotti come carburanti sintetici e prodotti chimici, parte della CO<sub>2</sub> viene comunque emessa nell'atmosfera e quindi sarà applicato solamente una parte del credito di imposta di 35\$/tCO<sub>2</sub>. I prodotti che offrono una

ritenzione permanente di carbonio, come il calcestruzzo e i materiali per l'edilizia, dovrebbero essere in grado di richiedere crediti più elevati, ma in genere hanno tassi di assorbimento di CO<sub>2</sub> nettamente inferiori.

### **2.2.2 Appalti pubblici**

Gli appalti pubblici sono un meccanismo utile alla creazione di un mercato iniziale per i prodotti derivanti da tecnologie CCU. Infatti, allo stato attuale di avanzamento tecnologico, è difficile che ci sia una domanda sufficiente per poter permettere a queste aziende di sopravvivere, soprattutto in una fase iniziale. A questo proposito, i governi, con l'acquisto di materiali e prodotti a basse emissioni, hanno la possibilità di garantire la domanda a queste aziende e promuovere così la fiducia di altri investitori privati. Nonché, promuove l'innovazione, soprattutto in quei settori in cui la domanda governativa è significativa, come ad esempio i materiali da costruzione o i carburanti per i trasporti pubblici. L'aspetto chiave di questo meccanismo è la fornitura di un mercato garantito per settori che non hanno ancora una sufficiente domanda, utile anche per garantire il capitale necessario agli investimenti in quel settore. A supporto di questo meccanismo possono essere abbinare delle strategie di marketing, che si appoggiano sull'utilizzo di etichette e/o standard specifici che certificano le caratteristiche a basse/nulle emissioni dei prodotti, per supportare gli sforzi degli appalti pubblici.

È interessante osservare come la spesa per gli appalti pubblici nei paesi OCSE (Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico) ammonti al 12% del PIL, e fino al 29% del PIL nei paesi in via di sviluppo, evidenziando il vasto utilizzo di questo strumento da parte dei governi (OCSE, 2019).

Esempi di questo meccanismo si osservano, negli ultimi anni, in Olanda, dove gli appaltatori possono usufruire di una riduzione di prezzo fino al 5% durante la valutazione della propria offerta se le loro prestazioni soddisfano determinati criteri (OCSE, 2016). Anche in Canada, sono state implementate delle norme sugli appalti pubblici relativi ai materiali da costruzioni che incorporano nel cemento e nel calcestruzzo la CO<sub>2</sub> catturata (ECO, 2017).

Strumenti di questo tipo possono incentivare gli investimenti nel settore CCU, andando allo stesso tempo a garantire un mercato iniziale.

### **2.2.3 Mandati normativi**

I mandati normativi sono dei requisiti legali utili a promuovere dei prodotti o dei servizi che soddisfano determinati criteri. In un contesto come quello del CCU, si obbligano quindi i produttori a soddisfare determinati criteri di emissione di CO<sub>2</sub> e si obbligano i clienti ad acquistare una percentuale di prodotti o servizi a basse emissioni di anidride carbonica. Questo tipo di meccanismo permette a questa tipologia di prodotti di entrare sul mercato, anche se in maniera forzata. Questo tipo di misura è stato ad esempio applicato al settore dei carburanti per trasporti.

Nell'Unione Europea sta venendo applicato un mandato di questo tipo, il Renewable Energy Directive (RED II), che obbliga gli stati a utilizzare almeno un 14% di energia rinnovabile sul totale, per quanto riguarda il trasporto su rotaia e su strada, entro il 2030. In questa direttiva dell'Unione Europea si fa esplicitamente riferimento ai carburanti sintetici derivati dalla CO<sub>2</sub>, che devono soddisfare diversi criteri. Infatti, per poter rientrare nel conteggio del 14% è necessario che questi carburanti contribuiscano ad un risparmio di emissioni GHG del 70%. Inoltre, l'energia in ingresso nel processo di produzione deve essere completamente rinnovabile. Queste limitazioni rendono i combustibili sintetici non ancora così efficaci nella transizione climatica e risultano essere meno competitivi rispetto ad altri combustibili a basse emissioni di carbonio riconosciuti dal RED II.

Un'altra applicazione efficace di questo tipo di misura è stata sviluppata in California, con il Low Carbon Fuel Standard. Questo mandato riconosce i combustibili prodotti con tecniche CO<sub>2</sub>-EOR in quanto permettono di immagazzinare la CO<sub>2</sub> durante la fase di estrazione, risultando così più efficienti e meno inquinanti.

### **2.2.4 Etichette, certificazioni e test**

Come già anticipato precedentemente una strategia efficace per consapevolizzare gli utenti all'utilizzo di prodotti derivanti dalla CO<sub>2</sub> catturata può essere quello di implementare un sistema di etichettatura e certificazione regolamentato, che permetta ai consumatori di riconoscere le caratteristiche a basse emissioni del prodotto.

Questo tipo di meccanismo è stato applicato con successo in diversi settori, come quello dell'abbigliamento, degli alimenti e dei materiali utili all'imballaggio. Strumenti di questo tipo sono stati utilizzati sia in Europa sia negli Stati Uniti, rispettivamente con il programma EU Energy Label e il sistema Energy Star.

Nel contesto CCU dovrebbero essere pensate delle etichette specifiche utili a guidare le scelte dei consumatori. Dovrebbero comunicare chiaramente la riduzione delle emissioni associate all'utilizzo di quel prodotto specifico.

Inoltre, potrebbero essere sviluppate delle certificazioni specifiche per questo tipo di prodotti. Queste garantirebbero il rispetto di specifici standard.

### **2.2.5 Research Development and Demonstration (RD&D)**

Il supporto nella fase di ricerca, sviluppo e dimostrazione (RD&D) può svolgere un ruolo chiave nell'implementazione di prodotti e servizi derivati dalla CO<sub>2</sub> catturata, rendendoli scalabili e accelerare la maturità tecnologica delle soluzioni CCU.

Questi programmi di supporto sono molto versatili, in quanto possono riguardare sia progetti a breve termine sia a lungo termine, e possono finanziare una moltitudine di prodotti diversi, concentrandosi sul loro sviluppo e l'avanzamento tecnologico. Questo meccanismo è solitamente più ampio rispetto agli altri visti in precedenza. Questo permette di concentrarsi, oltre che sulle tecnologie di utilizzo, su tutta la catena del valore CCUS, includendo sviluppo di tecnologie di cattura della CO<sub>2</sub>, la produzione di idrogeno a basse emissioni di CO<sub>2</sub> e tutta l'infrastruttura di trasporto della CO<sub>2</sub>. Questo tipo di politiche è solitamente strettamente legato alla roadmap di distribuzione delle tecnologie che vengono supportate.

In *Tab. 9* sono riportati i principali programmi di supporto alla ricerca, sviluppo e dimostrazione (RD&D) nel contesto CCUS ad oggi.

Parallelamente, sono stati lanciati diversi programmi a premio con l'intento di incentivare lo sviluppo delle tecnologie di conversione della CO<sub>2</sub>, premiando le applicazioni più innovative per l'utilizzo della CO<sub>2</sub>. L'esempio più significativo è rappresentato dall'NRG COSIA Carbon XPrize, una competizione

globale del valore di 20 milioni di dollari, finanziata da NRG e dall'Oil Sands Innovation Alliance canadese (XPRIZE, 2019).

Questi meccanismi di incentivazione danno la possibilità ai governi di svolgere un ruolo di facilitazione e intermediazione, prevedendo la collaborazione tra diverse parti interessate, in particolare l'industria e il mondo accademico, e incoraggiando la collaborazione attraverso programmi internazionali di ricerca e sviluppo.

In Tab. 10 è riportato un riassunto dei principali strumenti incentivanti per la creazione di un mercato CCU.

Tabella 9 Principali programmi di supporto RD&D ad oggi. Fonte: *Putting CO2 to Use, IEA 2019*.

Programma di supporto	Paese	Anno	Descrizione
Carbon Recycling Roadmap	Japan	2019	Il Giappone ha pubblicato una tabella di marcia per il riciclaggio del carbonio nel giugno 2019 con particolare attenzione alla RD&D iniziale per la commercializzazione delle tecnologie di utilizzo di CO2 dal 2030 (METI, 2019).
Horizon 2020	European Commission (EC)	2020	La Commissione Europea (CE) sta finanziando diversi programmi di ricerca e sviluppo, compresi i partenariati pubblico-privato, nell'ambito del programma Horizon 2020. In totale, 61 progetti sulle tecnologie di utilizzo della CO2 sono stati finanziati nell'ultimo decennio per un totale di 273 milioni di dollari (SAM, 2018).
Innovation Fund	European Commission (EC)	2021	Sarà finanziato dall'asta delle quote di emissione dell'EU ETS, a partire dal 2021. Il Fondo includerà il sostegno per la dimostrazione di tecnologie innovative di utilizzo della CO2 all'interno di un ampio portafoglio di tecnologie a basse emissioni di carbonio e può ammontare a oltre 11 miliardi di dollari, a seconda del prezzo del carbonio (EC, 2019).
American Reinvestment and Recovery Act (ARRA)	United States	2009	Ha sostenuto progetti di conversione di CO2 (US DOE, 2019).
DOE Carbon Use and Reuse R&D portfolio	United States	2010	Ha sostenuto progetti e iniziative di R&D (US DOE, 2019).
13th Five Year Plan	China	2016	In Cina, diversi programmi di ricerca e sviluppo sono stati istituiti come parte del 13° piano quinquennale, concentrandosi principalmente su sostanze chimiche e materiali da costruzione (ACCA21, 2019).

*Tabella 10 Strumenti incentivanti per la creazione di un mercato per prodotti e servizi derivati dalla CO2 catturata. Fonte: Putting CO2 to Use, IEA 2019.*

Strumenti incentivanti	Esempi di politiche/piani di supporto esistenti
Incentivi economici	Credito d'imposta US 45Q che incoraggia la cattura e la conversione di CO2 in prodotti utilizzabili.
Appalti pubblici	Norme sugli appalti pubblici sono attive in Canada e nei Paesi Bassi e favoriscono come input i materiali con bassa impronta di carbonio per i progetti di costruzione.
Mandati normativi	Renewable Energy Directive (RED II) (EU) e Low Carbon Fuel Standard in California. Entrambi favoriscono i carburanti di trasporto a basse emissioni di carbonio, compresi i carburanti derivati dalla CO2.
Etichettatura	Etichettatura di numerosi prodotti, inclusi elettrodomestici e materiali di imballaggio. Evidenziando la riduzione delle emissioni.
Certificazione e test	Certificazione e test di un'ampia gamma di mercati di prodotti, tra cui elettronica e cibo.
RD&D Support	<ol style="list-style-type: none"> <li data-bbox="855 1223 1390 1373">4. A livello internazionale: Mission Innovation - Coalizione di paesi che si sono impegnati a raddoppiare i bilanci di R&amp;S sull'energia pulita, il che offre l'opportunità di espandere anche la R&amp;S sull'uso di CO2.</li> <li data-bbox="855 1375 1390 1491">5. A livello nazionale: programma EU's Horizon 2020, US DOE's Carbon Use and Reuse R&amp;D portfolio, Chinese 13th Five-Year plan.</li> </ol>

## **2.3 Confronto tra Europa e Nord America**

In questa sezione verrà svolto un confronto tra le strategie messe in atto in UE e in Nord America, per cercare di evidenziare gli approcci e le priorità differenti nella promozione di queste soluzioni innovative.

### **2.3.1 Quadro normativo dell'Unione Europea**

Lo sviluppo delle tecnologie CCUS nell'UE è finanziato principalmente attraverso i proventi ottenuti dal sistema di scambio di quote di emissione dell'UE (ETS). Per rendere possibile ciò l'UE fissa un tetto massimo alla quantità totale di emissioni di gas serra consentite all'interno del sistema. Per raggiungere gli obiettivi di riduzione delle emissioni, alle imprese che partecipano all'EU ETS viene assegnato o viene richiesto di acquistare un certo numero di quote ETS, che rappresentano il diritto di emettere una determinata quantità di gas serra. I programmi di investimento sono poi finanziati attraverso la monetizzazione di una parte di queste quote ETS. Questo approccio non ha però sempre un impatto positivo diretto sui progetti CCU. Infatti, con le regole attuali l'EU ETS non consente di detrarre le emissioni relative alla CO<sub>2</sub> trasferita da un impianto per l'utilizzo in prodotti o servizi. Ciò implica che ogni volta che un ente emettitore utilizza o vende la CO<sub>2</sub> per la conversione in prodotti, la CO<sub>2</sub> deve essere segnalata comunque come emessa e le quote di emissione devono essere comunque pagate al regolatore.

In questo modo l'UE ha finanziato più programmi di supporto alla ricerca e all'innovazione. I due principali, che sono già stati introdotti in precedenza, sono: Horizon 2020 e Innovation Fund. Sono strumenti di supporto, per potervi accedere è richiesto di rispettare numerosi criteri, nonché una elevata trasparenza riguardo agli obiettivi e ai traguardi raggiunti. L'obiettivo finale di questi fondi è quello di dimostrare tecnologie innovative e un'attenzione particolare per la collaborazione tra pubblico e privato ed enti di diversa natura.

Infine, l'UE adotta delle norme regionali come la Renewable Energy Directive II (RED II), con le quali impone l'utilizzo di carburanti rinnovabili in misura di almeno il 14% del totale, per i trasporti su strada e rotaia.

L'UE si è quindi concentrata sullo sviluppo di un quadro normativo articolato per sostenere lo sviluppo delle tecnologie CCU nel lungo termine, utilizzando un sistema di scambio di crediti di carbonio proporzionalmente collegati al volume delle emissioni di gas serra immagazzinate o utilizzate dalle imprese e su fondi di finanziamenti rivolti alla ricerca e lo sviluppo.

### **2.3.2 Quadro normativo del Nord America**

Il Nord America, in particolare gli Stati Uniti, adotta un approccio che è più pragmatico. Propongono principalmente fondi di finanziamento pubblico, con l'obiettivo di ridurre i costi e stimolare gli investimenti privati nel minor tempo possibile.

Ci sono due leggi principali che si occupano di guidare lo sviluppo delle tecnologie CCU e queste sono: The Infrastructure Investment and Jobs Act (IIJA) del 2021 e The Section 45Q tax credit (S45Q) del 2008, successivamente esteso nel 2018.

- The Infrastructure Investment and Jobs Act (IIJA) ha stanziato un budget totale di quasi 21 miliardi di dollari per gli anni fiscali (FY) 2022-2026 e gli investimenti previsti sono strategicamente focalizzati sullo sviluppo della catena del valore CCUS.
- La Section 45Q tax credit (S45Q) è invece un incentivo che premia le aziende con dei crediti fiscali per ogni tonnellata di CO<sub>2</sub> catturata e riutilizzata. Questa legge è uno degli esempi più efficaci al giorno d'oggi di supporto allo sviluppo delle tecnologie CCU. Rende i progetti CCU più attraenti per gli investitori privati.

Anche negli Stati Uniti, come in Europa, ci sono delle norme sulla riduzione delle emissioni per i carburanti utilizzati nei trasporti. Infatti, in California con il Low Carbon Fuel Standard (LCFS), sono stati stabiliti degli obiettivi di riduzione delle emissioni nel contesto dei trasporti e al fine di raggiungere tali obiettivi sono stati riconosciuti i carburanti sintetici derivati dalla CO<sub>2</sub> come strumento efficace a tal fine. In questo modo vengono incentivate sia la produzione che l'adozione di soluzioni CCU.

Per incentivare gli investimenti di capitale privato nelle pratiche di decarbonizzazione, sia l'UE che il Nord America hanno adottato una strategia apparentemente comune che comprende tre meccanismi chiave:

- Programmi di sovvenzione rivolti a settori identificati come strategici per la decarbonizzazione industriale.
- Regimi fiscali dei crediti di carbonio proporzionalmente collegati al volume delle emissioni di gas serra immagazzinate o utilizzate dalle imprese CCUS.
- Sistemi di limitazione e scambio, che sono sistemi di mercato progettati per limitare le emissioni di gas serra stabilendo un tetto massimo di emissioni e consentendo alle aziende di scambiare quote di emissione.

Tuttavia, queste due regioni sembrano utilizzare questi strumenti in maniera differente, evidenziando i differenti approcci nello sviluppo di queste tecnologie.

Per quanto riguarda i programmi di finanziamento pubblico l'Europa sembra interessata principalmente al supporto delle attività di RD&D, con un forte impegno alla definizione degli standard. Al contrario, gli Stati Uniti adottano un approccio più diretto con incentivi economici mirati, che puntano all'immediata riduzione dei costi e ad attrarre gli investitori privati.

Sembra poi che l'UE sia più aperta a nuove tecnologie e applicazioni nel contesto dell'utilizzo della CO<sub>2</sub> con un impegno forte nello sviluppo di tecnologie non ancora consolidate. Gli Stati Uniti al contrario hanno sovvenzionato pesantemente tecnologie ormai mature, con benefici economici immediati, come l'EOR e le infrastrutture di cattura e stoccaggio.

Infine, nel caso dei crediti di imposta e dei sistemi di scambio delle quote di carbonio l'S45Q risulta essere uno strumento incentivante molto più semplice e diretto rispetto quelli adottati in Europa, riducendo immediatamente i costi per chi sviluppa e fa uso di tecnologie e applicazioni CCU.

### 3. Principali modelli di collaborazione nel contesto CCUS

In generale, come sottolineato più volte, la complessità intrinseca nella commercializzazione di tecnologie CCUS ancora in fase di dimostrazione richiede per gioco forza sia l'alleanza tra più players afferenti a diverse industries all'interno del singolo progetto, sia il coordinamento tra questi e altre aziende attive in altri progetti operanti in differenti step della catena del valore della cattura del carbonio, in quanto l'efficienza delle operazioni di valle (utilizzo o stoccaggio) dipendono significativamente dalla sincronia con le operazioni di monte (la cattura). L'obiettivo di questo paragrafo è quindi far luce sulle differenti modalità di collaborazione tra i players attivi all'interno dell'ecosistema CCUS, sia internamente al singolo progetto, sia tra più progetti (spesso afferenti allo stesso cluster o "project hub"). È bene notare che queste diverse forme collaborative sono spesso imposte dai comitati finanziari pubblici di valutazione posti a giudici delle gare d'appalto o tender calls per l'erogazione del sussidio pubblico a supporto della realizzazione di suddetti progetti.

Nel primo caso, per assicurare la piena realizzazione progettuale agli occhi degli stakeholders esterni, le aziende hanno adottato diversi modelli organizzativi come ad esempio, partnerships, Joint Ventures (JVs) e cooperative R&D contracts. Invece, per quanto riguarda la collaborazione tra più progetti, questa è imposta a livello regionale-locale dagli organi di governo impegnati nello sviluppo delle infrastrutture strategiche, in linea con le direttive politiche imposte, siano esse europee o nazionali. La connessione e il coordinamento imposte tramite approccio politico top-down tra diversi progetti appartenenti a diversi step della stessa catena del valore (cattura, trasporto, uso o stoccaggio) tenta così di garantire la massimizzazione dell'utilità estraibile dalle risorse disponibili introdotte, soprattutto laddove i meccanismi competitivi del libero mercato non sempre garantiscono la piena efficienza d'impiego. Negli anni, le politiche e i piani di decarbonizzazione industriale hanno programmato il coordinamento di più progetti all'interno di veri e propri Project Hubs, in modo tale che agli attori partecipanti dei singoli progetti fosse permesso di mettere in comune risorse, condividere i rischi operativi e integrare competenze specialistiche nelle varie fasi della catena del valore CCUS. Nei paragrafi successivi verranno prima presentati i Project Hubs come forma di collaborazione tra progetti ormai divenuta prassi di settore, per poi scendere nel dettaglio delle forme collaborative dei singoli progetti facendo

riferimento alla letteratura disponibile ed individuando quali tra queste possano aumentare la probabilità di successo dei progetti.

### **3.1 Modelli di collaborazione tra più progetti CCUS: Project Hubs<sup>17</sup>**

I cosiddetti Project Hubs sono delle vere e proprie reti integrate di governance il cui scopo è la coordinazione tecnico-logistica delle operazioni caratterizzanti le strutture di cattura, trasporto e l'utilizzo/stoccaggio tra diversi progetti connotati da una potenziale forte interdipendenza strategico-organizzativa e/o dalla condivisione dello stesso contesto regionale. Infatti, questa forma di collaborazione permette di facilitare la messa in comune di risorse, competenze, know-how ed expertise specialistiche tra diversi progetti, il quale consente di gestire meglio le eventuali inefficienze della catena del valore che potrebbero insorgere da un contesto non collaborativo, tra cui l'allocazione non ottimale degli sforzi tecno-economici propri del contesto CCUS. Tipicamente, è stato osservato che i CCUS Hubs si sviluppano intorno ai cluster industriali ad elevato impatto ambientale la cui decarbonizzazione rientra all'interno dei piani di sviluppo strategico nazionale o sovranazionale. In questi, essendo le fonti di emissioni vicine tra di loro, i Project Hubs innescano vere e proprie economie di agglomerazione finalizzate allo sfruttamento sinergico delle infrastrutture. In altri casi, invece, i Project Hubs possono essere anche geograficamente diffusi in risposta alla necessità dell'implementazione di un'infrastruttura di trasporto comune ed efficiente che sia in grado di connettere i nodi-progetto della rete, dai punti di cattura ai (meno diffusi) punti di stoccaggio. In ogni caso, per essere vantaggiosa, la collaborazione di rete tra diversi progetti CCUS deve comunque soppesare la presenza di significativi trade-offs. Tra i vantaggi principali vengono riconosciuti principalmente:

---

<sup>17</sup> Il concetto di Project Hubs è stato sviluppato intorno alle informazioni contenute all'interno del The CCUS Playbook di The CCUS HUB e al paper Barchi A., Illich M., Rondi L., Exploring Carbon Capture Use and Storage Projects and Hubs (1990- 2023): Where do we stand?

- **Costi inferiori e riduzione dei rischi di investimento - economie di agglomerazione:** la condivisione delle infrastrutture e delle risorse generano economie di scala nella costruzione e nella gestione dei progetti, riducendo i costi operativi per progetto. Gli hubs possono servire per sfruttare sinergicamente gli investimenti e mitigare gli effetti degli elevati sunk costs di costruzione e manutenzione degli impianti. Inoltre, condividere la conoscenza appresa nello sviluppo di nuove soluzioni e la standardizzazione della prassi derivante riduce i costi della cattura e utilizzo/stoccaggio del carbonio e i rischi ad essi associati.
- **Maggiore rapidità di scale-up – economie di scala:** gli Hubs possono avere un ruolo cruciale nella corsa al raggiungimento degli obiettivi climatici; infatti, consentono una crescita più rapida rispetto ai singoli progetti. Infatti, ad oggi i principali progetti CCUS su larga scala hanno una capacità di cattura di circa 1 Mt CO<sub>2</sub> all'anno. Mentre i primi Project Hubs sviluppati entro il 2030 mirano a catturare tra le 5 e le 10 Mt CO<sub>2</sub> all'anno.
- **Massimizzazione del ritorno dei finanziamenti pubblici:** l'assetto organizzativo degli Hubs è pensato per efficientare sia tecnicamente, sia economicamente la decarbonizzazione di interi cluster industriali, di sostenere la transizione verde degli impianti proprietari di aziende appartenenti al cluster, di mitigare i potenziali extra-costi derivanti dall'evoluzione delle politiche ambientali, di creare nuove opportunità di investimento per le aziende (sfruttando sostegno all'innovazione e potenziali spillover tecnologici), nonché di incentivare la creazione di nuove startup green-tech. Tutti questi benefici sociali ed economici portano gli Hubs ad avere priorità sui singoli progetti durante l'assegnazione di finanziamenti pubblici o di incentivi normativi, incentivando gli stessi proponenti a conformarsi a questo asset organizzativo.

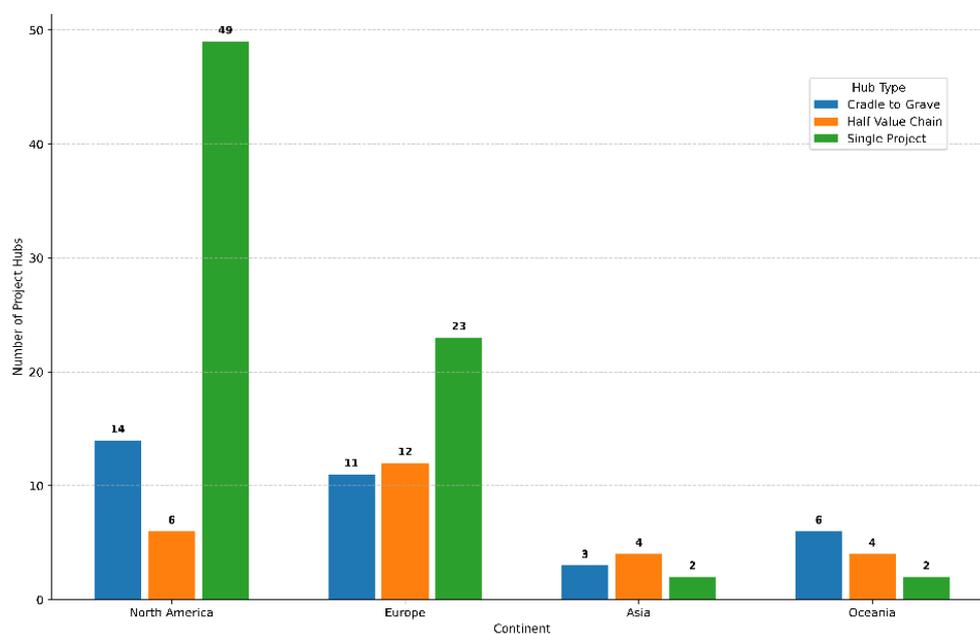
D'altro canto, gli svantaggi possono essere riassunti in:

- **Criticità legate alla complessità della governance necessaria per la gestione del Project Hub:** un Hub CCUS è una realtà multi-stakeholder, il che implica la necessità di un'attenta comunicazione ed allineamento operativo tra i partners, tipicamente di estrazione industriale diversa, caratterizzati da strategie, culture e meccanismi di governance aziendali contraddistinti e non sempre compatibili. In quest'ottica, i processi di governance vanno ottimizzati al fine di

ridurre eventuali disallineamenti ed armonizzare l'esecuzione dei diversi sotto-progetti nel contesto collaborativo.

- **L'incremento dei costi non garantisce necessariamente un aumento proporzionale dei ricavi:** l'implementazione dei project hubs comporta tipicamente un ampliamento della portata del piano di lavoro, determinando quindi un aumento dei costi, in particolare quelli legati alla gestione e alla governance. Risulta quindi fondamentale valutare attentamente il trade-off tra l'aumento dei costi e l'aumento potenziale dei ricavi, per determinare se risulti effettivamente vantaggioso per i project owners. Tuttavia, come già accennato, anche se i ricavi non crescono in maniera proporzionale ai costi, l'implementazione di project hubs può comunque offrire benefici nel breve e medio termine, come la mitigazione degli effetti degli investimenti.

Un'analisi dello stato di diffusione e sulla natura dei Project Hubs è stata svolta a partire dal dataset IEA da Barchi, Illich e Rondi (2024), nel quale hanno trovato che il 57% dei progetti CCUS presenti nel database rientrano all'interno di un Hub e che, ad oggi, sono attivi 158 Hubs a livello mondiale.



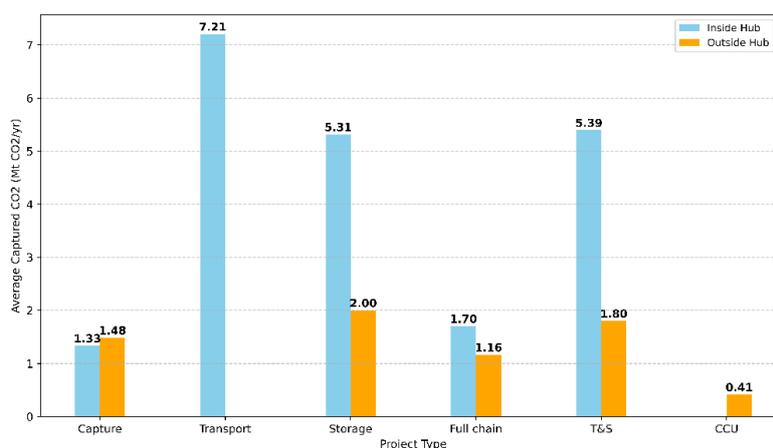
*Figura 10 Distribuzione degli hub di progetto in base all'ambito della catena del valore e alla regione. Fonte: Barchi, Illich e Rondi (2024).*

In generale, le regioni che presentano un elevato numero di infrastrutture CCUS ospitano più hub di progetto a causa degli elevati requisiti di coordinamento di cui si è accennato prima. In Fig. 10 si può

osservare la distribuzione geografica degli Hub. Il Nord America ha la maggiore concentrazione di hub focalizzati su una singola fase della catena del valore CCUS, ma un numero relativamente inferiore di hub che coprono tutte le fasi della catena o al massimo due di esse. L'Europa, invece, presenta un numero complessivo maggiore di hub che coinvolgono tutte le fasi della catena o un massimo di due, mostrando una distribuzione più equilibrata tra le tre categorie.

È interessante notare come nelle regioni/paesi in cui c'è un'elevata disponibilità di risorse tecnofinanziarie come Stati Uniti, Canada e Cina, i progetti full chain al di fuori di un Project hub sono più comuni che in Europa. Questo, secondo Barchi, Illich e Rondi (2024) è dovuto a diversi fattori. Ad esempio, negli Stati Uniti è presente un'industria petrolifera e del gas ben consolidata che, insieme ad un mix favorevole di modelli di governance, risorse finanziarie e capacità tecnologiche, consente lo sviluppo di progetti CCUS su larga scala in modo indipendente o attraverso JVs, senza doversi appoggiare a delle strutture come gli hubs. Al contrario in Europa, dove il mercato risulta essere di dimensioni inferiori e meno sviluppato, i governi e le istituzioni tendono ad incentivare la collaborazione all'interno degli hub, andando a sviluppare delle politiche che favoriscono la formazione di questi hub di progetto, migliorando così il coordinamento e l'efficienza delle risorse.

Analizzando poi l'impatto dei progetti CCUS in termini di cattura prevista di CO<sub>2</sub> (Mt/anno), si nota come i progetti facenti parte di un hub di progetto presentino una capacità di cattura maggiore rispetto ai progetti sviluppati individualmente, principalmente per quelli che si concentrano sul trasporto e lo stoccaggio della CO<sub>2</sub>. Per quanto riguarda cattura e utilizzo si nota invece che i progetti tendono maggiormente ad operare individualmente. Questi aspetti possono essere visualizzati in *Fig. 11*.



*Figura 11 Emissioni di gas serra catturate annunciate da progetti all'interno o all'esterno di un hub CCUS. Fonte: Barchi, Ilich e Rondi (2024).*

### 3.2 Modelli di collaborazione intra-progetto

Data la minor maturità delle tecnologie CCU, l'integrazione di tali progetti non è ancora pienamente supportata all'interno degli Hub, i quali tendono ad integrare progetti industriali basati su tecnologie ready-to-go ad ampia scala. I progetti CCU, dovendo ancora superare la loro fase dimostrativa, sono ancora sviluppati individualmente per rispondere con maggior precisione ai problemi di scale-up legati alla loro elevata specificità tecnica. In futuro, però, si prevede che anch'essi vedranno una loro progressiva integrazione all'interno di Project Hub su cluster industriali regionali per le stesse motivazioni espresse nel paragrafo precedente.

#### 3.2.1 I motivi della collaborazione e le caratteristiche dei progetti complessi

Ad oggi, i progetti CCU sono dei progetti di R&D delle tecnologie emergenti o, per quelle maggiormente avanzate, in progetti infrastrutturali di media scala. Quest'ultimi sono definiti dalla teoria manageriale "progetti complessi", in quanto connotati da un elevato grado di complessità tecnico-economica, incertezza e rischio dovuti principalmente all'aumentare proporzionale dei trade-off di cui tenere conto all'aumento di scala e di dimensione infrastrutturale del progetto. Generalmente questi progetti comportano il coordinamento di più stakeholders in un contesto di forte interdipendenza e richiedono spesso la creazione di un'organizzazione di progetto che comprende più partners che lavorano congiuntamente nell'ambito di consorzi, alleanze di scopo R&D o JVs.

In letteratura è noto di come le alleanze in ricerca e sviluppo tra imprese influenzano positivamente i risultati operativi e finanziari delle stesse rispetto a quelle imprese che non propendono per alcuna forma di collaborazione con attori esterni. Questo è principalmente imputato alla possibilità da parte di queste imprese di sfruttare le sinergie operative, di mitigare i rischi d'esercizio, di ammortizzare più facilmente il peso degli investimenti sommersi e di poter sfruttare reciprocamente le risorse, il know e l'expertise messi a disposizione dai partner del progetto (Wu, A., Wang, Z., & Chen, S., 2016). Nonostante ciò, è stato anche provato che alcuni progetti promossi da alleanze strategiche collaborative registrano significativi ritardi o definitivo insuccesso (fenomeno che sembra verificarsi ripetutamente nel contesto CCUS) anche a causa di difficoltà riscontrate nella collaborazione con i partners (Lhuillery & Pfister, 2008). Sempre nell'ambito dello stesso studio, Lhuillery e Pfister sottolineano che questo fenomeno è ulteriormente esasperato se tra i partners di progetti sono presenti contemporaneamente imprese concorrenti e organizzazioni pubbliche di ricerca. Quindi, anche se la collaborazione è un fattore ritenuto collettivamente necessario per progetti di questa portata, questo non assicura de facto il successo del progetto. Come indagato da Chakkol, Mehmet, Selviaridis, K. e Finne, Max M. (2018), i progetti complessi sono caratterizzati da tre caratteristiche principali:

- **Natura temporanea delle partnerships:** l'orizzonte temporale limitato del progetto porta spesso a difficoltà nella collaborazione tra i partner, in quanto è più complicato sviluppare delle chiare regole di cooperazione e fiducia reciproca che normalmente richiedono lassi temporali maggiori.
- **Elevate risorse di capitale e complessità del progetto:** lo sviluppo di questi progetti necessita di elevate risorse di capitale rendendo essenziale la partecipazione di più enti finanziatori.
- **Ambiguità delle strutture e gerarchie organizzative:** data la partecipazione di più imprese con diverse strutture organizzative e prassi di governance, è probabile l'insorgenza di ambiguità nelle strutture organizzative del progetto stesso. L'obiettivo di massimizzare l'utilità propria di ogni azienda in un contesto di mercato competitivo ostacola e rende più complicato definire chiaramente i ruoli, le responsabilità, le parti a cui è assegnata l'autorità di controllo e la

suddivisione dei benefici all'interno di un contesto collaborativo a causa dell'emergenza di conflitti d'interesse.

I problemi di collaborazione tra le organizzazioni coinvolte nel progetto possono dunque insorgere laddove manca un reale meccanismo di governance condivisa. La letteratura disponibile sull'economia dei costi di transazione suggerisce che la scelta di una struttura di governance o di una forma organizzativa appropriata rimane il meccanismo fondamentale che le imprese devono rispettare per promuovere la condivisione e la protezione delle conoscenze in un'alleanza (Oxley e Sampson, 2023). Per quanto riguarda i progetti CCU, la governance della collaborazione può riferirsi sia a relazioni verticali (ad esempio, appaltatori - subappaltatori) sia a relazioni orizzontali (ad esempio, tra partner del consorzio). Per lo scopo di questo elaborato ci concentreremo sul secondo tipo di relazioni, quelle orizzontali.

### 3.2.2 Qual è la struttura ottimale per l'alleanza?

Come evidenziato nei paragrafi precedenti, il successo di un progetto CCU dipende spesso dal supporto di un'alleanza strategica tra più imprese. Con l'aumentare del grado di **scale-up**, infatti, cresce la necessità di competenze specialistiche, difficilmente reperibili all'interno di una singola azienda. Per questo motivo, imprese di impiantistica, fornitori tecnologici (sia per la cattura che per l'utilizzo della CO<sub>2</sub>), operatori logistici, aziende proprietarie degli impianti da decarbonizzare, società di governance e consulenza tecnico-economica tendono a stringere collaborazioni strategiche. Questo approccio consente di massimizzare le probabilità di successo del progetto, sia sotto il profilo tecnico e operativo, sia dal punto di vista finanziario. In questo contesto, tali imprese possiedono i propri interessi ed obiettivi che non sempre sono allineati con quelli propri del progetto singolo; per esempio, le imprese proprietarie del brevetto tecnologico vorranno massimizzare l'utilità che deriva dalla loro presenza nel progetto per sviluppare la tecnologia, altre saranno più market-oriented e via dicendo. Nonostante gli interessi siano diversi, queste imprese si ritrovano a collaborare per esplorare le opportunità di business che il mercato CCUS ha da offrire stipulando così accordi strategici. Tipicamente, le alleanze strategiche possono essere suddivise in due macrocategorie:

- **Equity-based:** in questo caso le imprese collaborano partecipando alla partnership attraverso l'investimento di capitale di rischio (Equity). Possono essere distinte due tipologie differenti di collaborazioni equity-based:
  - **Joint Venture (JV):** tipo di alleanza che viene costituita quando le società madri creano una nuova società figlia. Ad esempio, la Società A e la Società B (società madri) possono costituire una joint venture creando la Società C (società figlia). È un accordo commerciale in cui due o più parti concordano di mettere in comune le proprie risorse allo scopo di realizzare un compito specifico. Questo compito può essere un nuovo progetto o una qualsiasi altra attività commerciale. Ciascuno dei partecipanti a una joint venture è responsabile dei profitti, delle perdite e dei costi ad essa associati. Tuttavia, la joint venture è un'entità a sé stante, separata dagli altri interessi commerciali dei partecipanti. In una JV, i partner condividono la proprietà dell'entità creata, essendo congiuntamente responsabili dei suoi rischi, profitti, perdite e della sua governance.
  - **Equity Strategic Alliance:** questo tipo di alleanza si crea quando una società acquista una certa percentuale azionaria dell'altra società. Se la Società A acquista il 40% del capitale della Società B, si formerebbe un'alleanza strategica azionaria. Questa tipologia di alleanza strategica può avere obiettivi di risultato simili a quelli di una joint venture. Tuttavia, è finanziata in modo diverso, in quanto è una società che effettua un investimento azionario in un'altra.

Le collaborazioni equity-based sono quelle che hanno una governance maggiormente burocratica, tipicamente caratterizzate dalla presenza di comitati direttivi o di un consiglio di amministrazione, il che consente ai partner dell'alleanza di coordinare e controllare efficacemente le contingenze future, ma con costi di coordinamento molto maggiori.

- **Non-Equity-based:** un'alleanza strategica non azionaria nasce quando due o più aziende sottoscrivono un rapporto contrattuale per mettere insieme le proprie risorse e capacità. In

questo caso i partner collaborano senza uno scambio di capitale. Ogni azienda apporta semplicemente le proprie risorse all'alleanza per il reciproco beneficio.

Le collaborazioni non-equity-based sono quindi accordi non azionari caratterizzati da una maggiore flessibilità e reversibilità e presentano minori costi non recuperabili in caso di fallimento dell'alleanza rispetto alle forme equity-based.

Nonostante questa sia la classificazione più diffusa per quanto riguarda le forme di governance di un'alleanza risulta essere molto semplicistica e limitante. A questo proposito Choi and Contractor (2017) propongono una classificazione che risulta essere uno spettro piuttosto che una dicotomia tra due sole categorie. La loro classificazione si appoggia su due dei meccanismi che differenziano le varie tipologie di governance: l'intensità della comunicazione tra i partner e il coordinamento dei compiti che ognuno deve svolgere. Secondo quanto descritto nella loro pubblicazione, la Knowledge Based Theory (o View) (KBW) dell'impresa suggerisce che l'apprendimento e il trasferimento delle conoscenze nelle alleanze di ricerca e sviluppo richiede un'interazione più intensa e un coordinamento più dettagliato. Allo stesso modo la Transaction Costs Theory (TCT) sostiene che strutture maggiormente gerarchiche riducono i costi di transazione facilitando l'osservabilità e il monitoraggio, il che riduce i rischi di appropriabilità.

Allo stesso tempo però gli autori segnalano come troppa interazione, compiti congiunti complessi e burocrazia possono anche risultare subottimali oltre un certo punto, questo perché possono aumentare i costi di elaborazione delle informazioni che possono portare a conflitti e fallimenti nelle comunicazioni, andando ad impattare negativamente sulle prestazioni del progetto. Un altro aspetto evidenziato è quello della collaborazione tra partner multidisciplinari, proprio come nel caso dei progetti CCUS, che può risultare più impegnativo a causa della mancanza di informazioni e conoscenze condivise, andando ad aumentare la frequenza di comunicazione e la probabilità di conflitti interpersonali, riducendo così la produttività del progetto. Proprio tenendo conto dei benefici e dei costi dei meccanismi di governance propongono uno spettro basato su un grado crescente di interazione e complessità contrattuale (coordinamento), che è possibile osservare in Fig. 12.

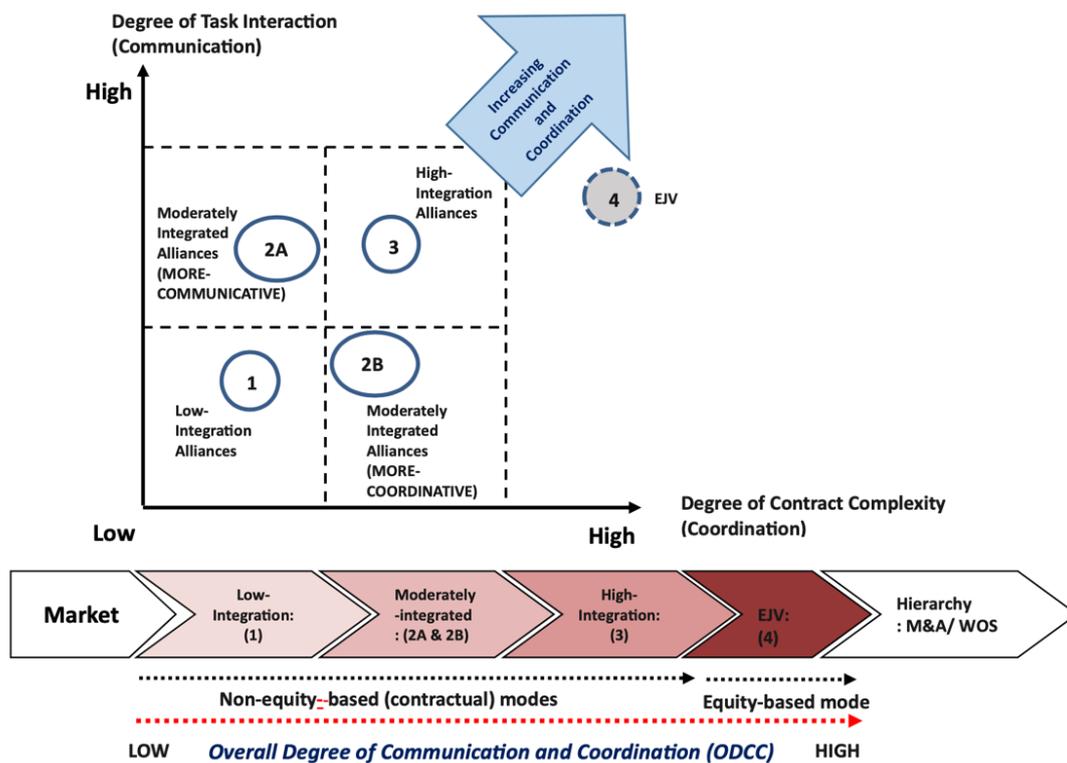


Figura 12 Diverse modalità di governance al crescere del grado di comunicazione e di coordinamento. Fonte: Choi, J., & Contractor, F. J. (2017). *Improving the Progress of Research & Development (R&D) Projects by Selecting an Optimal Alliance Structure and Partner Type*. *British Journal of Management*.

Dallo studio di Choi and Contractor (2017) emerge che le strutture ottimali di governance che si traducono in migliori prestazioni delle collaborazioni sono quelle, non-equity-based, che hanno livelli moderati di interazione e complessità contrattuale. Queste forme risultano ottenere delle prestazioni migliori rispetto a quelle di collaborazioni o con strutture troppo semplici o con strutture troppo complesse, quali le EJV. Questa tipologia di alleanza, caratterizzato da un grado moderato di interazione con i partner dell'alleanza, promuove una comunicazione efficace, la condivisione e il trasferimento di conoscenze tecnologiche, permettendo comunque un efficace coordinamento dei molteplici compiti e delle relazioni.

In Fig. 13 è possibile osservare l'effetto della struttura di governance delle alleanze sulla probabilità di progresso in R&D (performance). La migliore performance dell'alleanza R&D (probabilità di progresso R&D: 65,1%) può essere vista in alleanze moderatamente integrate, dove il "punto di inflessione di ODCC" (asse orizzontale) è 2,14.

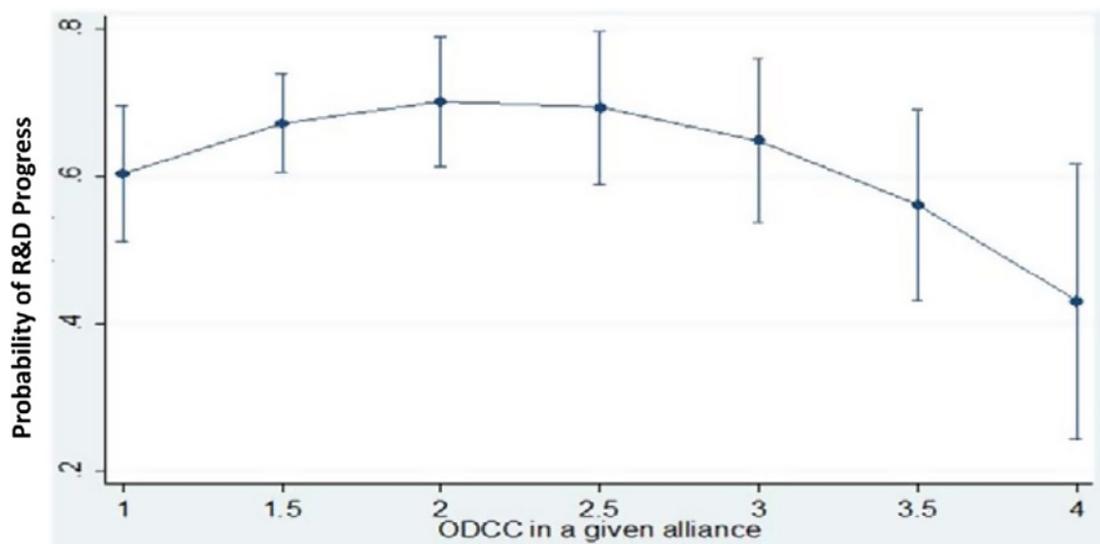


Figura 13 Effetto della struttura di governance delle alleanze sulla probabilità di progresso in R&D (performance). Fonte: Choi, J., & Contractor, F. J. (2017). *Improving the Progress of Research & Development (R&D) Projects by Selecting an Optimal Alliance Structure and Partner Type*. *British Journal of Management*.

Come si può osservare questo grafico ha una forma a U inversa per il rapporto tra il grado di interazione/complessità contrattuale (ODCC) e la performance delle alleanze R&D. Un grado troppo basso (1) o troppo alto (4) di comunicazione e coordinazione diminuisce la probabilità di successo. Nel secondo caso (EJV) indica quindi che l'eccessiva burocrazia o complessità può essere controproducente. Da notare come, nonostante il massimo lo si raggiunge con un ODCC di 2.14, se l'ODCC è 3 (struttura di governance ad alta integrazione con contratto di alleanza dettagliato e complesse disposizioni) le prestazioni di R&D rimangono comunque superiori a quelle dell'alleanza meno complesse e dell'EJV (ODCC = 1 e 4, rispettivamente).

Questo risultato conferma le ipotesi degli autori, ma fa emergere una domanda del perché la maggior parte delle collaborazioni si basano su alleanze di ricerca e sviluppo più coinvolte, ad alto impegno o complesse, come le EJV o alleanze contrattuali altamente complesse. Questo aspetto lo si riscontra anche nel contesto CCUS, nel quale la maggior parte delle collaborazioni vengono siglate attraverso delle JV tra le varie imprese coinvolte nel progetto.

Ci sono due ragioni principali che possono spiegare questo fenomeno:

- Ci sono delle presunzioni teoriche ormai consolidate che si basano sulla TCT e sulla KBW.

Secondo la prima teoria le alleanze che sono più complesse come le JV, sono tradizionalmente

considerate degli strumenti più efficaci per allineare gli incentivi tra i partner e ridurre così il rischio di comportamenti opportunistici. In questo contesto quindi, la governance più complessa è vista come un mezzo per salvaguardare il valore tecnologico e facilitare il controllo. Allo stesso modo, secondo la KBV, le alleanze altamente integrate (JV) sono fondamentali per condividere e creare delle conoscenze tacite e complesse.

Si può quindi facilmente comprendere che seguendo questa visione teorica, risultano indispensabili livelli elevati di interazione per generare innovazione in progetti complessi.

- Solo negli ultimi anni si è riscontrato un miglioramento delle capacità contrattuali tra le parti. I negoziatori e i loro consulenti legali hanno migliorato le capacità di scrivere contratti più lunghi e dettagliati, includendo clausole contingenti e opzioni reali, che riducono la necessità di ricorrere a forme gerarchiche come le EJV.

Questi contratti offrono dei meccanismi di protezione e salvaguardia sufficiente, riducendo così i rischi di fallimento senza però quindi dover appoggiarsi alle forme più complesse come le JV.

La scelta di strutture di governance caratterizzate da elevato grado di comunicazione e coordinamento può quindi essere influenzata da situazioni specifiche, come il livello di rischio percepito, l'importanza strategica del progetto, o la necessità di un controllo stretto. Nonostante ciò, i risultati dell'analisi suggeriscono che nella maggior parte dei casi, una governance di livello intermedio risulterebbe più efficace per bilanciare i costi e i benefici.

Un altro aspetto che è stato testato è l'effetto della diversità organizzativa all'interno delle alleanze e come questo influisce sulla performance della collaborazione R&D. Per diversità organizzativa si intende la presenza di attori che appartengono a diversi contesti all'interno della stessa alleanza, come ad esempio alleanze con università o organizzazioni no-profit. Dallo studio risulta che la diversità organizzativa influisca in maniera positiva la relazione tra ODCC e le performance R&D. Questo aspetto è possibile visualizzarlo in *Fig. 14*.

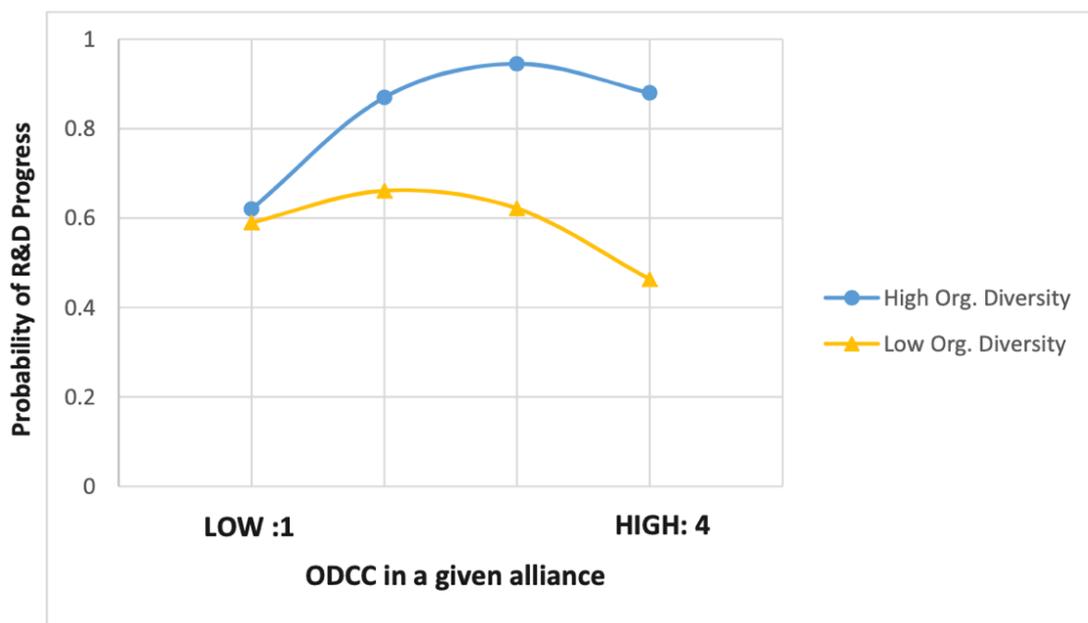


Figura 14 Interazione di ODCC e diversità organizzativa. Fonte: Choi, J., & Contractor, F. J. (2017). *Improving the Progress of Research & Development (R&D) Projects by Selecting an Optimal Alliance Structure and Partner Type*. *British Journal of Management*.

Le alleanze caratterizzate da un'elevata diversità organizzativa portano ad una performance migliore rispetto a quelle con bassa diversità organizzativa. Come si vede dal grafico la probabilità di successo sale fino al 94.3% rispetto alle alleanze in cui collaborano solo competitor diretti. Si nota anche come in questo tipo di alleanze il livello di grado di comunicazione e di coordinamento ottimo trasli verso destra (3), privilegiando così delle forme di governance più strutturate.

### 3.3 Carbon Credits, un'opportunità anche per le SMEs

I Carbon Credits (crediti di carbonio) sono degli strumenti finanziari che rappresentano una quantità di CO2 rimossa o evitata dall'atmosfera. Nel contesto CCU, stanno prendendo piede i crediti derivanti dalla Cattura Diretta dall'Aria (DAC) e questi possono rappresentare un'opzione concreta per le aziende che puntano a compensare le proprie emissioni.

Le aziende stanno iniziando ad investire nei crediti DAC sia per compensare le proprie emissioni ma anche per sostenere lo sviluppo di nuove tecnologie CCU.

Un esempio di azienda che vende questo tipo di crediti è Climeworks<sup>18</sup>. Un'azienda leader nel settore DAC, settore ancora poco sviluppato data la difficoltà nel catturare grandi quantità di CO2 direttamente dall'atmosfera, data la bassa concentrazione di questa. Nel 2024 Climeworks ha raggiunto una milestone importante, l'inaugurazione del plant di cattura "Mammoth", che permette loro di catturare fino a 36 ktonCO2/anno. Lo sviluppo di un impianto di questa portata gli ha permesso di stipulare accordi con altre aziende per rimuovere CO2 per conto loro. Ad esempio, Morgan Stanley ha firmato un accordo con Climeworks per la rimozione di 40 kton di CO2 dall'atmosfera entro il 2037. Un simile accordo è stato anche stipulato da Microsoft, della durata di dieci anni, il tutto supportato dal loro fondo Climate Innovation Fund.

Questi due esempi testimoniano come le imprese si stiano affacciando a questo tipo di tecnologie e possono essere delle opportunità anche per imprese più piccole rispetto a quelle citate prima. Questo tipo di investimenti non solo aiuta le aziende a raggiungere i propri obiettivi di sostenibilità, ma permettono loro di collaborare nello sviluppo di queste tecnologie di cattura e utilizzo del carbonio.

### **3.4 Advanced Market Commitment, un modello di investimento innovativo**

Un Advanced Market Commitment è un modello di investimento volto a sviluppare tecnologie emergenti garantendo una domanda futura per i loro prodotti. In questo modello, un gruppo di acquirenti si impegna ad acquistare una quantità definita di un bene o di un servizio che non è ancora disponibile sul mercato, incentivando così le aziende ad investire in R&D, al fine di poter soddisfare la domanda. Inizialmente l'idea è stata sviluppata dagli economisti agli inizi degli anni 2000. Questo tipo di investimento è tipicamente offerto dai governi o da fondazioni private, proprio per incoraggiare lo sviluppo di tecnologie innovative. Le applicazioni di successo di questo modello sono state nel contesto

---

<sup>18</sup> <https://climeworks.com/>

dei vaccini o trattamenti farmaceutici, accelerando la produzione di cure contro malattie come la polmonite o il covid-19.

Questo modello è stato applicato anche al contesto CCU, per promuovere tecnologie innovative di rimozione e conversione della CO<sub>2</sub>. Sebbene le dinamiche di mercato della rimozione del carbonio e dei vaccini non siano identiche, affrontano sfide simili: incertezza sulla domanda a lungo termine e tecnologie non comprovate. Le AMC hanno il potere di inviare un segnale di domanda forte e immediato senza scegliere le tecnologie vincenti all'inizio. Nel contesto CCU, in particolare, l'esempio più significativo risulta essere Frontier Climate<sup>19</sup>. Questa iniziativa, lanciata nel 2022 da società come Stripe, Google, Shopify, Meta e McKinsey Sustainability, ha impegnato più di un 1 miliardo di dollari per applicazioni di rimozione permanente e riutilizzo del carbonio tra il 2022 e il 2030. L'obiettivo principale è inviare un segnale di domanda a ricercatori, imprenditori e investitori, segnalando che esiste un mercato in crescita per questo tipo di tecnologie. Frontier mira quindi a creare una nuova fornitura di rimozione del carbonio, piuttosto che competere su ciò che esiste già oggi.

### 3.4.1 Come funziona un AMC nel contesto CCU

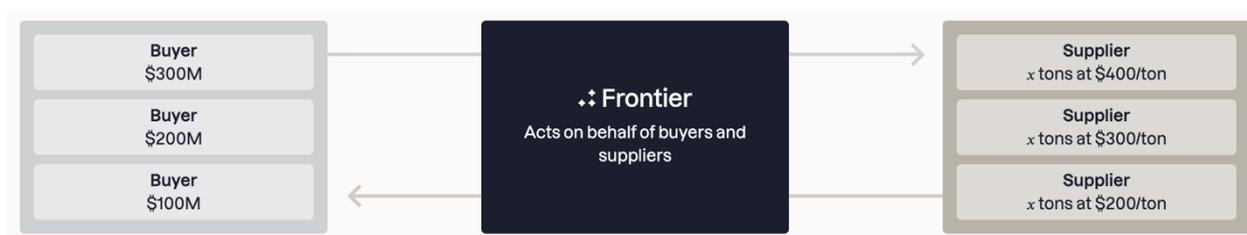


Figura 15 Schema illustrativo di come funziona Frontier. Fonte: <https://frontierclimate.com/>

In Fig. 15 viene mostrato uno schema illustrativo di come un AMC, in particolare Frontier, funziona nel contesto CCU.

1. In primo luogo, Frontier aggrega la domanda per stabilire una spesa massima annuale: ogni acquirente decide quanto vuole spendere per la rimozione del carbonio ogni anno, nella finestra

<sup>19</sup> <https://frontierclimate.com/>

temporale che va dal 2022 al 2030. A questo punto Frontier aggrega tutti gli impegni raccolti per stabilire un pool di domanda annuale totale. Una volta che la domanda è stata formata, i fornitori presentano domanda per essere presi in considerazione nei processi di RFP (Request for Proposal).

2. Come secondo passo, Frontier valuta e seleziona i fornitori e facilita l'acquisto della rimozione del carbonio: tipicamente gli accordi tra Frontier e i fornitori che si occupano della rimozione di carbonio saranno differenti in base alla fase in cui questi si trovano. Per i fornitori in fase iniziale, gli accordi assumeranno probabilmente una forma di preacquisto a basso volume. Invece, per i fornitori più grandi, già pronti a scalare, Frontier faciliterà gli accordi di prelievo per acquistare tonnellate future di rimozione del carbonio a un prezzo concordato, se e quando queste verranno consegnate.
3. In fine, i fornitori procedono alla rimozione del carbonio e restituiscono le tonnellate estratte agli acquirenti: una volta che vengono rimosse le tonnellate di carbonio concordate nel contratto, i fornitori vengono pagati. Nel caso di accordi di prelievo, le tonnellate vengono restituite agli acquirenti.

Questo modello di investimento porta con sé dei vantaggi:

- Riduzione del rischio finanziario: chi fornisce le tecnologie di rimozione e conversione può usufruire di un mercato garantito. Così facendo le aziende operanti nel settore CCU possono accedere a risorse finanziarie con rischi di fallimento minori grazie alla garanzia di un mercato garantito.
- Accelerazione dello sviluppo tecnologico: grazie alla consapevolezza che le loro soluzioni verranno acquistate, le aziende possono investire maggiormente in ricerca e sviluppo.
- Creazione di economie di scala: la domanda garantita permette alle aziende di concentrarsi sulla ricerca e sviluppo, per produrre delle tecnologie più efficienti, in grado di catturare CO<sub>2</sub> su una scala maggiore, andando ad abbassare così i costi.

## 4. Analisi e report del dataset sui progetti CCU

### 4.1 Fonti dataset e numero per progetti per fonte

Per fornire una panoramica completa dello stato di avanzamento dei progetti CCU a livello globale e comprendere la loro diffusione geografica e tecnologica, abbiamo unito e analizzato diversi database disponibili online o forniti previa richiesta da associazioni o enti specializzati del settore. L'obiettivo principale è stato quello di analizzare il quadro generale dell'ecosistema CCU, includendo sia i progetti di ricerca (TRL 3), sia quelli industriali (TRL  $\geq$  8). Pur con una forte predominanza di progetti europei, il database fornisce una base solida per identificare le tendenze tecnologiche e geografiche, evidenziando il potenziale di crescita e i settori chiave da monitorare. Questo lavoro di integrazione e standardizzazione costituisce il punto di partenza per approfondimenti futuri e analisi mirate sulle dinamiche di sviluppo delle tecnologie CCU.

Il dataset finale comprende un totale di 359 progetti CCU, ottenuti attraverso la combinazione delle fonti raccolte in *Tab. 11*.

*Tabella 11 Descrizione dei database utilizzati<sup>20</sup>.*

Overview of integrated datasets and sources

Dataset	Organization	Focus	Selected Projects	Geographic Focus	Last Update	Source
CO2 Value Europe CCU Database	CO2 Value Europe	CCU research projects (TRL 3-7)	278	Primarily Europe	2023	[1]
IEA Industrial CCUS Project Database	IEA	Industrial CCU projects (TRL > 7)	22	Global	March 2023	[2]
IEA Demonstration Projects Database	IEA	Demonstration projects for clean energy technologies (TRL 5-7)	20	Global	Continuously updated	[3]
DAC Coalition's Global DAC Deployments Database	DAC Coalition	Demonstration and industrial DAC projects (TRL > 5/6)	32	Global	Continuously updated	[4]
Additional Non-Catalogued Projects	Not Applicable	Industrial CCU projects (TRL > 8)	7	Global	December 2024	[5]

<sup>20</sup> Database sources:

[1] CO2 Value Europe CCU Database, <https://database.co2value.eu/>

[2] IEA Industrial CCUS Project Database, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/ccus-projects-database>

[3] IEA Demonstration Projects Database, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/clean-energy-demonstration-projects-database>

[4] DAC Coalition's Global DAC Deployments Database, database received upon request, DAC Coalition website: <https://daccoalition.org/the-coalition/>

[5] Progetti singoli aggiuntivi non censiti.

Il principale contributo proviene dal CO2 Value Europe CCU Database, sviluppato da CO2 Value Europe, un'associazione internazionale senza scopo di lucro che rappresenta l'intera catena del valore delle tecnologie CCU in Europa. L'organizzazione comprende oltre 100 membri, tra cui industrie, start-up, università e istituti di ricerca. Questo database si concentra principalmente su progetti di ricerca con TRL compreso tra 3 e 7, con un focus geografico che privilegia l'Europa in quanto l'iniziativa è sostenuta dai programmi europei Horizon 2020 e Horizon Europe. Sono stati selezionati 278 progetti aggiornati al 2023. Un secondo contributo proviene dall'IEA Industrial CCUS Project Database, sviluppato dall'IEA. Questo dataset censisce progetti Carbon Capture Use, Storage (CCUS) con capacità di cattura della CO2 superiore a 100 kt/yr. Con un focus mondiale su progetti industriali avanzati (TRL > 7), il database fornisce una prospettiva sulle tecnologie più mature nel settore. Sono stati selezionati solo i 22 progetti CCU che non risultavano già presenti nel database di CO2 Value Europe. L'IEA Demonstration Projects Database, anch'esso realizzato dallo IEA, mappa i progetti dimostrativi di tecnologie per l'energia pulita. Il focus si concentra su progetti con TRL compreso tra 5 e 7 a livello globale. Da questo database sono stati integrati 20 progetti. Infine, il contributo del DAC Coalition's Global DAC Deployments Database è stato fondamentale per includere progetti Direct Air Capture (DAC). La DAC Coalition, una rete multi-stakeholder con oltre 90 membri, ha fornito informazioni sui progetti dimostrativi e industriali DAC con TRL superiore a 5/6. Sono stati selezionati 32 progetti. In aggiunta, sono stati inclusi ulteriori 7 progetti singoli, le quali date di annuncio sono postume alle date con cui sono stati costruiti i precedenti databases.

Il processo di costruzione del dataset ha seguito un approccio sistematico per garantire la qualità e l'unicità dei dati raccolti. Partendo dal database più corposo di CO2 Value Europe, si è proceduto a integrare i progetti provenienti dagli altri database, selezionando solo quelli non già inclusi nel dataset iniziale. Per i database che non si occupano esclusivamente di CCU, sono stati considerati esclusivamente i progetti con evidenze concrete sull'utilizzo della CO2 catturata. Una volta raccolti, tutti i progetti sono stati integrati nella struttura del database CO2 Value Europe, considerata la più consistente e sistematica. Successivamente, le informazioni sono state uniformate e le voci incomplete

sono state arricchite utilizzando fonti attendibili come comunicati stampa aziendali, siti web ufficiali, articoli di giornale, consorzi di settore e altre risorse affidabili. Nonostante l'integrazione di nuovi progetti da fonti globali, il dataset rimane geograficamente polarizzato verso l'Europa. Questo riflette la maggiore disponibilità di dati e l'elevata concentrazione di progetti CCU nella regione, derivante dal database principale utilizzato.

#### 4.2 Panoramica variabili dataset con tab aggregata per macro-voce

In Tab. 12 è fornita una panoramica dettagliata delle variabili incluse nel CCU project database realizzato. Ogni variabile è accompagnata da una breve descrizione che ne specifica il contenuto e la funzione. Le variabili coprono aspetti chiave dei progetti CCU, tra cui dettagli geografici, finanziari, tecnologici e relativi ai partner coinvolti.

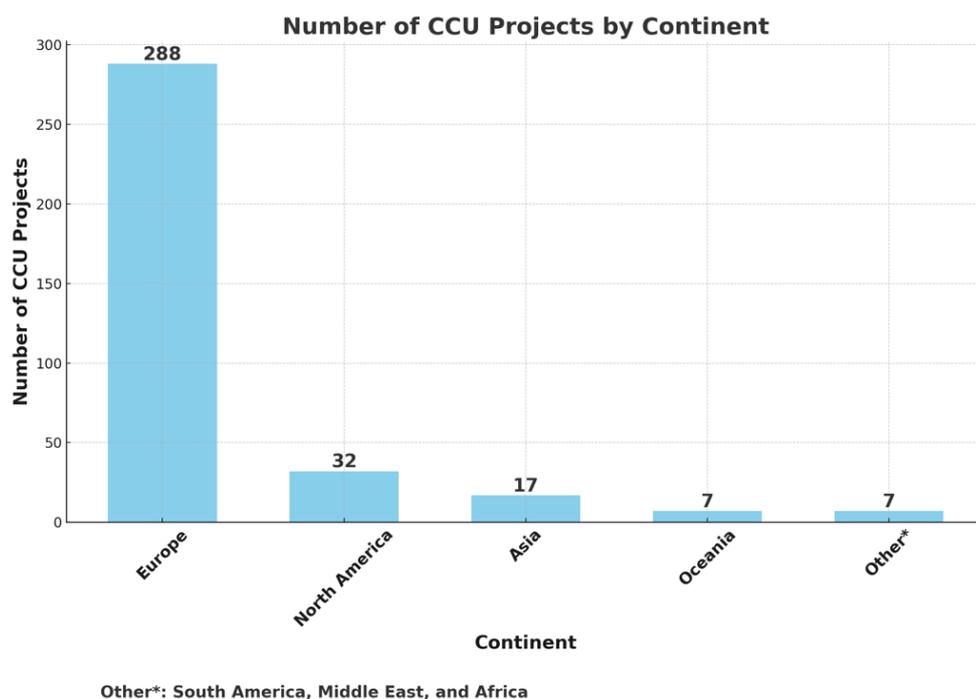
*Tabella 12: Panoramica delle variabili del dataset e loro descrizione.*

**Dataset Overview: Variables and Descriptions**

Variable	Description
Project Name	Name of the project.
Project Lead	Name of the project leader or leading organization.
Location	Localization information including region, country, and city/town.
Start Date - End Date	Project's start and end dates.
Project Status	Current status of the project (e.g., Ongoing, Upcoming, Completed).
Facility Stage	Stage of the facility (e.g., Planned, Under Construction, Operational, Completed).
Project Budget	Total project budget (private + public funding).
% (Public Investment)	Percentage of public investment in the total project budget.
Institution	Public institution that funded the project.
CO2 Source	Source of CO2 utilized in the project (e.g., Atmospheric CO2, Industrial flue gasses).
CCU Technology Category	CCU technology category (e.g., Capture, CCU, DAC).
Start TRL - End TRL	Technology readiness levels at the start and end of the project.
CO2 Capture/Utilization [t/y]	Amount of CO2 captured/utilized in one year by the project.
Production Volume [t/y]	Amount of product realized in one year. If multiple products are listed, this is an average per product.
Specific Product	Specific products created by the project (up to 4 entries per project).
Info on Utilization	Details on CO2 utilization methods (e.g., Catalytic, Thermal conversion).
Product Category	Category of the product realized by the project (up to 4 entries).
Partner	Names of project partners (up to 46 entries per project).

### 4.3 Distribuzione geografica dei progetti CCU

In *Fig. 16* è riportata la distribuzione globale dei progetti CCU suddivisi per continente. La maggior parte dei progetti si concentra in Europa, che ospita ben 288 progetti, seguita dal Nord America con 32 e l'Asia con 17. Oceania e il gruppo Other (Sud America, Medio Oriente e Africa) contano ciascuno 7 progetti.



*Figura 16: Numero di progetti CCU per continente.*

Questa distribuzione evidenzia come l'Europa sia attualmente il centro di gravità per la ricerca e l'implementazione delle tecnologie CCU, probabilmente a causa di normative ambientali più stringenti derivanti da una maggiore attività legislativa e da maggiori incentivi governativi a favore delle attività di R&D. Il contributo modesto di Asia e Nord America suggerisce un potenziale in crescita per la diffusione di queste tecnologie in regioni con grandi cluster industriali emissivi che richiederanno l'implementazione della tecnologia ad oggi in fase di sviluppo.

In *Tab. 13* vengono evidenziati i 15 principali paesi in termini di numero di progetti CCU. Come si può notare, tutti i paesi riportati sono europei ad esclusione di Stati Uniti, Canada e Cina, a conferma della

forte polarizzazione geografica del nostro database. Oltre al totale dei progetti per ogni paese, vengono presentate le percentuali dei progetti per stato di avanzamento.

*Tabella 13: Primi 15 paesi per numero di progetti CCU e la loro attuale Facility Stage.*

**Top 15 Countries per Number of CCU Projects**

Country	Completed	Planned	Under Construction	Operational	Total Projects
<b>Germany</b>	26%	28%	7%	12%	<b>72</b>
<b>Spain</b>	24%	53%	15%	3%	<b>34</b>
<b>France</b>	36%	40%	4%	12%	<b>25</b>
<b>Netherlands</b>	40%	25%	10%	20%	<b>20</b>
<b>Belgium</b>	32%	42%	16%	5%	<b>19</b>
<b>United States</b>	16%	37%	16%	32%	<b>19</b>
<b>Norway</b>	14%	36%	36%	14%	<b>14</b>
<b>Canada</b>	31%	23%	31%	15%	<b>13</b>
<b>Italy</b>	23%	54%	8%	8%	<b>13</b>
<b>Denmark</b>	17%	42%	17%	17%	<b>12</b>
<b>UK</b>	45%	27%	18%	-	<b>11</b>
<b>Greece</b>	9%	55%	9%	-	<b>11</b>
<b>Sweden</b>	10%	70%	20%	-	<b>10</b>
<b>China</b>	56%	11%	33%	-	<b>9</b>
<b>Finland</b>	22%	56%	-	11%	<b>9</b>

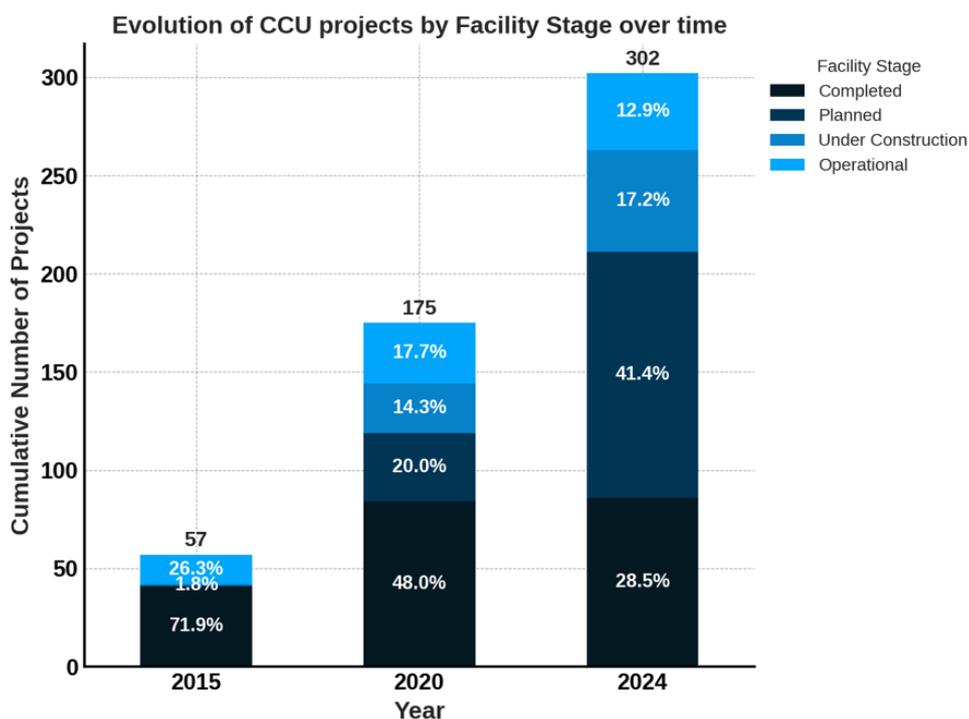
- Completed CCU projects: in media circa il 20% dei progetti CCU censiti tra i primi 15 paesi risultano completati. Da quanto osservato, questi progetti risultano essere progetti di R&D con  $TRL \leq 6$ , volumi di CO2 utilization e produzione relativamente bassi. In questo caso gli impianti pilota sono installati per dimostrare e ottimizzare i processi e la tecnologia utilizzata. In alcuni casi, invece, l'impianto risulta ancora operativo per sfruttare a pieno l'investimento fatto e continuare le attività di ottimizzazione al di fuori di progetti co-sviluppati tra pubblico e privato. Germania, Paesi Bassi e Belgio hanno una percentuale considerevole di progetti completati, segnalando una maturità nelle tecnologie adottate.
- Planned CCU projects: in tale fase le attività di progetto sono concettuali, nella quale l'attenzione è orientata all'identificazione dei finanziamenti, all'ottenimento delle approvazioni normative e all'identificazione delle partnership per lo sviluppo del progetto. In media rappresentano poco più di un terzo di tutti i progetti censiti. In alcuni paesi, i progetti CCU in

pianificazione sono la maggioranza, come in Finlandia (56%), Italia (54%), Spagna (53%), Belgio e Danimarca (entrambe al 42%). Vedere una pianificazione sempre più intensificata nel tempo dimostra un aumento del livello di interesse da parte di governi e privati in queste tecnologie. Da una parte, i governi vedono le tecnologie CCU come asset strategici su cui basare il processo di decarbonizzazione economica-industriale, dall'altra i privati (aziende e investitori) sono mossi da un sistema finanziario incentivante che possa garantire un equo ritorno futuro dei loro investimenti oltre a poter rafforzare la propria competitività sui mercati futuri che sempre più richiederanno prodotti e processi di produzioni sostenibili.

- **Progetti CCU in costruzione:** un progetto CCU per entrare nella fase di messa a dimora deve superare l'approvazione di attori multipli (governativi e non) e garantire equi ritorni sia in termini di ricerca, sia in termini economici. Osservando lo stato attuale di avanzamento progettuale, un progetto CCU impiega mediamente 5-7 anni per entrare nelle fasi operative.
- **Progetti CCU operativi:** Stati Uniti, Canada, Paesi Bassi, Norvegia e Danimarca si distinguono per applicazioni industriali attive. In media, però, risultano pochi progetti CCU operativi in quanto queste pratiche sono capital intensive. La grande percentuale di progetti Planned rispetto a quelli Operational suggerisce che molti paesi sono ancora in una fase embrionale nello sviluppo delle tecnologie CCU. Nonostante il crescente afflusso di capitale, sia privato, sia pubblico, sussiste la necessità di accelerare la realizzazione pratica man mano che la pressione delle alterazioni climatiche si fa più intensa sulle economie di tutto il mondo.

#### **4.4 Trend evolutivo dei progetti CCU**

In *Fig. 17* viene riportato il trend di crescita dei progetti CCU e l'evoluzione dei vari comparti per facility stages.



*Figura 17: Evoluzione dei progetti CCU per facility stage nel tempo.*

Come mostra il grafico, il numero di progetti è aumentato in modo significativo, passando da 57 nel 2015 a 302 (302 e non 359 in quanto 57 progetti non presentano il Facility Stage) nel 2024, con una crescita del +430%. Il che riflette l'aumento di interesse in questo tipo di tecnologie.

Se guardiamo al 2015 la maggior parte dei progetti sono, principalmente, Completed o Operational, con pochissime iniziative pianificate o in costruzione.

La fotografia al 2020 mostra invece una crescita importante in relazione ai progetti Planned e Under Construction. Questo suggerisce una fase di forte espansione per l'ecosistema CCU. Questo aumento di progetti Planned e Under Construction si nota ancor di più al 2024.

I progetti Completed e Operational anche sono aumentati nel tempo, ma sembra con un andamento più lineare. Per i progetti contrassegnati da "Facility Stage = Operational" sembra che la crescita maggiore sia avvenuta nella prima metà dell'intervallo temporale osservato, fino al 2017 circa, per poi rallentare. Questo può stare ad indicare il fatto che la maggior parte dei progetti di utilizzo della CO<sub>2</sub> che sono operativi, siano applicazioni di tecnologie ormai consolidate, come le applicazioni nel processo di EOR nell'industria dell'Oil and Gas. Questo aspetto, in combinazione con quello dei progetti "Planned"

evidenzia quindi un grosso interesse nella materia, ma con una percentuale di conversione dei progetti in operativi che rimane minima. Il fatto che ci siano più progetti completati che operativi significa che solo una parte di questa è destinata ad operare continuativamente, il che può suggerire che per queste tecnologie possono esistere delle barriere tecniche e/o economiche che influiscono sulla loro operatività.

La tendenza riscontrata nel forte aumento dei progetti in fase di pianificazione o di costruzione è probabilmente dovuta a politiche ed incentivi mirati a stimolare questo tipo di tecnologie nel contesto della transizione climatica.

È da notare come il 2015 è stato l'anno in cui è stato pattuito l'Accordo di Parigi (COP 21), che sembra aver dato una spinta alla crescita e allo sviluppo di questo tipo di progetti, in quanto considerati potenzialmente utili a supportare lo sviluppo di prodotti e servizi con un'impronta di CO<sub>2</sub> inferiore e di contribuire alla riduzione delle emissioni, andando in contro agli obiettivi dell'Accordo di Parigi. Nonostante ciò, come sostiene l'IEA, l'utilizzo di CO<sub>2</sub> non può sostituire lo stoccaggio di CO<sub>2</sub> nel fornire la riduzione di emissioni necessarie per soddisfare le ambizioni dell'Accordo di Parigi. Questo si riflette, come si vedrà in seguito, in progetti caratterizzati da una capacità di utilizzo prevista della CO<sub>2</sub> ben minore e in progetti che si trovano ancora nelle fasi iniziali di sviluppo tecnologico e di mercato. L'aumento sostanziale dei progetti annunciati, dopo il 2015, riflette l'impegno globale che si sta cercando di mettere in atto in riferimento alla riduzione delle emissioni di gas serra, per ridurre l'aumento del riscaldamento globale, proprio come richiesto nell'Accordo di Parigi (COP 21).

L'incremento nel numero di progetti può essere quindi associato a tre aspetti:

- Gli obiettivi di decarbonizzazione imposti dall'Accordo del 2015 (il cui obiettivo principale è quello di mantenere “l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali” e di proseguire gli sforzi “per limitare l'aumento della temperatura a 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali”<sup>21</sup>).

---

<sup>21</sup> Fonte: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

- L'aumento degli investimenti pubblici, e di conseguenza anche privati, in progetti che hanno come obiettivo quello di mitigare le emissioni di gas serra.
- L'adozione da parte dei governi di normative più stringenti nei confronti di attori altamente inquinanti nonché di normative incentivanti nei confronti di questi progetti per dare una spinta agli investimenti.

È importante comprendere come il grafico in questione sia una fotografia dei Facility Stage a novembre 2024 e che quindi per ogni anno (start date) venga indicato il facility stage che è osservabile ad oggi. (ad esempio: i primi progetti planned si vedono nell'anno 2016, il che significa che quei progetti che sono contrassegnati con "Start Date = 2016" ad oggi presentano ancora un "Facility Stage" che è "Planned").

#### **4.5 Origine della CO2 nei progetti CCU**

In questa sezione viene presentata un'analisi relativa alle fonti dalle quali viene catturata la CO2 nei progetti di CCU. A questo proposito vengono presentati due grafici che hanno come obiettivo quello di identificare le principali fonti di CO2 catturata dai progetti in esame in termini di numero di iniziative e di impatto effettivo sulla decarbonizzazione nel contesto CCU. Attraverso questa analisi è possibile quindi identificare i settori industriali che svolgono un ruolo chiave nello sviluppo delle tecnologie CCU e nella riduzione delle emissioni di CO2.

### Number of CCU projects per type of CO<sub>2</sub> source

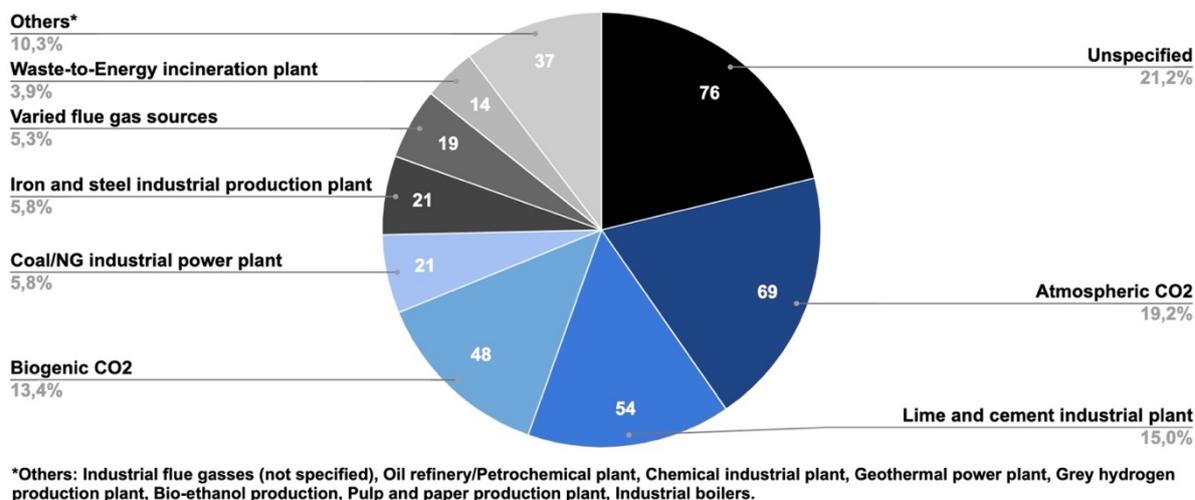


Figura 18: Numero di progetti CCU per tipo di fonte di CO<sub>2</sub>.

Il grafico in Fig. 18 evidenzia diversi aspetti:

- Elevato numero di progetti "Unspecified"*: guardando il grafico si nota immediatamente come la categoria con il maggior numero di progetti sia quella per cui la fonte di CO<sub>2</sub> non è stata specificata, con 75 progetti e il 21,2% sul totale. Nonostante il restante 78,8% dei progetti abbia specificato quale sia la fonte di CO<sub>2</sub>, mostrando anche un'importante diversità tra le fonti, questo aspetto suggerisce una poca trasparenza in termini di diffusione di informazioni da parte dei responsabili dei progetti. Risulta quindi necessaria una migliore trasparenza in questi termini per poter migliorare il tracciamento delle fonti di CO<sub>2</sub>, per valutare più accuratamente l'efficacia e l'impatto dei progetti CCU.
- Categorie dominanti in termini di n° di progetti*: tra le categorie che specificano la fonte di CO<sub>2</sub> quelle dominanti in termini di n° progetti risultano essere "Atmospheric CO<sub>2</sub>", con 69 progetti e il 19,2% sul totale, "Lime and cement industrial plant", con 54 progetti e il 15,0% sul totale e "Biogenic CO<sub>2</sub>", con 48 progetti e il 13,4% sul totale. Queste tre categorie insieme rappresentano quasi la metà (48,2%) dei progetti presenti nel database, evidenziando così in quali industrie e in quali tecnologie (es. DAC) ci si sta concentrando maggiormente in termini di sviluppo dei progetti.

- *Relazione tra fonte di CO2 e settori inquinanti*: La presenza di numerosi progetti, circa il 27%, all'interno di categorie come "Lime and cement industrial plant", "Coal/NG industrial power plant" e "Iron and steel industrial production plant" conferma il fatto che i progetti di CCU sono uno strumento efficace, soprattutto, per le industrie hard-to-abate (settori che sono particolarmente difficili da decarbonizzare a causa delle elevate emissioni che sono il più delle volte non evitabili durante i processi produttivi).

"Lime and cement industrial plant" fa riferimento ai progetti che catturano la CO2 da impianti di produzione di calce e cemento. Questa categoria riflette un settore industriale ad elevata intensità di emissioni, essendo responsabile di circa l'8% delle emissioni globali di CO2<sup>22</sup> e del 18% delle emissioni industriali in Europa<sup>23</sup>. Risulta chiaro il ruolo fondamentale dei progetti CCU in relazione a questa industria per una transizione verso una produzione di calce e cemento ad emissioni nette di CO2 pari a zero.

"Coal/NG industrial power plant" fa riferimento ai progetti che catturano la CO2 da impianti che producono energia a partire da carbone o gas naturale. Anche questo risulta essere uno dei settori che impatta maggiormente l'emissione dei gas serra nell'atmosfera. Nel 2022 la fornitura di energia derivante da fonti non rinnovabili ha rappresentato il 27,4% delle emissioni di CO2 in Europa<sup>24</sup>.

"Iron and steel industrial production plant" fa riferimento ai progetti che catturano la CO2 da impianti che producono ferro e acciaio. Analogamente a quanto detto per i precedenti settori anche questo ha un impatto notevole in termini di gas serra emessi, contribuendo al 22% delle emissioni industriali in Europa<sup>2</sup>.

Questi settori rappresentano delle priorità strategiche per la decarbonizzazione sia a livello Europeo sia a livello globale e l'implementazione di tecnologie di cattura e riutilizzo della CO2 può essere una delle

---

<sup>22</sup> Trends in global CO2 emissions: 2016 Report ©PBL Netherlands Environmental Assessment Agency: [https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2016-trends-in-global-co2-emissions-2016-report-2315\\_4.pdf](https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2016-trends-in-global-co2-emissions-2016-report-2315_4.pdf)

<sup>23</sup> Le emissioni di CO2 di acciaierie, raffinerie e cementifici: <https://www.truenumbers.it/emissioni-di-co2/>

<sup>24</sup> Articolo 20180301STO98928, Parlamento Europeo, 02-12-2024, Emissioni di gas serra nell'UE per paese e settore: Infografica [https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2018/3/story/20180301STO98928/20180301STO98928\\_it.pdf](https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2018/3/story/20180301STO98928/20180301STO98928_it.pdf)

uniche soluzioni per rispettare gli obiettivi di decarbonizzazione globali e regionali (es. European Green Deal).

- *Crescente ricerca verso le soluzioni DAC*: “Atmospheric CO<sub>2</sub>” fa riferimento ai progetti che mirano ad estrarre direttamente la CO<sub>2</sub> dall’atmosfera. L’elevato numero di progetti associati a questa categoria evidenzia il crescente interesse verso le soluzioni di Direct Air Capture (DAC), come tecnologia fondamentale alla decarbonizzazione.

Un aspetto fondamentale da osservare è il livello di partenza nella scala TRL dei progetti DACCU. Più della metà (62,55%) dei progetti DACCU censiti nel database parte da un livello TRL che va dal 3 al 6. Questo aspetto indica come queste tecnologie non abbiano ancora raggiunto una maturità tecnologica e che quindi si trovino in una fase di ricerca, il cui obiettivo è quello di provare la fattibilità tecnica di queste tecnologie. Questo aspetto si può tradurre, come verrà presentato a breve, in un elevato numero assoluto di progetti, ma con un’efficacia minore in termini di cattura di CO<sub>2</sub> (tonnellate/anno). Questo è dovuto principalmente agli elevati costi di cattura della CO<sub>2</sub>. Il forte interesse per queste soluzioni suggerisce come in futuro queste potrebbero crescere in numero e in termini di tonnellate catturate grazie al calo dei costi tecnologici risultanti dall’elevata attività di ricerca.

Vengono riportate le ktCO<sub>2</sub>/yr per tutti i progetti CCU che si trovano al 2024 nel Facility Stage “Operational”. Come si può notare in *Fig. 19*, la quantità di CO<sub>2</sub> utilizzata nei progetti operativi è molto bassa, circa 500 ktCO<sub>2</sub>/yr. Questo ammontare di CO<sub>2</sub> rappresenta meno dell’1% della quantità di CO<sub>2</sub> che si prevede di catturare e utilizzare attraverso progetti di CCU entro il prossimo decennio. È però da notare che nel database su 359 progetti, ci sono solamente 39 progetti operativi. Bisogna quindi chiedersi se questa sia una fotografia reale della quantità di CO<sub>2</sub> catturata ad oggi in progetti di utilizzo della CO<sub>2</sub>. Molto probabilmente, no. Questo a causa della tipologia di progetti che sono censiti all’interno del nostro database, che esclude tutti i progetti che hanno come percorso di utilizzo diretto quello di produzione di urea, nell’industria dei fertilizzanti, e/o di impiego nell’Enhanced Oil Recovery (che si può essere visto come percorso di utilizzo diretto, ma di fatto rappresenta una forma di stoccaggio della CO<sub>2</sub> sottoterra e quindi esula dallo scopo di questa analisi). Si evidenzia questo aspetto

in quanto questi due percorsi rappresentano, ad oggi, le forme di utilizzo più diffuse e affermate e sono già state largamente studiate.

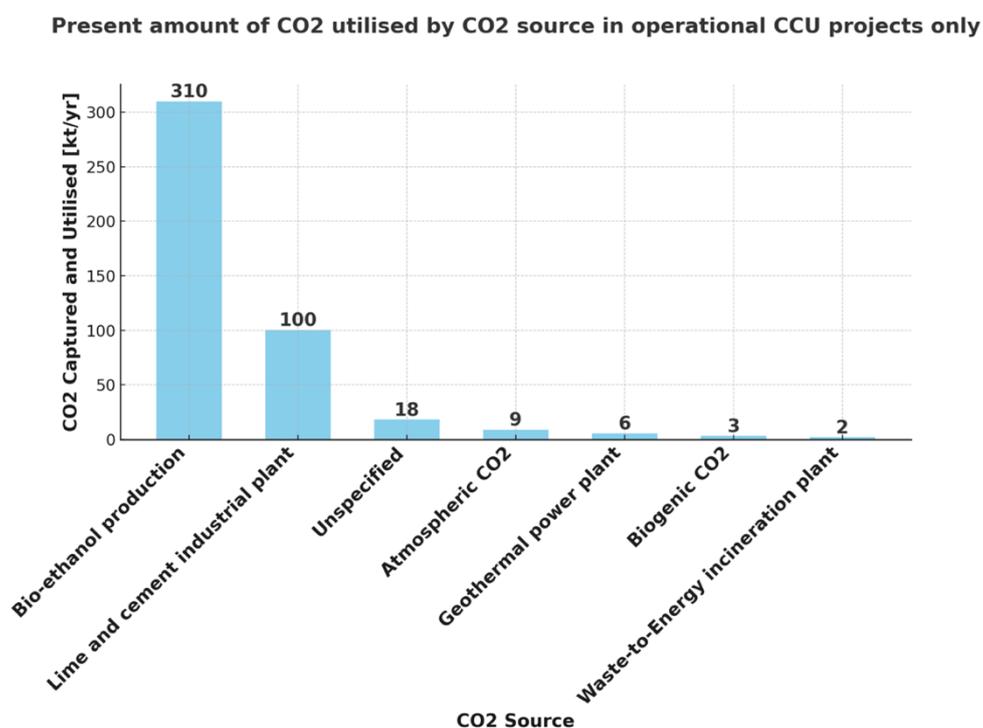
La IEA<sup>25</sup>, infatti, dichiara che attualmente vengono utilizzate circa 230 Mt di CO<sub>2</sub> ogni anno per queste due applicazioni che è un numero ben distante dalle 500kt che emergono dall'analisi dei progetti in nostro possesso. Bisogna quindi evidenziare come il nostro database sia polarizzato su progetti che fanno riferimento a percorsi di utilizzo ancora inesplorati a livello industriale e che si trovano in una fase iniziale dello sviluppo tecnologico, tipicamente in una fase di ricerca, come ad esempio i nuovi percorsi di utilizzo nella produzione di combustibili sintetici, prodotti chimici e aggregati edili a base di CO<sub>2</sub>. Dei 39 progetti operativi 25 rientrano proprio in questi percorsi. Per forza di cose, iniziative di questo tipo, seppur già operative, non hanno le stesse capacità di cattura ed utilizzo dei percorsi visti prima che sono disponibili sul mercato da molto tempo. A supporto di questo, sempre l'IEA<sup>5</sup> dichiara che, secondo la pipeline di progetti da loro monitorata, poco meno di 15 MtCO<sub>2</sub> all'anno potrebbero essere catturati per questi nuovi usi entro il 2030. Dato che risulta essere più in linea con quanto trovato in questo report, come si vedrà anche successivamente analizzando l'ammontare pianificato per il prossimo decennio di CO<sub>2</sub> catturata ed utilizzata.

Rispetto alla *Fig. 19*, è da notare come i settori più inquinanti da cui proviene la CO<sub>2</sub>, di cui si è parlato prima, non sono rappresentati in quanto gli impianti di cattura risultano essere attualmente in fase di sviluppo (Planned o Under Construction). Questo ritardo, nel coinvolgimento di queste industrie, nell'adottare queste soluzioni tecnologiche è probabilmente dovuto alla mancanza di roadmap e piani strategici chiari da parte degli stati, governi e istituzioni. Ad esempio, l'Unione Europea dopo la pubblicazione del New Green Deal del 2019 ha intrapreso una serie di iniziative per regolamentare le industrie più inquinanti e promuovere tecnologie sostenibili, come le stesse CCU. È stato introdotto un piano industriale chiaro per guidare l'industria Europea verso uno scenario a zero emissioni nette e ridurre il riscaldamento globale. Questi aspetti hanno fornito una roadmap chiara per le industrie più

---

<sup>25</sup> <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/co2-capture-and-utilisation>

inquinanti, che grazie anche a degli incentivi, si stanno muovendo verso l'adozione di soluzioni come gli impianti di cattura di CO<sub>2</sub>, contribuendo così a colmare il loro ritardo rispetto alla transizione ecologica.



*Figura 19: Quantità attuale di CO<sub>2</sub> utilizzata per fonte di CO<sub>2</sub> nei progetti CCU operativi.*

Vengono ora riportate le MtCO<sub>2</sub>/yr per tutti i progetti CCU indipendentemente dal Facility Stage. Si nota che su 359 progetti, 236 non riportano le tonnellate di CO<sub>2</sub> catturata ed utilizzata, in quanto più dell'80% di questi si trovano in una fase di dimostrazione tecnologica (TRL < 7) con volumi di CO<sub>2</sub> utilizzati trascurabili su scala industriale. Dei 123 progetti considerati nel grafico in *Fig. 20*, il 71,5% è censito con Facility Stage under construction o planned, a questo proposito la figura riporta la capacità di cattura e utilizzo dei progetti CCU pianificata per il futuro.

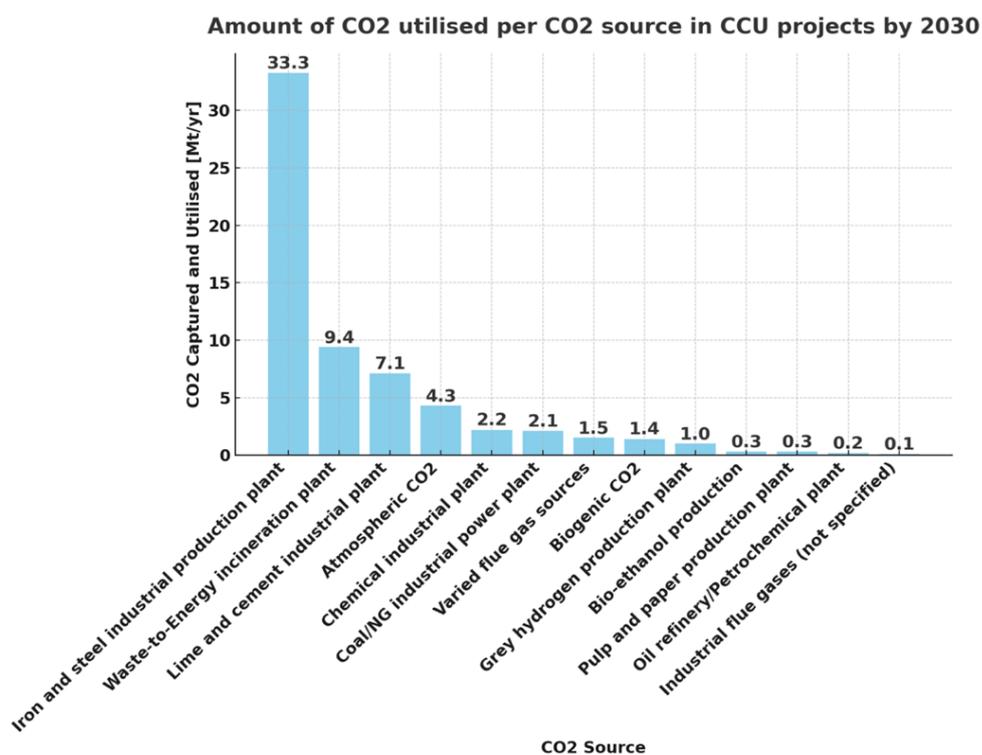
Osservando il grafico in *Fig. 20*, emerge un forte disallineamento tra quella che è la distribuzione dei progetti, come visto in *Fig. 18*, e la quantità effettiva di CO<sub>2</sub> catturata.

“Iron and steel industrial production plant” è la prima fonte di CO<sub>2</sub> cattura e utilizzata e rappresenta il 53% di tutta la CO<sub>2</sub> pianificata, nonostante il numero di progetti relativi a questa fonte risulta essere

solamente pari al 5,8%. Questo aspetto suggerisce come i progetti in questo settore stiano venendo sviluppati su scala industriale, al fine di catturare grandi volumi di CO<sub>2</sub>.

Le altre categorie rappresentate risultano essere nettamente inferiori alla prima. “Waste-to-Energy incineration plant”, con 9,4 MtCO<sub>2</sub>/yr rappresentanti il 15% sul totale, e “Lime and cement industrial plant”, con 7,1 MtCO<sub>2</sub>/yr rappresentanti l’11%, mostrano comunque una quota significativa di CO<sub>2</sub> catturata e utilizzata. Questi numeri sono coerenti anche con il numero di progetti sviluppati. Infatti, insieme rappresentano il 26% della CO<sub>2</sub> utilizzata, mentre i progetti rappresentano poco meno del 20%. Per quanto riguarda “Atmospheric CO<sub>2</sub>”, la capacità di cattura e utilizzo stimata risulta essere di 4,3 MtCO<sub>2</sub>/yr, rappresentante solamente il 7% della CO<sub>2</sub> totale. Questo dato evidenzia, come già spiegato in precedenza, che le tecnologie di Direct Air Capture risultano essere ancora in una fase di sviluppo. Per questo motivo e per la bassa concentrazione di CO<sub>2</sub> nell’aria, le prestazioni di queste tecnologie DAC non sono comparabili con i progetti industriali in termini di volumi catturati.

Mentre nel grafico in *Fig. 19* non vi erano rappresentati i settori più inquinanti, si nota che per quanto riguarda la capacità programmata questi risultano essere quelli maggiormente attivi. Infatti, i settori “Iron and steel”, “Waste-to-energy” e “Lime and cement” risultano essere la priorità in termini di decarbonizzazione. L’elevata percentuale di capacità pianificata in questi settori conferma gli sforzi nello scalare le tecnologie CCU da parte delle istituzioni, al fine di rendere meno inquinanti queste industrie.



*Figura 20: Quantità di CO2 utilizzata per fonte di CO2 nei progetti CCU entro il 2030.*

Nonostante la fonte di CO2 sia un aspetto chiave nel valutare i benefici climatici associati all'uso di CO2, non è sufficiente. Infatti, la quantità di CO2 utilizzata in un prodotto non è la stessa quantità di emissioni di CO2 evitate. L'utilizzo di CO2 non riduce necessariamente le emissioni. A differenza del CCS, la maggior parte delle applicazioni che utilizzano CO2 alla fine rilasciano comunque la CO2 nell'atmosfera. Si può dire che il beneficio associato all'utilizzo di un prodotto derivato dalla CO2 risulti dalla sostituzione dello stesso prodotto equivalente caratterizzato da emissioni di CO2 più elevate durante il ciclo di vita, come i combustibili fossili, i prodotti chimici o i materiali edili convenzionali. È quindi necessario comprendere come la fonte di CO2 non sia l'unico aspetto da tenere in conto. Ci sono quattro ulteriori considerazioni chiave che si devono fare nel valutare i benefici climatici associati all'utilizzo di CO2:

- Fonte di CO2
- Il tipo di prodotto a base di CO2 che si sta sostituendo
- Quanta e quale tipo di energia viene utilizzata per convertire la CO2
- Per quanto tempo la CO2 viene ritenuta nel prodotto: temporaneamente o permanentemente

Catturare la CO<sub>2</sub> da settori altamente inquinanti è sicuramente il primo anello della catena, ma è necessario comprendere che per fornire dei benefici climatici, l'utilizzo di energia (punto 3 dell'elenco sopra) a basse emissioni di carbonio risulta essere fondamentale.

Per poter centrare l'obiettivo di emissioni nette pari a zero, la CO<sub>2</sub> dovrà sempre più provenire dalla biomassa o dall'atmosfera, grazie al DAC. Queste sono le fonti che possono supportare un ciclo di vita carbon-neutral per alcune applicazioni di utilizzo della CO<sub>2</sub> e generare emissioni negative in applicazioni in cui il carbonio è immagazzinato in modo permanente, come ad esempio nei materiali da costruzione. Tuttavia, in generale, queste opportunità sono probabilmente molto limitate e sottosviluppate ad oggi, come si è visto anche dalla capacità pianificata per dispositivi DAC.

#### **4.6 Categorie di prodotto dai progetti CCU**

Viene ora riportato il numero di progetti CCU suddivisi per categorie di prodotti ottenuti dalla conversione della CO<sub>2</sub>. In *Tab. 14.a* si possono osservare i progetti divisi per numero di categorie di prodotto associate. Ciò significa che se un progetto ha una sola Product Category sarà focalizzato solamente su quello, mentre se sono specificate più di una Product Category (due o tre) il progetto si occuperà di sviluppare più tipologie di prodotto e avrà quindi uno spettro più ampio in tal senso.

Osservando la *Tab. 14.a* si osserva che i progetti che si occupano di sviluppare una singola categoria di prodotto sono dominanti rispetto ai progetti che si occupano di due o tre categorie di prodotto. I progetti a singola categoria sono 264, mentre il numero si riduce a 87 per i progetti con due categorie di prodotto e a 8 per quelli con tre categorie di prodotto.

Questo aspetto, che emerge, indica come la maggioranza dei progetti sia focalizzata su applicazioni specifiche. Aspetto probabilmente dovuto al fatto che molti progetti si trovano ancora in fase di ricerca e sviluppo, il che non permette, principalmente per mancanza di risorse, di esplorare molteplici applicazioni. Progetti sviluppati a livello industriale, tipicamente, fanno utilizzo più percorsi per l'utilizzo della CO<sub>2</sub>, grazie allo sviluppo tecnologico avanzato e alla piena operatività dell'impianto. Limitare il numero di applicazioni può tradursi, probabilmente, in una minor complessità tecnica e,

come già accennato, in un'ottimizzazione dei risultati tecnologici. Allo stesso modo il basso numero di progetti multi-categoria è sintomo di una difficoltà nello sviluppare e integrare più tecnologie insieme. Infatti, è stata riscontrata una difficoltà nello scalare questo tipo di tecnologie, quando sviluppate singolarmente, a maggior ragione quando se ne sviluppano molteplici insieme.

La *Tab. 14.b* suddivide i progetti CCU in base alla categoria specifica di prodotto. Si fa presente che il numero di progetti riportato in questa tabella è maggiore rispetto ai 359 censiti nel database. Questo è dovuto al fatto che i progetti con più di una categoria sono stati divisi per permettere di contare quanti progetti si occupano di una specifica Product Category senza tener conto di quante categorie hanno associate. In questo modo qui si è riusciti a trovare il numero di progetti che si occupano delle specifiche categorie.

“e-Fuels” è la categoria più rappresentata con 146 progetti, rappresentante il 31,6%, che si occupano di conversione di CO<sub>2</sub> in carburanti sintetici. L'elevato numero di iniziative in questo ambito evidenzia il forte interesse verso i combustibili sintetici come applicazione chiave per il CCU. Questo è dovuto sicuramente alle normative in merito alle auto a combustione, che ad oggi utilizzano esclusivamente combustibili fossili. Questo tipo di applicazione potrebbe quindi rappresentare una soluzione alternativa rispetto alla transizione forzata verso il motore elettrico.

“Chemicals” è la seconda categoria di prodotto per numero di progetti, con 100 iniziative e il 21,6% del totale. Come già specificato nel paragrafo precedente queste tipologie di applicazione sono nuove sul mercato e l'elevato numero mostra l'impegno nella ricerca e lo sviluppo delle stesse.

“Captured CO<sub>2</sub>” fa riferimento a tutti quei progetti che catturano CO<sub>2</sub> e affermano che verrà destinata all'utilizzo, ma che non hanno reso noto quale sarà l'applicazione. Il numero è elevato, con 72 progetti e il 15,6% sul totale. Di nuovo torna l'aspetto sulla trasparenza delle informazioni, che non permette di monitorare in maniera del tutto efficiente lo stato dei progetti.

“Building materials” presenta anche un numero interessante di progetti, 36 e quasi l'8% sul totale. Questa risulta essere una delle nuove applicazioni più interessanti in quanto permette di utilizzare la CO<sub>2</sub> in maniera permanente, andandola a stoccare all'interno dei materiali da costruzione e quindi non immettendola nuovamente nell'atmosfera.

Le altre categorie risultano avere delle percentuali minori, che rimangono comunque rilevanti, ma che potrebbero rappresentare delle nicchie di mercato (escluse Food/feed e Fertilizers) non scalabili in maniera efficiente.

Questa tabella mostra una concentrazione sulle tecnologie più promettenti, come e-Fuels, Chemicals e Building Materials. Tuttavia, le categorie minori suggeriscono aree di potenziale crescita futura.

*Tabella 14: a) Numero di progetti CCU per conteggio di categoria di prodotto associato; b) Numero di progetti CCU per categoria di prodotto.*

a) Number of CCU projects by associated product category count:		b) Number of CCU projects by product category:		
Project Class	Number of CCU projects	Product Category	%	Number of CCU projects
1 Product category	264	e-Fuels	32%	146
2 Product categories	87	Chemicals	22%	100
3 Product categories	8	Captured CO2	16%	72
<b>Total</b>	<b>359</b>	Building materials	8%	36
		Biofuels	5%	25
		Polymers	3%	16
		Biochemicals	3%	16
		Governance & cluster development activities	3%	14
		Food/Feed	3%	12
		Fertilizers	2%	10
		Power and Heat	2%	9
		Consumer goods	1%	3
		Fuels	1%	3
		<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>462</b>

*Tabella 15: Percentuale di progetti per ogni stato di progetto suddivisi per categoria di prodotto; TRL medio di inizio e TRL medio di fine per categoria di prodotto.*

Percentage of projects for each project status broken down by product category; Average Start TRL and Average End TRL by product category.							
Product Category	Completed (%)	Ongoing (%)	Upcoming (%)	Count	Average Start TRL*	Average End TRL*	
e-fuels	31%	60%	10%	146	6,4	7	
Chemicals	36%	62%	2%	100	5,3	5,9	
Captured CO2	33%	63%	3%	72	5,7	6,6	
Building Materials	28%	64%	8%	36	6,1	7,1	
Biofuels	72%	28%	0%	25	4,3	6	
Biochemicals	75%	25%	0%	16	6	6	
Polymers	69%	31%	0%	16	3,5	5,8	
Governance & Cluster Development Activities	50%	50%	0%	14	3	6,4	
Food/Feed	67%	25%	0%	12	9	9	
Fertilizers	40%	60%	0%	10	7,5	8,2	
Power and Heat	33%	56%	11%	9	9	9	
Consumer Goods	33%	67%	0%	3	-	4	
Fuels	67%	33%	0%	3	3,5	5	

\*Calculated on projects that specify this information.

In Tab. 15 è fornita una panoramica della distribuzione dei progetti di cattura e utilizzo della CO2 in base alle categorie di prodotto, distinguendo i progetti completati, in corso e futuri. Vengono inoltre

riportati il numero totale di progetti per ciascuna categoria, il livello di maturità tecnologica iniziale (Average Start TRL) e finale (Average End TRL).

Le categorie di prodotto con il maggior numero di progetti risultano avere una predominanza di progetti in corso (Ongoing). Infatti, e-Fuels, Chemicals, Captured CO2 e Building Materials, rappresentanti il 78% dei progetti all'interno del database, risultano avere tutti e quattro più del 60% dei progetti nello stato di progetto "in corso". Questo evidenzia come, ad oggi, le tecnologie di conversione della CO2 in queste categorie risultino quelle di maggiore interesse per lo sviluppo nel contesto CCU. È quindi chiaro che i prodotti di maggiore interesse risultino essere applicazioni legate ai carburanti sintetici, a prodotti chimici e ai materiali da costruzione. Si nota inoltre come per le altre categorie di prodotto (con un numero significativo di progetti) la maggior parte dei progetti risulti completato (Completed). Questo aspetto sembra suggerire o delle tecnologie già mature, come Fertilizers, Power and Heat e Food/Feed, o tecnologie per le quali l'interesse globale è inferiore, visto anche il numero di progetti futuri che risulta nullo.

Guardando sia al TRL<sup>26</sup> medio di inizio sia al TRL medio di fine si possono fare delle considerazioni sullo stato di avanzamento tecnologico delle varie applicazioni in esame. Partendo dalle quattro categorie di prodotto con il maggior numero di progetti, già discusse precedentemente, si nota come il delta tra il TRL medio di inizio e quello di fine non superi mai l'unità. Questo indica che le tecnologie in esame si stanno sviluppando, ma non velocemente. Questo delta ristretto può indicare una fase di parziale stallo nello sviluppo, in concomitanza con il passaggio dalla dimostrazione in laboratorio alla dimostrazione in ambiente operativo rilevante con impianti pilota.

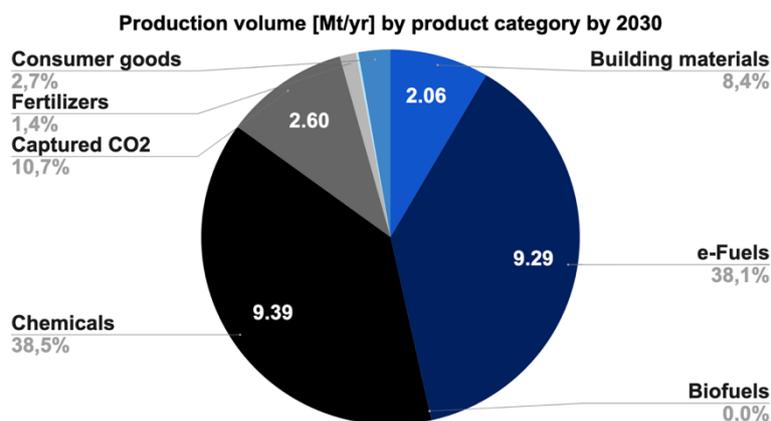
Per quanto riguarda le altre categorie si nota più eterogeneità rispetto sia allo stato di inizio e fine TRL sia all'avanzamento tecnologico (delta TRL). Escluse le categorie con TRL molto elevati, che indicano tecnologie ormai mature da anni, come Fertilizers, Power and Heat e Food/Feed, le altre presentano un delta TRL medio maggiore rispetto alle quattro categorie discusse in precedenza. Questo aspetto

---

<sup>26</sup> Per una panoramica sul Technology Readiness Level (TRL) si guardi il paragrafo 4.7.

potrebbe indicare la maggior facilità nell'avanzamento tecnologico per tecnologie per le quali l'interesse globale è minore.

Di seguito vengono riportati i volumi di produzione pianificati associati alle diverse categorie di prodotti CCU. Il grafico in *Fig. 21* mostra il volume produttivo associato a 92 progetti, gli unici ad aver reso noti i volumi attesi di produzione. I volumi di produzione si allineano alle tendenze mostrate dal grafico precedente. Chemical, e-Fuels, CO2 Captured e Building materials rappresentano la quasi totalità dei volumi di produzione pianificati. Questo suggerisce come progetti di questo tipo siano prioritari nella pipeline CCU sia in termini di numero di progetti sia in termini di output produttivo.



*Figura 21: Volume di produzione [Mt/anno] per categoria di prodotto.*

#### **4.7 Livelli TRL per progetti CCU in Europa**

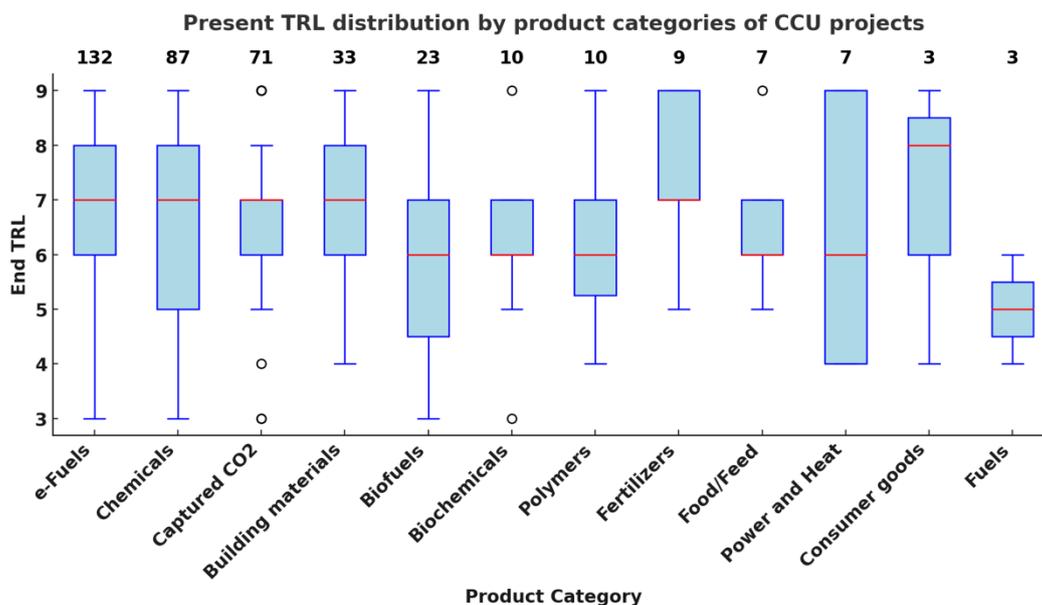
Di seguito viene riportata la distribuzione dei livelli TRL (Technology Readiness Level) finali per categoria di prodotto nei progetti CCU. La scala TRL si sviluppa dal valore 1 al valore 9 e in *Tab. 15* sono riportati gli stati associati ad ogni livello.

Tabella 16: panoramica dei Technology Readiness Levels (TRL).

**Technology Readiness Levels (TRL) Overview**

TRL	TRL Status
1	Basic Principles
2	Technology concept formulated
3	Experimental Proof of Concept
4	Technology validated in lab
5	Technology validated in relevant environment
6	Technology demonstrated in relevant environment
7	System prototype demonstration in operational environment
8	System completed and qualified
9	Actual system proven and scaled in operational environment

I progetti analizzati in questa sezione sono quelli per cui risulta compilata la voce End TRL, 314 su 359. In *Fig. 22* sono rappresentati diversi box plot che mostrano la distribuzione dei livelli TRL per ogni categoria di prodotto presente nel database. Le categorie di prodotto sono ordinate da sinistra verso destra in base al numero di progetti considerati per costruire la statistica. Le linee rosse stanno ad indicare la mediana, che indica il valore TRL tipico o centrale per i progetti di ciascuna categoria di prodotto.



*Figura 22: attuale distribuzione TRL dei progetti CCU per product category.*

E-Fuels, Chemicals e Captured CO2 sono le categorie più rappresentate e presentano livelli TRL mediani uguali a 7. Tra queste tre categorie, Chemicals risulta essere quella con il range interquartile (IQR) più ampio, è quindi caratterizzata da una maggiore variabilità rispetto a e-Fuels e a Captured CO2, il che evidenzia che il 50% dei progetti centrali si occupa di tecnologie molto differenti tra loro, con TRL che variano da 5 a 8. Per quanto riguarda e-Fuels il 50% dei valori centrali sono caratterizzati da TRL che varia da 6 a 8. Rispetto a Chemicals, quindi, i progetti risultano sviluppare tecnologie più concentrate su livelli superiori. Per quanto riguarda Captured CO2, si nota che il range interquartile varia da 6 a 7, evidenziando una concentrazione ancora maggiore rispetto a e-Fuels, ma su livelli leggermente più bassi. Osservando i baffi per il box plot di e-Fuels, si osserva come la dispersione dei progetti inferiori al primo quartile sia molto ampia, con alcuni progetti che partono dal TRL 3. Il baffo superiore risulta essere meno diffuso, con valore massimo uguale a TRL 9. Lo stesso si osserva per quanto riguarda Chemicals, che mostra progetti a partire da TRL 3, ma con un baffo inferiore più corto. Il baffo superiore risulta essere identico a quello di e-Fuels. Per quanto riguarda Captured CO2 si osserva invece che la maggior parte dei progetti si concentra intorno a livelli TRL che vanno da 5 a 8. Tuttavia, sono presenti 3 outliers, che rappresentano dei valori anomali rispetto alla distribuzione, con TRL molto elevato (9) o TRL molto basso (3 o 4). Ricordiamo però che questa categoria raggruppa

tutti quei progetti per cui non è stata resa nota l'applicazione e l'utilizzo della CO<sub>2</sub>. Questo fa sì che all'interno di queste categorie rientrino tecnologie anche molto diverse tra di loro.

Per quanto riguarda le categorie meno rappresentate (n° progetti  $\leq 33$ ) troviamo Building Materials, Biofuels, Biochemicals e Polymers, come categorie rilevanti. Building Materials presenta la mediana più elevata tra queste categorie, che coincide con il valore 7 della scala TRL. Biofuels, Biochemicals e Polymers, hanno la mediana al livello 6. I progetti relativi alla categoria di prodotto Building Materials si sviluppano su un intervallo TRL che varia da 4 a 9, con il 50% dei progetti centrali che varia tra 6 e 8. In generale risulta essere una categoria mediamente sviluppata, che sta andando nella direzione della commercializzazione. Tuttavia, presenta anche dei progetti al livello 4, il che significa che si sta lavorando per validare la tecnologia in laboratorio. Biofuels mostra una distribuzione altamente variabile con progetti che vanno da TRL 3 a TRL 9, suggerendo anche qui la presenza di numerose tecnologie sostanzialmente diverse tra di loro che si trovano in fasi differenti di sviluppo tecnologico. Il range interquartile si assesta tra TRL 5 e TRL 7, suggerendo un avanzamento tecnologico leggermente in ritardo rispetto alla categoria Building Materials. La categoria Biochemicals è concentrata tra TRL 6 e TRL con alcuni progetti che partono dal livello 4. Sembra, in questo caso, che ci sia una omogeneità tra le tecnologie, che si trovano nella fase di dimostrazione in ambienti rilevanti, tramite impianti pilota. Questa categoria presenta anche due outliers, uno al livello massimo (9) e uno al livello 3. Le restanti categorie presentano un numero minore di progetti e le rappresentazioni potrebbero non risultare significativa. In Generale si riscontra che la maggior parte dei progetti tra le varie categorie si attesta su dei livelli che variano da 5 a 8, suggerendo una buona spinta nella ricerca e nella dimostrazione di queste tecnologie, senza però aver ancora raggiunto la fase di commercializzazione su scala industriale. Per ampliare l'analisi su questo aspetto più generale si presenta in Fig. 23 un istogramma che permette di visualizzare la distribuzione dei progetti sulla scala TRL. In Fig. 23.a è stata riportata la distribuzione dei soli progetti operativi mentre in Fig. 23.b quella di tutti i progetti. I dati sono stati poi normalizzati per facilitare il confronto.

Si nota subito come la quasi totalità dei progetti operativi sia caratterizzato da un TRL che è concentrato tra 6 e 9. Mentre per la distribuzione di tutti i progetti (che si ricorda comprendono progetti completi,

planned e under construction, oltre agli operativi considerati anche nell'altro grafico) risulta molto più variabile con molti progetti che si trovano tra il livello 3 e il livello 6. Si nota una percentuale minore di TRL 7 rispetto a quelli operativi e un aumento nel numero di progetti nelle fasi iniziali di sviluppo (3-5).

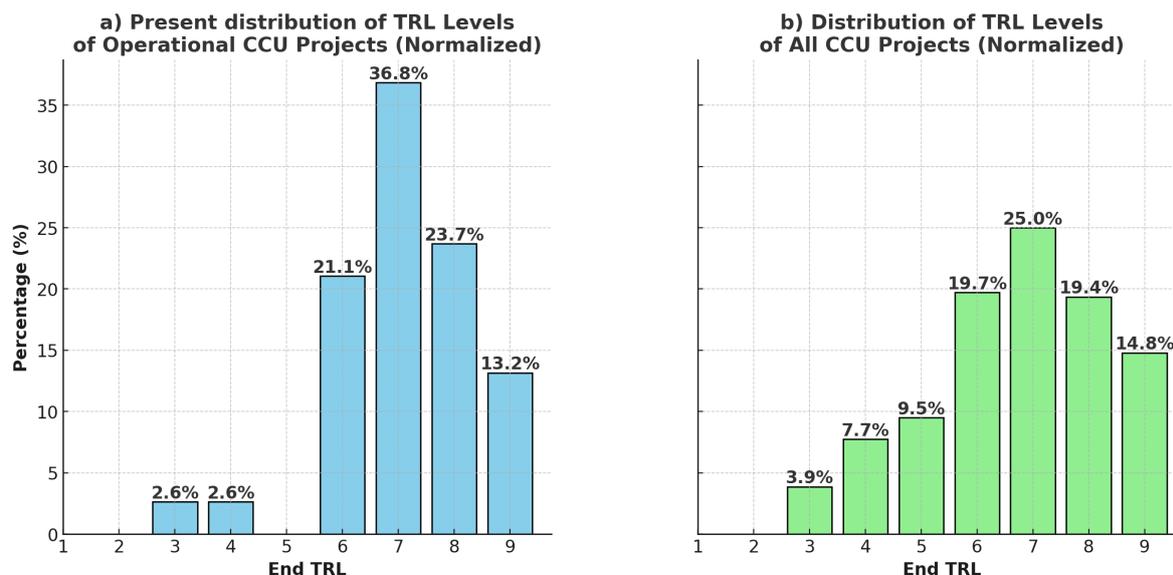


Figura 23: a) Attuale distribuzione dei livelli TRL dei progetti CCU operativi (Normalizzata); b) Distribuzione dei livelli TRL di tutti i progetti CCU (Normalizzata).

#### 4.8 Project Budget dei progetti CCU in Europa

Di seguito viene presentata la distribuzione dei budget di progetto per i paesi Europei, distinguendo tra partecipazioni pubbliche e private.

In Fig. 24 è possibile osservare quali paesi Europei hanno investito maggiormente in progetti CCU dal 2009 al 2024 e quale porzione è a carico di istituzioni pubbliche. Per questa analisi sono stati selezionati 100 progetti dei 359 presenti nel database. Questo per fornire una fotografia il più veritiera possibile della porzione finanziata dalle istituzioni pubbliche e di quella finanziata da investitori privati. Infatti, solo questi 100 progetti europei hanno esplicitamente reso accessibile a stakeholders esterni la porzione finanziata dalle istituzioni. Gli altri progetti sono invece stati esclusi in quanto portano alla distorsione dei risultati, risultando quasi sempre finanziati al 100% da privati, aspetto altamente improbabile nel

contesto CCU. Nonostante ciò, il numero di progetti con informazioni completa sono sufficienti per definire la tendenza di partecipazione finanziaria pubblica media per l'ecosistema CCU.

Dal 2009 al 2024 sono stati investiti circa 4,5 miliardi di € (considerando tutti i progetti Europei presenti nel dataset) e in media il 72% del budget progettuale arriva da istituzioni pubbliche (considerando i soli progetti con informazioni completa per quanto riguarda il budget di progetto).

I paesi con il project budget complessivo più levato sono la Germania e la Svezia, con 320,5 Milioni e 253,1 milioni rispettivamente. Entrambi questi paesi mostrano un equilibrio tra contributo privato e pubblico; infatti, la Germania risulta essere finanziata al 50% dal pubblico e al 50% dal privato, aspetto che si riscontra anche per la Svezia. Il Belgio risulta il paese con il minor contributo pubblico, con solo il 33%. Spostandosi verso destra si osservano i pesi con Project Budget complessivi minori. Si nota come dall'Olanda andando verso destra la partecipazione pubblica risulta maggiore, sempre maggiore del 60%. Si riscontra una tendenza generale per la quale i paesi con budget complessivi più elevati facciano maggiore affidamento su fonti private di finanziamento. Al contrario, i paesi con budget complessivi inferiori mostrano una forte dipendenza dai finanziamenti pubblici. Questo aspetto suggerisce una correlazione tra dimensione dei progetti, di conseguenza ammontare del project budget, e il grado di coinvolgimento del settore pubblico. Progetti più piccoli sembrano ottenere più facilmente investimenti pubblici rispetto a progetti molto grossi, che poi sono quelli che fanno lievitare il project budget complessivo nei paesi ad elevato project budget.

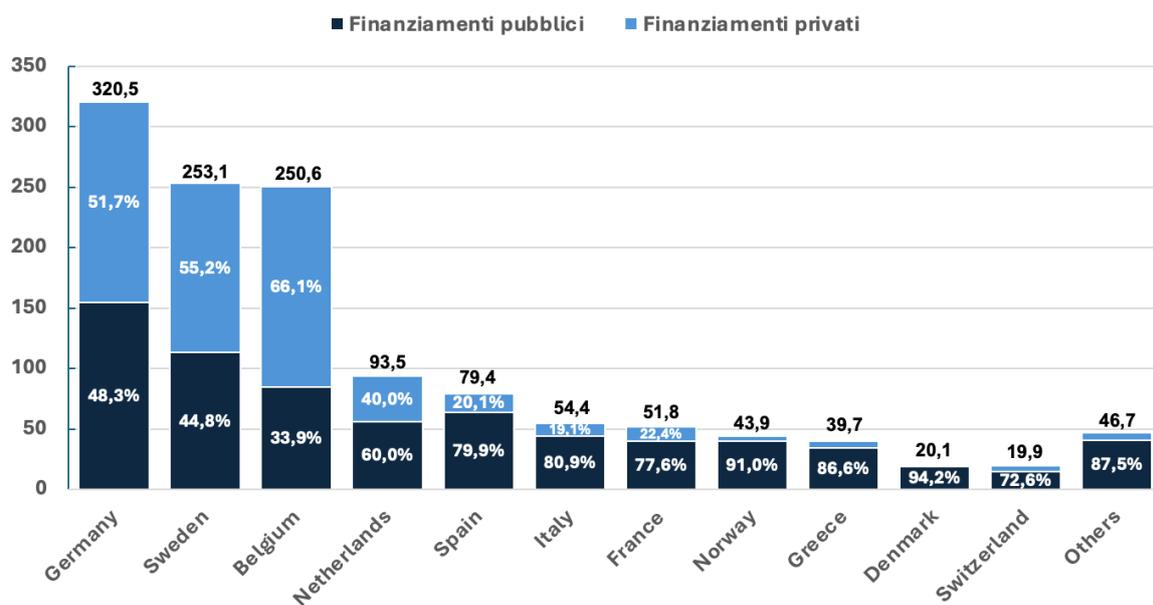


Figura 24: Project Budget, in milioni di €, divisa per partecipazione privata/pubblica e paese (UE).

#### 4.9 Focus Italia

In Tab. 16 sono riportati i soli progetti CCU italiani, da cui si possono evidenziare le principali tendenze che caratterizzano il panorama nazionale. L'Italia (come l'Europa) si distingue per un significativo numero di progetti incentrati su categorie di prodotto quali "e-Fuels", "Chemicals" e "Biofuels". Queste categorie riflettono un forte orientamento verso lo sviluppo di soluzioni per la decarbonizzazione dei settori energetico, chimico e dei trasporti, con un focus particolare sulla produzione di combustibili sostenibili e prodotti chimici innovativi. Un esempio sono i progetti CONDOR, DESIRED EcoCO<sub>2</sub> per l'ottimizzazione del processo di conversione fotoelettrochimica della CO<sub>2</sub> per la produzione di e-Fuels, il progetto Biowalk4Biofuels, guidato dall'Università di Roma La Sapienza, che utilizza CO<sub>2</sub> biogenica per produrre biofertilizzanti e biomethane attraverso processi enzimatici, e il progetto CELBICON, condotto dal Politecnico di Torino, punta a catturare CO<sub>2</sub> atmosferica per la produzione di sostanze chimiche come acido lattico e isoprene, utilizzando conversioni elettrochimiche e biologiche. Inoltre, emergono iniziative legate alla produzione di materiali da costruzione a conferma della necessità di

decarbonizzare l'industria cementizia. Qui troviamo progetti quali CLEANKER, Herccules e NanoMEMC2.

#### Overview of Italian CCU projects

Project Name	Project Lead	Start Date	End Date	Facility stage	Total Project Budget	Percentage of public funding	CO2 Source	Start TRL	End TRL	Product Category
Biowalk4Biofuels	Universita Degli Studi Di Roma la Sapienza	2010	2015	Operational	4,077,440.52 €	71% - EU (FP7-Energy)	Biogenic CO2	N/A	7	Biofuels, Fertilizers
CELBICON	Politecnico di Torino	2016	2019	Completed	6,211,040.25 €	87% - EU H2020	Atmospheric CO2	3	5	Polymers, Chemicals, Biofuels
CLEANKER	Laboratorio Energia ambiente Piacenza	2017	2023	Planned	9,237,851.25 €	97% - H2020	Lime and cement industrial plant	6	7	Captured CO2
CONDOR	Alma Mater Studiorum Università di Bologna	2020	2024	Planned	4,087,866.00 €	98% - H2020		3	4	e-Fuels, Chemicals
DESIRED	CIRCC	2022	2026	Planned	3,058,752.00 €	N/A - Horizon Europe	Atmospheric CO2	N/A	4	e-Fuels
Eco2CO2	Politecnico Di Torino	2012	2016	Completed	N/A	73% - EU FP7	Biogenic CO2	N/A	5	Polymers, e-Fuels
ENGICOIN	Istituto Italiano di Tecnologia	2018	2022	Planned	6,986,910.00 €	100% - H2020	Biogenic CO2	3	5	Chemicals
FRESH	Consiglio nazionale delle Ricerche	2022	2025	Under Construction	2,689,252.00 €	N/A - Horizon Europe		N/A	4	Chemicals, Power and Heat
GECO (site 4)	Orkuveita Teykjavikur sf	2018	2022	Planned	4,555,082.63 €	86% - H2020	Geothermal power plant	N/A	7	Governance & cluster development activities
GICO	UNIVERSITA DEGLI STUDI GUGLIELMO MARCONI	2020	2024	Planned	3,928,257.00 €	100% - H2020		3	4	Biofuels, Power and Heat
HERCCULES (site 1)	LABORATORIO ENERGIA AMBIENTE PIACENZA	2023	2027	Planned	19,813,604.00 €	75% - Horizon Europe	Lime and cement industrial plant	N/A	8	Building materials
NanoMEMC2	Alma Mater Studiorum Università di Bologna	2016	2019	Completed	4,990,816.25 €	100% - H2020	Lime and cement industrial plant	N/A	5	Captured CO2
Stores&Go (site 2)	DVGW	2016	2020	Completed	9,324,456.58 €	64% - H2020 + Switzerland State	Atmospheric CO2	N/A	7	e-Fuels

*Tabella 17: Panoramica dei progetti italiani di CCU.*

Dal punto di vista finanziario, i progetti italiani mostrano un ampio spettro di volumi di budget, che varia da circa 2,6 milioni di euro (progetto FRESH) a oltre 19 milioni di euro (progetto Herccules). I progetti che vedono un maggior project budget sono quelli legati alla cattura e utilizzo della CO2 attraverso tecnologie DAC e nell'industria cementizia. Tuttavia, in media, i progetti italiani beneficiano di una significativa percentuale di finanziamenti pubblici, spesso superiori al 70%, segno di un forte supporto istituzionale per la transizione verso tecnologie verdi. I finanziamenti pubblici sono stati forniti principalmente da programmi europei quali Horizon 2020, Horizon Europe. Questo dato sottolinea il ruolo cruciale dell'Unione Europea nel supportare lo sviluppo delle tecnologie CCU in Italia. Dall'altra parte, però, la forte dipendenza dai finanziamenti pubblici potrebbe generare dipendenze poco sane che qualora vengano dirottati in altre aree di R&D, questi progetti non avrebbero accumulato sufficiente esperienza nell'essere autonomi e sostenibili by their own.

Per quanto riguarda i livelli di maturità tecnologica, i progetti italiani si collocano prevalentemente in una fascia di sviluppo iniziale o intermedio. I TRL di partenza variano da 3 a 6, con valori finali che

raggiungono un massimo di 7-8. Questo dato riflette una forte enfasi sulla ricerca applicata e sull'innovazione tecnologica, spesso promossa da università e istituti di ricerca. Tuttavia, si osserva una limitata presenza di progetti industriali su larga scala, tipica di paesi europei. Si nota che l'avanzamento tecnologico prodotto durante il progetto è sempre limitato a 1-2 salti di TRL, indipendentemente dal project budget stanziato. Lo stato di avanzamento dei progetti mostra una predominanza di iniziative in fase di pianificazione o costruzione, mentre solo una minoranza risulta completata o pienamente operativa. Questo dato suggerisce un ecosistema in evoluzione, con una pipeline di progetti che potrebbe portare a un aumento significativo delle tecnologie CCU disponibili nel prossimo futuro.

Le collaborazioni internazionali sono un altro aspetto distintivo dello scenario italiano. Aziende e istituzioni come Climeworks, Fraunhofer e Biochemtex partecipano a diversi progetti, dimostrando l'apertura del sistema italiano verso partenariati globali. Ad esempio, il progetto Store&Go, che coinvolge il Politecnico di Torino, esplora la produzione di e-methane con la partecipazione di importanti partner come Karlsruhe Institute of Technology e Thyssenkrupp, sottolineando l'importanza della sinergia tra accademia e industria.

Nel panorama europeo, l'Italia si colloca come un follower nel settore delle tecnologie CCU, non distinguendosi in modo particolare, se non per i biofuels, ambito nel quale il paese si posiziona come promotore a livello europeo. Negli ultimi 15 anni, sono stati sviluppati solo 13 progetti CCU, un dato nettamente inferiore rispetto a quello dei paesi leader in Europa. La Germania, ad esempio, vanta una pipeline di 72 progetti, caratterizzata da un ampio successo e dalla costruzione di un solido expertise nel settore degli e-Fuels. Allo stesso modo, Spagna (34 progetti), Francia (25), Paesi Bassi (20), Norvegia e Belgio (19 ciascuno) mostrano una maggiore attività e dinamismo nell'adozione delle tecnologie CCU.

Nonostante l'Italia possa contare su eccellenze tecnologiche e accademiche di alto livello, il paese fatica a emergere come un attore centrale nel processo di transizione tecnologica. Questo posizionamento periferico è principalmente attribuibile a fattori economici e strutturali. L'elevato grado di burocratizzazione, i continui tagli ai finanziamenti per la ricerca universitaria, la forte pressione fiscale e la deindustrializzazione che ha caratterizzato gli ultimi due decenni hanno contribuito a un

arretramento significativo rispetto ai maggiori promotori di innovazione in Europa. Inoltre, la delocalizzazione di molte grandi produzioni al di fuori dei confini nazionali ha indebolito le fondamentali connessioni tra mondo accademico e industria, riducendo le opportunità di trasferimento tecnologico su larga scala.

Le PMI italiane, pur rappresentando una parte fondamentale del tessuto economico del paese, non dispongono del potere innovativo necessario per guidare il cambiamento. Spesso, queste aziende sono messe sotto pressione dalla competizione internazionale e, in un contesto economico incerto, mancano gli incentivi per investire in progetti di ricerca e sviluppo, i cui risultati si manifestano nel medio-lungo termine. Questo fenomeno è osservabile in molti settori industriali italiani.

Per rafforzare il proprio posizionamento nel contesto europeo e globale, sarà cruciale per l'Italia aumentare sia il numero che la portata dei progetti CCU. La creazione di cluster industriali ben integrati, che favoriscano la collaborazione tra accademia, industria e governi, potrebbe rappresentare un passo decisivo per superare le attuali limitazioni e promuovere l'adozione di queste tecnologie nei settori strategici del paese.

#### **4.10 Progetto Nord Overst Digitale e Sostenibile (NODES) Spoke 2 - Green technologies and sustainable industries**

Il progetto NODES è un ecosistema dell'innovazione finanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR) nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR). Con un investimento complessivo di 112 milioni di euro, di cui 15 milioni destinati al Sud Italia, NODES mira a promuovere la crescita sostenibile e inclusiva attraverso la transizione digitale ed ecologica nelle regioni del Piemonte, Valle d'Aosta e nelle province occidentali della Lombardia (Como, Varese e Pavia).

L'ecosistema NODES è strutturato in sette "Spoke", ciascuno focalizzato su un settore specifico:

1. Industria 4.0 per la mobilità e l'aerospazio
2. Tecnologie verdi e industria sostenibile
3. Industria del turismo e cultura

4. Montagna digitale e sostenibile
5. Industria della salute e silver economy
6. Agroindustria primaria
7. Agroindustria secondaria

Il consorzio NODES comprende 24 partner, tra cui 8 università, 6 poli di innovazione, 5 centri di ricerca, 3 incubatori, 1 acceleratore e 1 competence center. Tra gli atenei coinvolti figurano il Politecnico di Torino, l'Università degli Studi di Torino, l'Università del Piemonte Orientale, l'Università degli Studi dell'Insubria, l'Università degli Studi di Pavia, l'Università della Valle d'Aosta, l'Università degli Studi di Scienze Gastronomiche e l'Università Cattolica del Sacro Cuore. NODES si propone di sostenere l'innovazione attraverso lo sviluppo di nuovi prodotti e processi nelle PMI esistenti, stimolando il trasferimento tecnologico e aumentando la competitività a livello internazionale, promuovendo la nascita di start-up e spin-off deep tech nei settori individuati, attirando risorse economiche aggiuntive da fondi di venture capital e la formazione di nuovi talenti attraverso dottorati di ricerca industriali e percorsi di upskilling e reskilling del personale impiegato, con particolare attenzione al coinvolgimento delle donne in ambito STEM. Il progetto, avviato il 1° ottobre 2022, ha una durata prevista di tre anni e si concluderà a fine settembre 2025. Durante i primi nove mesi di attività, NODES ha coinvolto 543 ricercatori e professionisti dell'innovazione, con l'assunzione di 161 nuove risorse.

Lo Spoke 2, denominato *Green technologies and sustainable industries*, è coordinato dall'Università degli Studi di Torino. Questo Spoke si concentra sull'integrazione di competenze e know-how trasversali alla chimica verde, scienza dei materiali e bioeconomia per avanzare il TRL di varie tecnologie innovative, tra cui spiccano i progetti CCU riportati in *Tab. 17*, promuovendone il trasferimento tecnologico sul territorio tra il comparto accademico e i partners coinvolti.

*Tabella 18: Panoramica dei progetti CCU nell'ambito dell'iniziativa NODES Spoke 2.*

**Overview of CCU projects as part of NODES Spoke 2 initiative**

Project Name	Project Lead	Start Date	End Date	Facility stage	Start TRL	End TRL	Product Category
Electrochemical CO2 conversion	Politecnico di Torino	2022	2025	Operational	3	4	e-Fuels
CO2 conversion by thermochemistry	Politecnico di Torino	2022	2025	Operational	3	4	e-Fuels, Chemicals
Fotochemical CO2 conversion	Università di Pavia	2022	2025	Operational	3	4	e-Fuels
CO2 biofixation by microalgae cultivation	Politecnico di Torino	2022	2025	Operational	5	7	Biochemicals, Food/feed
CO2 conversion by biochemistry	Università degli Studi di Torino	2022	2025	Operational	3	4	Biochemicals
CO2 adsorption	Politecnico di Torino	2022	2025	Operational	2	3	Captured CO2

La tabella evidenzia i sei progetti CCU dello Spoke 2, con focus su diverse tecnologie CCU, che spaziano dalla conversione elettrochimica alla biofissazione tramite microalghe. Il Politecnico di Torino, l'Università degli Studi di Torino e l'Università di Pavia svolgono ruoli di primo piano come project leader. Questi progetti, sebbene ancora in fasi iniziali o intermedie, riflettono un approccio mirato verso la produzione di e-Fuels, prodotti chimici e materiali biochimici in linea con le direttive europee. Il progetto combina approcci tecnologici diversi, come la conversione termochimica ed elettrochimica della CO<sub>2</sub>, alla coltivazione di microalghe per produrre biomolecole ad alto valore aggiunto utilizzando CO<sub>2</sub> in input. Questo mix di tecnologie dimostra l'intenzione di creare soluzioni scalabili e adattabili a differenti contesti industriali. In particolare, la biofissazione tramite microalghe e le applicazioni biochimiche aprono prospettive significative per la valorizzazione della CO<sub>2</sub> nei settori alimentari, cosmetici, nutraceutici e farmaceutici italiani. Contestualizzando il progetto NODES Spoke 2 nel più ampio panorama europeo, emerge che esso rappresenta un esempio di come l'Italia stia cercando di recuperare terreno rispetto ai leader europei del settore CCU. Al pari di nazioni come Germania e Francia, che vantano una pipeline di progetti più avanzati e maturi all'interno di cluster academia-impresa più popolati e meglio connessi, il NODES Spoke 2 è stato progettato per nutrire una rete collaborativa che non solo rafforza il potenziale di trasferimento tecnologico, ma crea le basi per lo sviluppo di progetti su scala più ampia tra i propri partners. Tuttavia, ad oggi, come per molti altri progetti italiani, NODES Spoke 2 evidenzia un gap nel trasferimento tecnologico riflettendo un limite comune ad una più ampia tendenza sistemica italiana, dove la ricerca accademica fatica a tradursi in

applicazioni industriali su larga scala. Per superare questa barriera, sarà essenziale un maggior coinvolgimento del settore privato e una riduzione delle barriere burocratiche e finanziarie.

## 5. Analisi empirica

In questo capitolo verrà presentata un'analisi empirica sui dati contenuti nel database originale dei progetti di CCU già presentato e analizzato nel capitolo precedente. L'obiettivo di questa analisi è quello di comprendere e indagare quali fattori influenzino in maniera significativa l'avanzamento tecnologico di questi progetti. Si procederà, in primo luogo, a presentare il metodo di pulizia dei dati implementato per ottenere un dataset conforme agli standard analitici prefissati. In secondo luogo, verranno presentati invece i modelli econometrici applicati ai dati. Infine, ogni modello verrà commentato in base ai risultati ottenuti, evidenziando quelli ritenuti nello scopo di questo elaborato

### 5.1 Descrizione del database e delle sue variabili

Il database impiegato per questa analisi empirica raccoglie i principali progetti di CCU presenti online fino ad ora. Per ogni progetto sono riportate svariate informazioni, tra cui aspetti tecnologici, finanziari e temporali come descritto al paragrafo 4.1 di questo elaborato, i quali consentono di valutare il loro impatto sull'avanzamento e sul successo o sul fallimento dei progetti stessi. Lo scopo principale di questa analisi è indagare il legame esistente tra l'avanzamento del TRL registrato e le altre variabili contenute nel database. A questo proposito, il dataset CCU è stato riorganizzato e ripulito, adattando ove necessario le sole variabili di interesse al fine di omettere tutti quei progetti che presentano una o più informazioni mancanti. In *Tab. 19*, viene presentata la lista delle variabili considerate.

*Tabella 19 Descrizione delle variabili presenti nel database.*

Nome Variabile	Tipo di Dato	Descrizione
delta_trl	integer	Avanzamento nella scala TRL (TRL finale - TRL iniziale).
duration_yr	integer	Durata del progetto in anni.
budget	float	Budget totale del progetto in euro.
public_share	float	Quota percentuale del budget finanziata da enti pubblici.
partner_count	integer	Numero di partner industriali coinvolti nel progetto.
vertical_integration	binary	Indica se il progetto è integrato verticalmente (1=Yes, 0=No).
avg_ets_prices	float	Prezzo medio dei permessi di emissione ETS durante il progetto.
avg_eps_index	float	Indice medio di stringenza delle politiche ambientali (EPS) durante il progetto. (0-6)
avg_co2_trading_scheme	float	Livello medio della politica di scambio di CO2 (0-6).
avg_co2_tax	float	Livello medio della tassa sul carbonio (0-6).
avg_lc_rd_expenditures	integer	Livello medio della spesa pubblica per R&D a basse emissioni di carbonio (0-6).
trl_start	integer	Livello TRL iniziale del progetto.
product_category_count	integer	Numero di categorie di prodotti finali derivati dalla CO2.

Il dataset originale include 359 progetti. Poiché è necessario che tutte le variabili siano compilate per ottenere un risultato analitico consistente, è stato necessario non considerare molti progetti in quanto come sottolineato più volte, rimane la carenza di trasparenza e completezza riguardo ai dati forniti dalle aziende responsabili di tali progetti. Molti dati, in realtà, non sono disponibili online. La maggior parte dei progetti che offrono tutte le informazioni sono generalmente sostenuti da enti pubblici i quali obbligano le aziende vincitrici delle call progettuali a rispettare framework periodici di monitoraggio. Per le diverse analisi svolte in questo capitolo il numero di progetti utilizzato varia in base alle variabili utilizzate. Nella prima “Regressione lineare sul livello finale TRL (*end\_trl*)” sono stati considerati 183 progetti, nella seconda “Regressione lineare sull’avanzamento tecnologico (*delta\_trl*)” 104 progetti e nella terza “Regressione logit sull’avanzamento tecnologico significativo (*signficiant\_delta\_trl*)” sempre 104 progetti.

## 5.2 Analisi esplorativa del dataset

In Tab. 20, sono state raccolte le statistiche descrittive delle variabili presenti nel dataset completo utilizzato per le analisi. (Il numero di osservazioni, la media, la deviazione standard, il valore minimo e il valore massimo).

Tabella 20: statistiche descrittive delle variabili

VARIABLES	(1) Obs.	(2) Mean	(3) Std. Dev.	(4) Min.	(5) Max.
trl_adv	158	1.082	0.731	0	3
start_yr	349	2,019	3.686	2,009	2,028
end_yr	299	2,022	3.683	2,010	2,030
duration_yr	293	3.451	1.467	0	11
budget	261	1.502e+08	8.996e+08	71,429	1.160e+10
public_share	359	0.628	5.276	0	100
partner_count	357	7.681	6.251	1	46
vertical_integration	359	0.649	0.478	0	1
avg_ets_prices	348	45.19	27.67	4.455	83.50
avg_eps_index	340	3.210	0.885	0	4.889
avg_co2_trading_scheme	340	2.139	0.984	0	3
avg_co2_tax	340	1.608	2.250	0	6
avg_lc_rd_expenditures	340	2.864	1.704	0	6
trl_start	158	5.892	2.024	1	9
trl_end	314	6.618	1.617	3	9
product_category_count	359	1.287	0.500	1	3
log_budget	261	15.84	1.841	11.18	23.17
cop21	359	0.813	0.390	0	1

Essendo l'analisi concentrata sull'avanzamento tecnologico progettuale e di come questo venga influenzato da altre variabili, siano esse endogene o esogene, si è scelto di osservare dapprima le statistiche caratterizzanti le voci relative al TRL. La variabile *trl\_start* indica il livello TRL di partenza del progetto. In media i progetti partono da un livello TRL 5/6, ovvero un prototipo pilota della tecnologia testato in un ambiente industrialmente rilevante. La deviazione standard non è trascurabile, significando che ci sono progetti che si distribuiscono pressoché omogeneamente su tutta la scala TRL, con una densità maggiore nei livelli centrali, in particolare dal *trl\_start* 3 al *trl\_start* 7. La prima variabile, *delta\_trl*, indica l'avanzamento sulla scala TRL calcolato come TRL finale – TRL iniziale e risulta avere una media di 1.1, indicando che i progetti in media aumentano di poco più di un livello sulla scala TRL. Un aumento ridotto se si rapporta alla media della durata dei progetti (*duration\_yr*) che risulta essere di 3.5 anni circa (deviazione standard pari di 1,47 anni). Questo significa che in media, in 3.5 anni si avanza solamente di 1 livello sulla scala TRL. La deviazione standard presenta un valore

moderato (0.73), indicando che è presente una variazione minima in termini di avanzamento tecnologico tra i progetti, con la maggior parte che avanza di 1 o, in alcuni casi sporadici, di 2 livelli. I progetti in media durano circa tre anni e mezzo, con una variabilità anche in questo caso moderata, indicando che la maggior parte dei progetti dura tra i 2 e i 5 anni. La durata massima di un progetto è di 11 anni, il che suggerisce la presenza di uno o più outliers come evidenziato in Fig. 21 dove è rappresentata la distribuzione boxplot della variabile *duration\_yr*. È chiara la presenza di quattro outliers. È da considerare questo aspetto nel caso in cui questa variabile non sia statisticamente significativa, procedendo con l'eliminazione graduale degli outliers per osservare le variazioni del modello di regressione.

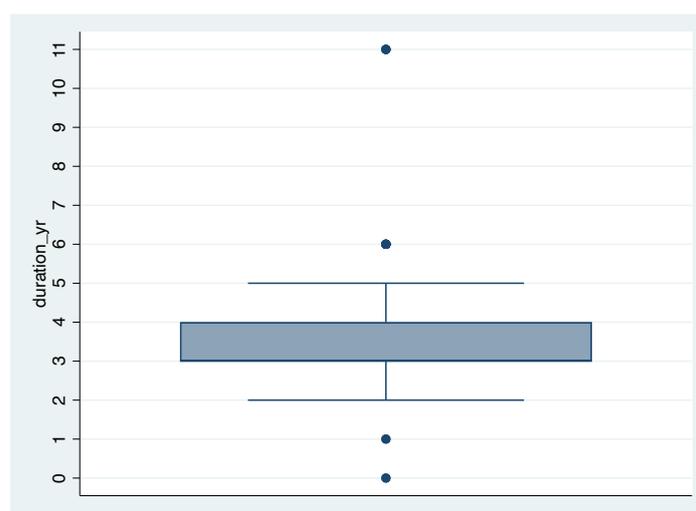


Figura 25: Boxplot relativo alla variabile *duration\_yr*.

Le statistiche descrittive relative al budget evidenziano un'enorme variabilità (deviazione standard di 890 milioni di €) mentre il budget medio investito in un progetto è di 150.2 milioni di €, suggerendo sia la presenza di piccoli progetti pilota sia la presenza di progetti con finanziamenti multimiliardari. A questo proposito, si è calcolata la trasformazione logaritmica di questa variabile, *log\_budget*, per normalizzare la distribuzione del budget evitando che pochi valori estremamente elevati distorcano i risultati. La quota di finanziamento pubblico è identificata dalla variabile *public\_share*, la quale esprime la percentuale del budget totale concessa da un ente pubblico. La media è di 63% indicando che più

della metà del budget di progetto proviene da fondi pubblici. Si può osservare dai valori minimi e massimi che esistono sia progetti completamente finanziati da fondi pubblici (100%) che progetti totalmente privati (0%). Questo ultimo dato potrebbe non essere non rappresentativo a causa della potenziale omissione della relativa voce. Infatti, è difficile che progettualità ad elevata intensità di capitale, volte a sviluppare tecnologie ancora in fase pilota, quindi molto incerte, vengano finanziate esclusivamente da capitale privato. L'elevata variabilità suggerisce la messa a punto di strategie di finanziamento molto diverse tra i vari progetti. La variabile *partner\_count* indica il numero di partner che collaborano al singolo progetto qui interpretata come un indicatore della complessità organizzativa alla base del progetto. In Fig. 26 è possibile visualizzare come la maggior parte dei progetti abbia tra 1 e 20 collaboratori, con una forte presenza di outliers con elevato numero di partners (fino a 46).

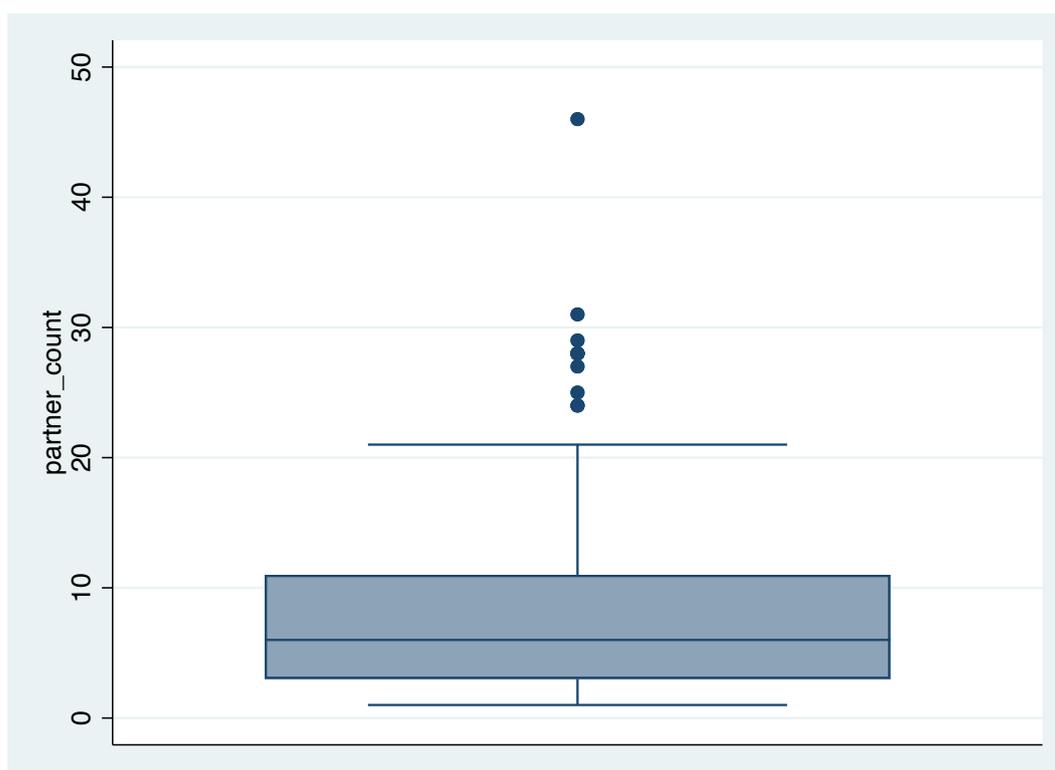


Figura 26: Boxplot relativo alla variabile *partner\_count*.

Il numero medio di collaboratori per progetto è di 7.7, con una deviazione standard di 6.3. Le statistiche della variabile *vertical\_integration* mostrano che la maggior parte dei progetti è verticalmente integrato;

quindi, volti a controllare più parti della filiera CCU, dalla cattura fino ai processi di conversione/utilizzo finale della CO<sub>2</sub>. La variabile *avg\_ets\_prices* indica il prezzo medio in €/tCO<sub>2</sub> dei crediti di carbonio. La variabilità elevata è dovuta all'oscillazione di prezzo registrata dalla voce in periodi differenti, suggerendo anche un'elevata diversità delle politiche di carbon pricing adottate a livello geografico. Per quanto riguarda il punteggio medio dell'indice Environmental Policy Stringency (EPS) durante il periodo di progetto si nota come il suo valore medio risulti essere di 3.2 associato ad una variabilità moderata. In generale, la maggior parte dei progetti risulta essere sviluppato in paesi in cui le politiche ambientali sono mediamente stringenti. L'EPS Index è calcolato a partire da altri indicatori, alcuni dei quali sono stati considerati per questa analisi come *avg\_co2\_trading\_scheme*, *avg\_co2\_tax* e *avg\_lc\_rd\_expenditures*. È quindi necessario valutare eventuali problemi di multicollinearità, per comprendere se questo insieme di variabili sono fortemente correlate. Il numero di categorie di prodotto associato al singolo progetto è rappresentato in questo set di dati dalla variabile *product\_category\_count*. Questa variabile può essere intesa come il grado di diversificazione produttiva del progetto in un'ottica di integrazione laterale, ossia la capacità di diversificare gli output del progetto con minimi aggiustamenti tecnologici. Il valore medio è 1,63 categorie di prodotto, indicando che la maggior parte dei progetti risulti essere specializzato su 1/2 categoria di prodotto, nonostante ci siano più progetti outliers che presentano anche 3 categorie di prodotto.

### 5.3 Matrice di correlazione tra le variabili

In *Fig. 27* viene presentata la correlation heatmap matrix tra le variabili indipendenti, la quale mostra i coefficienti di correlazione tra due variabili. Questi coefficienti sono compresi tra i valori -1 e 1 e rappresentano la forza e la direzione della relazione che c'è tra due variabili. Il coefficiente che viene utilizzato in questa matrice è il coefficiente di correlazione di Pearson, che esprime un'eventuale relazione di linearità tra le variabili statistiche. Date due variabili statistiche X e Y l'indice di

correlazione di Pearson è definito come la loro covarianza divisa per il prodotto delle deviazioni standard delle due variabili<sup>27</sup>:

$$\rho_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}}$$

- $\sigma_{XY}$  è la covarianza delle variabili.
- $\sigma_X, \sigma_Y$  sono le deviazioni standard delle due variabili.
- $X_i, Y_i$  sono i valori delle due variabili.
- $\bar{X}, \bar{Y}$  sono le loro medie.

Il coefficiente può assumere un valore:

- Vicino a 1: indica una forte correlazione positiva tra le due variabili.
- Vicino a -1: indica una forte correlazione negativa tra le due variabili.
- Vicino a 0: assenza di correlazione lineare.

	trf_adv	duration_yr	public_share	partner_count	vertical_integrat ion	avg_ets_prices	avg_eps_index	avg_co2_trading _scheme	avg_co2_tax	avg_ic_rd_expen ditures	trf_start	product_categor y_count	log_budget	cop21	Legenda
trf_adv	1,000	-0,070	0,397	0,381	-0,075	-0,175	0,078	0,183	-0,038	0,135	-0,665	-0,055	-0,255	-0,061	1,0
duration_yr	-0,070	1,000	-0,001	0,006	0,071	0,059	0,179	0,110	0,057	0,100	0,263	0,081	0,239	-0,029	0,9
public_share	0,397	-0,001	1,000	-0,006	-0,082	0,057	0,021	0,057	-0,037	0,000	-0,563	-0,031	-0,036	0,029	0,7
partner_count	0,381	0,006	-0,006	1,000	-0,055	-0,213	0,194	0,155	0,040	0,060	-0,537	0,033	-0,073	0,004	0,6
vertical_integrat ion	-0,075	0,071	-0,082	-0,055	1,000	0,326	-0,098	0,029	0,088	-0,018	0,282	-0,080	0,284	0,277	0,4
avg_ets_prices	-0,175	0,059	0,057	-0,213	0,326	1,000	-0,066	0,336	0,103	0,044	0,202	0,010	0,206	0,650	0,3
avg_eps_index	0,078	0,179	0,021	0,194	-0,098	-0,066	1,000	0,468	0,460	0,739	-0,078	-0,061	-0,095	0,040	0,1
avg_co2_trading _scheme	0,183	0,110	0,057	0,155	0,029	0,336	0,468	1,000	0,297	0,309	-0,266	-0,093	-0,225	0,418	-0,1
avg_co2_tax	-0,038	0,057	-0,037	0,040	0,088	0,103	0,460	0,297	1,000	0,615	0,106	-0,034	-0,058	0,140	-0,3
avg_ic_rd_expen ditures	0,135	0,100	0,000	0,060	-0,018	0,044	0,739	0,309	0,615	1,000	0,012	-0,113	-0,045	0,074	-0,4
trf_start	-0,665	0,263	-0,563	-0,537	0,282	0,202	-0,078	-0,266	0,106	0,012	1,000	0,052	0,623	0,064	-0,6
product_category _count	-0,055	0,081	-0,031	0,033	-0,080	0,010	-0,061	-0,093	-0,034	-0,113	0,052	1,000	-0,004	0,018	-0,7
log_budget	-0,255	0,239	-0,036	-0,073	0,284	0,206	-0,095	-0,225	-0,058	-0,045	0,623	-0,004	1,000	0,095	-0,9
cop21	-0,061	-0,029	0,029	0,004	0,277	0,650	0,040	0,418	0,140	0,074	0,064	0,018	0,095	1,000	-1,0

Figura 27: Heatmap della matrice di correlazione tra le variabili indipendenti.

La matrice è utile per individuare eventuali problemi di multicollinearità, poiché quando due variabili indipendenti sono fortemente correlate ( $|\rho| > 0.6$ ), diventa più difficile stimare i loro effetti individuali

<sup>27</sup> Indice di correlazione di Pearson: [https://it.wikipedia.org/wiki/Indice\\_di\\_correlazione\\_di\\_Pearson](https://it.wikipedia.org/wiki/Indice_di_correlazione_di_Pearson)

nella regressione. Dalla matrice di correlazione è possibile distinguere correlazioni forti e correlazioni moderate.

Correlazioni forti, con  $|\rho| > 0.6$ :

- $\text{avg\_eps\_index} - \text{avg\_lc\_rd\_expenditures}$  (0.739). L'indice EPS è fortemente correlato con la spesa in R&D per tecnologie CCU coerentemente al fatto che i paesi con politiche ambientali più stringenti investono maggiormente nella ricerca e sviluppo di tecnologie a basse emissioni.
- $\text{avg\_lc\_rd\_expenditures} - \text{avg\_co2\_tax}$  (0.615). Indica che i paesi con elevati investimenti in R&D per la decarbonizzazione tendono anche ad avere una tassazione sulla CO<sub>2</sub> più alta, suggerendo che le politiche di incentivazione alla ricerca e quelle di carbon pricing sono spesso complementari.
- $\text{trl\_start} - \text{log\_budget}$  (0.623). I progetti con un livello TRL iniziale più alto sono associati a budget maggiori, il che suggerisce che le tecnologie più mature ricevono più investimenti dato l'elevato costo connesso all'aumento di scala.

Correlazioni moderate, con  $0.3 < |\rho| < 0.6$ :

- $\text{trl\_start} - \text{public\_share}$  (-0.563). I progetti con un TRL iniziale più alto tendono a ricevere meno finanziamenti pubblici, suggerendo che i governi preferiscono supportare tecnologie meno mature più vicine alla ricerca di base, mentre quelle più avanzate sono maggiormente finanziate da investitori privati.
- $\text{avg\_co2\_trading\_scheme} - \text{avg\_eps\_index}$  (0.468). La presenza di un sistema di scambio delle emissioni di CO<sub>2</sub> è positivamente correlata con l'indice EPS, indicando che i paesi con mercati di carbonio più sviluppati tendono ad avere politiche ambientali più stringenti.
- $\text{avg\_ets\_prices} - \text{cop21}$  (0.650). Dopo la COP21, i prezzi dell'ETS sono aumentati, il che riflette un rafforzamento del mercato del carbonio in risposta agli impegni internazionali per la riduzione delle emissioni.

Queste correlazioni evidenziano come le politiche ambientali siano spesso interconnesse con la spesa in R&D e con i meccanismi di carbon pricing, mentre i finanziamenti pubblici sembrano essere destinati

principalmente a promuovere la ricerca di base, lasciando alle aziende private l'onere di sostenere economicamente l'industrializzazione delle tecnologie più mature.

#### **5.4 Modelli di regressione lineare – Analisi dei fattori determinanti il livello tecnologico finale e dei fattori determinanti l'avanzamento tecnologico nei progetti CCUS**

Per la prima analisi empirica dei dati, si è deciso di effettuare due regressioni lineari: una riguardante il livello finale del TRL del progetto e l'altra relativa all'avanzamento nella scala TRL dei progetti rispetto alle altre variabili incluse nel set di dati. Le variabili dipendenti sono pertanto rappresentate da *end\_trl* e *trl\_adv*, mentre le variabili indipendenti comprendono tutte le altre. In merito a ciò, la formula generale dell'equazione stimata per una regressione lineare multipla può essere espressa nel modo seguente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$$

Con:

- Y, variabile dipendente.
- $X_1, X_2, \dots, X_n$ , variabili indipendenti.
- $\beta_0$ , intercetta.
- $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ , sono i coefficienti di regressione che misurano l'effetto marginale di ogni variabile indipendente sulla variabile dipendente.

$\varepsilon$ , è il termine di errore.

##### **5.4.1 Prima regressione: domanda di ricerca, ipotesi e aspettative del modello di regressione lineare**

L'obiettivo del modello presentato in questa sezione è analizzare i fattori che caratterizzano le diverse fasi di sviluppo tecnologico nei progetti di CCU, espresse in termini di TRL finale (*end\_trl*). La prima regressione ha come variabile dipendente il livello finale di TRL (*trl\_end*) del progetto, mentre le

restanti variabili sono considerate come indipendenti. Di seguito, vengono esposte le ipotesi e le aspettative relative al modello di regressione per ciascuna delle variabili indipendenti. Queste considerazioni si basano sulle conoscenze acquisite nelle prime due fasi di elaborazione di questo lavoro: la rassegna della letteratura riguardante i progetti CCU e la costruzione del dataset.

- **Hp. 1: correlazione positiva tra budget di progetto (*log\_budget*) ed *end\_trl*.** I progetti CCU con tecnologie maggiormente avanzate necessitano di più fondi per vedere la loro effettiva commercializzazione in quanto l'ammontare di capitale investito è direttamente proporzionale all'aumentare dei volumi di CO2 catturati, convertiti o utilizzati, richiedendo infrastrutture, capacità logistiche e gestionali ben superiori a progetti pilota.
- **Hp. 2: correlazione negativa tra percentuale finanziamento pubblico (*public\_share*) ed *end\_trl*.** Le tecnologie con bassi TRL (<5) vengono normalmente sviluppate all'interno delle istituzioni universitarie o strutture di ricerche dislocate sul territorio, la cui natura rimane pubblica, indipendentemente dal fatto che i progetti di sviluppo siano presentati da partneriati tra entità pubbliche o da partneriati misti pubblico-privati. Pertanto, la tendenza che si registra è che la ricerca di base viene sviluppata tramite l'iniezione di capitale pubblico, mentre le fasi di avanzamento tecnologico successive fino alla sua commercializzazione vedono progressivamente l'aumento dell'impegno finanziario da parte dei privati a discapito di quello pubblico. Inoltre, tale tendenza è dovuta al fatto che investire in tecnologie meno mature significa sostenere maggiori rischi di non ottenimento dei potenziali ritorni sull'investimento stesso date le incertezze lungo il percorso di adozione tecnologico al mercato. Si ricorda che questa variabile rappresenta la percentuale del budget pubblico rispetto al totale. Pertanto, è molto probabile che i progetti con un *trl\_end* superiore ricevano finanziamenti pubblici maggiori in termini assoluti, ma non in termini proporzionali.
- **Hp. 3: correlazione positiva tra durata del progetto (*duration\_yr*) ed *end\_trl*.** I progetti che sfruttano tecnologie più mature necessitano di più tempo per poter registrare uno scatto unitario

ulteriore di TRL dato l'aumentare della complessità tecnologica in relazione all'incremento di scala.

- **Hp. 4: correlazione positiva tra integrazione verticale a monte (*vertical\_integration*) ed *end\_trl*.** Si prevede che i progetti contraddistinti da TRL più elevato presentino un grado maggiore di integrazione verticale, poiché risorse finanziarie più consistenti consentono l'acquisto e l'integrazione di processi upstream di cattura della CO<sub>2</sub>. Ciò comporta un controllo più significativo sugli asset di progetto, riducendo così l'incertezza e le dipendenze dalle catene di fornitura esterne<sup>28</sup>.
- **Hp. 5: correlazione positiva tra il numero di partners (*partner\_count*) ed *end\_trl*.** ci si aspetta una correlazione positiva con la variabile *end\_trl*. I progetti che si trovano più avanti nello sviluppo tecnologico ci si aspetta che abbiano dimensioni maggiori e di conseguenza ci si aspetta un numero maggiore di partners che partecipano allo sviluppo del progetto.
- **Hp. 6: correlazione positiva tra diversificazione di prodotto (*diversification*) ed *end\_trl*.** A livelli più alti di TRL corrispondono dimensioni di cattura/utilizzo maggiori. Ciò potrebbe comportare lo sviluppo di processi di utilizzo in parallelo su diverse categorie di prodotto, la cui realizzazione non richiede scostamenti tecnologici imponenti (la produzione di una molecola chimica ottenuta per conversione elettrochimica della CO<sub>2</sub> è spesso una molecola precursore di un idrocarburo). Si prevede quindi una correlazione positiva tra diversificazione di prodotto (e quindi diversificazione laterale del business) a fronte di un *trl\_end* maggiore in quanto i project owners tenderanno a massimizzare lo sfruttamento della tecnologia per la realizzazione di più prodotti chimicamente simili tra loro ma afferenti a segmenti di mercato differenti, significando una diretta diversificazione delle revenue streams. La redditività progettuale così ottenuta però deve essere bilanciata all'aumento della complessità produttivo-

---

<sup>28</sup> Questa prospettiva è stata formulata a partire dalla visione proposta nel lavoro di Grossman e Hart del 1986, intitolato "The Costs and Benefits of Ownership: A Theory of Vertical and Lateral Integration".

organizzativa e dai costi ad essa associata, la quale rimane comunque una forte causa del rischio di fallimento d'esercizio.

- **Hp. 7: correlazione positiva tra la variabile Cop21 (dummy) ed *end\_trl*.** A seguito dell'Accordo di Parigi del 2015, si è registrato un significativo aumento del numero di progetti CCU a livello globale a causa del progressivo afflusso sistemico di risorse intellettuali, umane e finanziarie, sia private, sia pubbliche in loro sostegno. L'incremento degli investimenti e delle collaborazioni tra aziende, enti di ricerca e governi ha notevolmente favorito il progresso tecnologico. Pertanto, ci si aspetta che i progetti sviluppati successivamente all'Accordo di Parigi possano aver raggiunto un livello finale di TRL superiore, a conferma di questa crescente accelerazione dell'innovazione nel settore.

#### 5.4.2 Interpretazione dei risultati ottenuti

In *Tab. 21* si può osservare che le sei regressioni mostrano un'integrazione graduale delle variabili indipendenti. I primi due modelli sono quelli base e includono i fattori di finanziamento e la durata dei progetti. Nel terzo e nel quarto modello sono stati introdotti i fattori relativi alla struttura del progetto, mentre negli ultimi due modelli sono state aggiunte le variabili legate all'ecosistema politico e regolatorio di contorno.

- **Hp. 1: correlazione positiva tra budget di progetto (*log\_budget*) ed *end\_trl*.** Il budget complessivo del progetto registra una relazione positiva e altamente significativa con *trl\_end* per tutte le regressioni analizzate, confermando l'ipotesi fatta. Questo significa che un budget più elevato è fortemente correlato a progetti che si trovano in fasi avanzate di sviluppo tecnologico. Il coefficiente osservato varia da 0,504 a 0,401 tra la prima e l'ultima regressione. L'inclusione delle altre variabili non ne riduce l'impatto, suggerendo così che il finanziamento rappresenti uno dei fattori più significativi nel determinare la maturità tecnologica di un progetto.
- **Hp. 2: correlazione negativa tra percentuale finanziamento pubblico (*public\_share*) ed *end\_trl*.** Esaminando la quota di finanziamenti pubblici ricevuti dai progetti, emerge

chiaramente che questa non risulta significativa in alcuna regressione analizzata. Di conseguenza, sembra che i finanziamenti non differenzino i progetti in base a *trl\_end*. È importante sottolineare, tuttavia, che non tutti i progetti hanno reso pubblica la percentuale di finanziamenti ricevuti, il che complica notevolmente l'analisi dei dati. Il finanziamento pubblico non sembra quindi essere un fattore correlato con il livello finale dei progetti. Nonostante questi, i coefficienti mostrano un segno negativo, in linea con l'ipotesi fatta (anche se non confermabile, a causa della non significatività statistica). Infatti, ci si aspetta che i progetti che trattano tecnologie meno avanzate ricevano una quota maggiore di finanziamenti pubblici.

Tabella 21: Output regressioni sul livello finale di TRL (*end\_trl*).

End TRL Linear Regression						
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	<i>trl_end</i>	<i>trl_end</i>	<i>trl_end</i>	<i>trl_end</i>	<i>trl_end</i>	<i>trl_end</i>
<i>log_budget</i>	0.504*** (0.0510)	0.506*** (0.0560)	0.468*** (0.0570)	0.466*** (0.0581)	0.467*** (0.0583)	0.411*** (0.0581)
<i>public_share</i>	-0.359 (0.230)	-0.357 (0.234)	-0.202 (0.249)	-0.226 (0.255)	-0.219 (0.256)	-0.0733 (0.229)
<i>duration_yr</i>		-0.00723 (0.0684)	-0.00147 (0.0681)	0.00321 (0.0693)	-0.00491 (0.0693)	0.0301 (0.0688)
<i>vertical_integration</i>			0.520** (0.205)	0.509** (0.208)	0.521** (0.207)	0.544*** (0.195)
<i>partner_count</i>			-0.0293* (0.0151)	-0.0289* (0.0147)	-0.0302** (0.0151)	-0.0230 (0.0152)
<i>product_category_count</i>			-0.0218 (0.181)	-0.0229 (0.183)	-0.0198 (0.183)	0.0227 (0.160)
<i>cop21</i>				0.123 (0.305)	0.119 (0.305)	0.538 (0.348)
<i>avg_co2_trading_scheme</i>						0.0201 (0.167)
<i>avg_ets_prices</i>						-0.0108** (0.00466)
<i>avg_co2_tax</i>						0.0816* (0.0458)
<i>avg_diesel_tax</i>						-0.331** (0.132)
<i>avg_lc_rd_expenditures</i>						0.128* (0.0707)
<i>avg_eps_index</i>					0.0341 (0.0853)	
Constant	-1.619* (0.899)	-1.617* (0.897)	-1.157 (0.975)	-1.220 (0.954)	-1.324 (0.991)	0.126 (1.055)
Observations	183	183	183	183	183	183
R-squared	0.344	0.344	0.385	0.386	0.386	0.464

Robust standard errors in parentheses

\*\*\* p&lt;0.01, \*\* p&lt;0.05, \* p&lt;0.1

- **Hp. 3: correlazione positiva tra durata del progetto (*duration\_yr*) ed *end\_trl*.** Dai risultati ottenuti, non emerge una relazione chiara tra la durata del progetto, espressa in anni, e il livello finale di TRL. In effetti, il coefficiente non risulta mai statisticamente significativo.

- **Hp. 4: correlazione positiva tra integrazione verticale a monte (*vertical\_integration*) ed *end\_trl*.** Analizzando l'integrazione verticale dei progetti si osserva che il coefficiente associato è positivo e statisticamente significativo a partire dalla terza regressione, confermando l'ipotesi fatta. Questo suggerisce che i progetti caratterizzati da integrazione verticale a monte, del processo di cattura, tendono ad avere un livello finale di TRL più elevato. Una possibile spiegazione di questo fenomeno potrebbe risiedere nel fatto che l'integrazione verticale facilita la riduzione delle barriere organizzative e migliora la gestione delle risorse. All'interno di questa prima analisi, l'integrazione verticale a monte emerge quindi come una caratteristica fondamentale dei progetti che presentano un avanzamento tecnologico elevato.
- **Hp. 5: correlazione positiva tra il numero di partners (*partner\_count*) ed *end\_trl*.** Tuttavia, i risultati dei modelli analizzati mostrano che, contrariamente a quanto previsto, un numero elevato di partner ha un impatto negativo e significativo sulla maggior parte dei casi. Questo suggerisce che i progetti con un alto grado di collaborazione tendono ad avere un TRL inferiore. Infatti, quelli nelle fasi iniziali di sviluppo richiedono spesso una maggiore varietà di collaboratori per far progredire le tecnologie in questione. Tuttavia, l'inserimento di troppi partner può rendere complessa la gestione del progetto, causando rallentamenti e inefficienze che ostacolano l'avanzamento tecnologico. Di conseguenza, sembra che i progetti più avanzati siano caratterizzati da una governance più centralizzata e meno frammentata.
- **Hp. 6: correlazione positiva tra diversificazione di prodotto (*diversification*) ed *end\_trl*.** Il numero di categorie di prodotti non ha un impatto significativo sul TRL finale. In altre parole, la diversificazione tra diverse tipologie di prodotti non influisce in modo statisticamente rilevante sul livello finale nella scala TRL.
- **Hp. 7: correlazione positiva tra la variabile Cop21 (dummy) ed *end\_trl*.** Analogamente, la variabile dummy *cop21*, che segnala se un progetto è stato sviluppato prima o dopo l'Accordo di Parigi del 2015, non mostra una significatività statistica in nessuno dei modelli analizzati. Pertanto, non emerge una relazione evidente tra l'Accordo di Parigi e il livello finale di TRL.

dei progetti. Una delle possibili spiegazioni potrebbe essere che l'Accordo di Parigi è più forte a livello macroeconomico, senza però incidere sui singoli progetti.

Per quanto concerne i fattori politici e le normative ambientali, non sono state formulate ipotesi in quanto risulta difficile immaginare una relazione tra queste variabili e il livello finale TRL delle tecnologie trattate dai progetti. Emerge però che l'EPS non appare statisticamente significativo. Tuttavia, si osserva che alcuni dei sottoindici presentano forti correlazioni con il livello finale di TRL. In particolare, i prezzi medi degli ETS mostrano una relazione negativa rispetto al livello finale di TRL. Questo suggerisce che prezzi elevati degli ETS sono associati a livelli di TRL più bassi, indicando che i progetti con un alto TRL tendono a essere sviluppati in periodi in cui i prezzi medi degli ETS sono più contenuti. Inoltre, l'indice associato alla tassa sulla CO<sub>2</sub> nei vari paesi si dimostra statisticamente significativo e mostra una relazione positiva con il livello finale di TRL. Ciò significa che i progetti con un TRL finale superiore si sviluppano prevalentemente in nazioni che implementano politiche più rigorose riguardo alle emissioni di CO<sub>2</sub>. Questo evidenzia come le politiche ambientali possano incoraggiare lo sviluppo di progetti tecnologici avanzati, fungendo da leva fondamentale per la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>. Dall'analisi emerge anche che l'indice relativo alla spesa nazionale in ricerca e sviluppo per tecnologie a basse emissioni di carbonio presenta una correlazione positiva con il livello finale di TRL. In particolare, i paesi che investono di più in ricerca e sviluppo tendono ad attrarre progetti con un TRL finale più alto.

L'analisi mette in luce che un budget elevato, l'integrazione verticale, le stringenti tasse sul carbonio e gli ingenti investimenti in ricerca e sviluppo dei paesi sono caratteristiche fondamentali dei progetti più avanzati dal punto di vista tecnologico. Al contrario, un numero maggiore di partner e i prezzi elevati degli ETS sembrano contraddistinguere maggiormente i progetti che si collocano a livelli TRL inferiori. Questi risultati offrono spunti preziosi per ottimizzare le strategie di investimento e favorire la diffusione delle tecnologie CCU.

### 5.4.3 Seconda regressione: domanda di ricerca, ipotesi e aspettative del modello di regressione lineare

L'obiettivo del modello presentato per la seconda regressione è individuare i fattori chiave che incidono sull'evoluzione tecnologica nello sviluppo dei progetti CCU. A questo proposito la variabile dipendente sarà la variazione di TRL durante la durata del progetto, mentre le altre variabili saranno utilizzate come variabili indipendenti. Ciò permetterà di identificare le cause dell'avanzamento tecnologico a prescindere dalla fase di sviluppo in cui ci si trova, un aspetto che non era garantito nella regressione precedente.

Qui di seguito vengono riportate le ipotesi riguardanti il modello di regressione.

- **Hp. 1: correlazione positiva tra durata del progetto (*duration\_yr*) e *delta\_trl*.** All'aumentare della durata del progetto ci si aspetta che l'avanzamento tecnologico sulla scala TRL sia maggiore, anche se la durata può dipendere anche da altre variabili la cui natura non è nota all'interno del database come, ad esempio, la complessità della tecnologia in fase di sviluppo, i tempi di costruzione degli impianti o eventuali ritardi sulla roadmap progettuale.
- **Hp. 2: correlazione negativa tra livello TRL di partenza (*trl\_start*) e *delta\_trl*.** All'aumentare del livello TRL iniziale, si prevede un minor progresso tecnologico. Questo accade perché, man mano che si avanza sulla scala TRL, le tecnologie si sviluppano e si riesce a introdurre meno innovazione.
- **Hp. 3: correlazione positiva tra budget di progetto (*log\_budget*) e *delta\_trl*.** All'aumentare del budget stanziato per il progetto, quindi della dimensione di esso, si può supporre un *delta\_trl* maggiore. Questa relazione risulta però ambigua, poiché progetti più grandi potrebbero affrontare maggiori difficoltà nell'avanzare il TRL. Come visto nel modello precedente, budget più elevati sono spesso allocati su progetti con un livello di TRL iniziale superiore, i quali però registrano un *delta\_trl* uguale ad 1.
- **Hp. 4: correlazione positiva tra percentuale di finanziamento pubblico (*public\_share*) e *delta\_trl*.** All'aumentare dell'apporto di capitali pubblici si può supporre un avanzamento

tecnologico maggiore. Questo perché solitamente i programmi di finanziamento pubblico promossi dai governi richiedono avanzamenti di TRL significativi, nonché standard più stringenti di monitoraggio degli avanzamenti.

- **Hp. 5: correlazione tra il numero di partner (*partner\_count*) e *delta\_trl*.** Per questa relazione possono esserci due prospettive.
  - **Hp. 5.a):** All'aumentare del numero di partner coinvolti, si incrementa la complessità della cooperazione e in tal modo si riduce l'efficienza del progetto in caso di mancate capacità di governance in linea con le necessità progettuali, correlando negativamente queste due variabili. In questo scenario, il coinvolgimento di più partner porterebbe ad un minor scatto di TRL nell'ambito di progetto.
  - **Hp. 5.b):** Il numero di partner coinvolti nell'ambito di progetto è direttamente collegato con il mix di know-how ed expertise necessarie alla messa a terra del progetto stesso. Per garantire affidabilità lungo le fasi di sviluppo e massimizzare le possibilità di successo, sussiste la tendenza nel ripartire tra più player le tasks progettuali. Ciò aiuta a decomporre la complessità caratterizzante l'esercizio in sotto-progetti più semplici, la cui direzione è spesso affidata al player che possiede quelle specifiche competenze richieste dall'esecuzione della task stessa. In questo modo si costituiscono JVs strategiche tra players diversi al fine di creare un paniere di competenze il più ricco possibile. Grazie al coinvolgimento di più partner, in questa situazione, si può ipotizzare che lo sviluppo tecnologico si faccia più intenso.
- **Hp. 6: correlazione tra l'integrazione verticale a monte sul processo di cattura (*vertical\_integration*) e *delta\_trl*.** Anche per questa variabile possono esserci due prospettive differenti.
  - **Hp. 6.a):** i progetti che sono verticalmente integrati a monte (*dummy*=1) incontrano maggiori difficoltà a progredire nella scala TRL. Questo avviene perché il progetto deve gestire più fasi, mentre progetti non integrati possono concentrare tutte le risorse

sulla sola fase di utilizzo della CO<sub>2</sub>. Questa prima osservazione suggerisce quindi una relazione negativa.

- **Hp. 6.b):** se si considera invece la prospettiva di Grossman e Hart, l'integrazione verticale porta a un controllo più sostanziale sugli asset di progetto, diminuendo di conseguenza l'incertezza e le dipendenze strategiche. In questo contesto, ci si attende che il legame tra le due variabili sia positivo.
- **Hp. 7: correlazione negativa tra la diversificazione di prodotto (*product\_category\_count*) e *delta\_trl*.** Maggiore è il numero di categorie di prodotto trattate in un progetto, minore è il progresso tecnologico ottenuto. Questo accade perché i progetti che comprendono una sola categoria di prodotto possono indirizzare i finanziamenti verso la messa a punto di quella specifica versione della tecnologia volta alla produzione di quel prodotto, mentre quelli con due o tre categorie devono gestire il progresso tecnologico di tutte le categorie di prodotto coinvolte.
- **Hp. 8: correlazione positiva tra l'EPS Index (*avg\_eps\_index*) e *delta\_trl*.** Nazioni con un indice di severità delle politiche ambientali superiore dovrebbero mostrare una maggiore considerazione per le tecnologie low carbon. In questo contesto, ci si attende una maggiore attenzione verso i progetti CCU e di conseguenza un progresso tecnologico più significativo.
  - **Hp. 8.a): correlazione positiva tra l'indice sugli schemi di scambio di crediti CO<sub>2</sub> (*avg\_co2\_trading\_scheme*) e *delta\_trl*.** Nazioni con un sistema di scambio dei crediti della CO<sub>2</sub> più sviluppato, quindi con un punteggio più elevato, dovrebbero incentivare maggiormente gli investimenti in progetti CCU, che consentono la cattura della CO<sub>2</sub> e lo scambio di crediti associati.
  - **Hp. 8.b): correlazione positiva tra l'indice di severità delle tasse sulle emissioni di CO<sub>2</sub> (*avg\_co2\_tax*) e *delta\_trl*.** Ci si aspetta che le nazioni con una tassazione più severa sulle emissioni di CO<sub>2</sub> siano anche quelle che si concentrano maggiormente sulle tecnologie di conversione e impiego della CO<sub>2</sub>. A questo proposito ci si aspetta

che all'aumentare di questo indice anche l'avanzamento tecnologico in termini di scala TRL aumenti.

- **Hp. 8.c): correlazione positiva tra le spese in ricerca e sviluppo per tecnologie a basse emissioni di carbonio (*avg\_lc\_rd\_expenditures*) e *delta\_trl*.** Maggiore è l'investimento di un paese in spese per ricerca e sviluppo riguardo tecnologie a basso impatto di carbonio, maggiore è l'attesa per un incremento dell'avanzamento tecnologico dei progetti nati in quel paese.

#### 5.4.4 Interpretazione dei risultati ottenuti

In Tab. 22 sono presentati i risultati delle regressioni effettuate sulla variabile dipendente *delta\_trl*. Come nell'analisi di regressione di *trl\_end* del paragrafo precedente, si è scelto di integrare a mano a mano le variabili a disposizione a seconda del loro grado intuitivo di influenza nel favorire più salti di TRL. Dapprima sono state coinvolte le sole variabili TRL iniziale e durata del progetto. A queste sono seguite le variabili finanziarie, di struttura progettuale e, infine, quelle legate a fattori politici e regolatori. Osservando l'R-squared, si può notare che questo cresce progressivamente dai modelli più elementari a quelli più elaborati. L'R-squared inizia da 0.41 nel modello iniziale e arriva a 0.53 nel modello conclusivo. Questo indica che i modelli più complessi presentati spiegano una parte maggiore della varianza legata all'avanzamento tecnologico.

Tabella 22: Output regressioni sull'avanzamento tecnologico (*delta\_trl*).

VARIABLES	ΔTRL Linear Regression				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	delta_trl	delta_trl	delta_trl	delta_trl	delta_trl
duration_yr	0.0707 (0.0449)	0.0532 (0.0390)	0.0569 (0.0365)	0.0506 (0.0356)	0.0534* (0.0310)
trl_start	-0.225*** (0.0292)	-0.255*** (0.0351)	-0.268*** (0.0359)	-0.272*** (0.0362)	-0.281*** (0.0365)
cop21	-0.00663 (0.175)	0.0204 (0.170)	-0.000152 (0.178)	-0.0168 (0.179)	0.0635 (0.207)
log_budget		0.0704* (0.0377)	0.0697* (0.0408)	0.0736* (0.0409)	0.0614* (0.0364)
public_share		0.112 (0.133)	0.203 (0.150)	0.203 (0.154)	0.246 (0.151)
vertical_integratation			0.256* (0.147)	0.276* (0.148)	0.330** (0.139)
partner_count			-0.00344 (0.0105)	-0.00616 (0.0108)	-0.00573 (0.0112)
diversification (n° of product categories)			-0.0741 (0.0954)	-0.0791 (0.0951)	-0.0518 (0.0896)
avg_ets_prices					-0.00133 (0.00270)
avg_co2_trading_scheme					-0.0833 (0.0676)
avg_co2_tax					-0.0169 (0.0304)
avg_lc_rd_expenditures					0.127*** (0.0394)
avg_eps_index				0.0635 (0.0610)	
Constant	2.193*** (0.291)	1.172** (0.540)	1.145* (0.671)	0.951 (0.719)	1.135* (0.680)
Observations	104	104	104	104	104
R-squared	0.413	0.437	0.462	0.467	0.531

Robust standard errors in parentheses

\*\*\* p&lt;0.01, \*\* p&lt;0.05, \* p&lt;0.1

- **Hp. 1: correlazione positiva tra durata del progetto (*duration\_yr*) e *delta\_trl*.** La durata del progetto ha un impatto favorevole sul progresso tecnologico, risultando rilevante soltanto nell'ultima versione (p<0.1). Questo conferma l'ipotesi che i progetti con una durata maggiore tendono a registrare un maggiore avanzamento tecnologico.

- **Hp. 2: correlazione negativa tra livello TRL di partenza (*trl\_start*) e *delta\_trl*.** Il livello TRL di partenza del progetto risulta essere sempre significativo a un livello dell'1% ( $p < 0.01$ ) e ha un coefficiente negativo consistente in tutti i modelli, confermando l'ipotesi fatta. Ciò suggerisce che i progetti con un TRL inizialmente elevato tendono a fare meno progressi in termini di sviluppo tecnologico. Questo indica che le tecnologie più sviluppate hanno minor potenziale di progresso rispetto a quelle emergenti.
- **Hp. 3: correlazione positiva tra budget di progetto (*log\_budget*) e *delta\_trl*.** Il budget totale del progetto risulta essere significativo al 10% per tutti i modelli, con un impatto positivo sull'avanzamento tecnologico, confermando l'ipotesi fatta. Un budget di finanziamento più elevato facilita l'innovazione e il progresso tecnologico. Se si interpreta questa variabile come una variabile di grandezza del progetto, si può indirettamente dire che progetti più grossi tendono a registrare un avanzamento tecnologico superiore rispetto ai progetti più piccoli.
- **Hp. 4: correlazione positiva tra percentuale di finanziamento pubblico (*public\_share*) e *delta\_trl*.** La percentuale di finanziamento pubblico risulta avere una relazione positiva con l'avanzamento tecnologico, suggerendo quindi che il finanziamento pubblico, utilizzato come incentivo, potrebbe favorire l'avanzamento tecnologico nei progetti CCU. Tuttavia, risulta non essere statisticamente significativo indicando che l'effetto non è chiaramente identificabile nel dataset, anche se risulta essere quasi significativo. Questo potrebbe dipendere da un errore di misurazione, poiché alcuni progetti che risultano con  $public\_share = 0$ , potrebbero aver ricevuto fondi pubblici non dichiarati, causando un attenuation bias che riduce l'effetto stimato e aumenta l'incertezza nei risultati. Di conseguenza, il vero impatto del finanziamento pubblico potrebbe essere sottostimato, e il modello potrebbe non riuscire a rilevarlo con precisione. A questo proposito non è possibile confermare l'ipotesi fatta.
- **Hp. 6: correlazione tra l'integrazione verticale a monte sul processo di cattura (*vertical\_integration*) e *delta\_trl*.** Per quanto riguarda gli aspetti strutturali, solamente l'integrazione verticale dei progetti risulta essere statisticamente rilevante, prima al 10% e poi

al 5%. A questo proposito viene riportata solo questa ipotesi relativa agli aspetti strutturali. Il suo effetto è positivo e suggerisce che progetti in cui le aziende sono integrate verticalmente a monte tendono a ottenere avanzamenti maggiori. Questo risultato è coerente con la teoria dei diritti di proprietà di Grossman e Hart (1986). Infatti, secondo il loro modello, l'integrazione verticale riduce il rischio di comportamenti opportunistici, migliora gli incentivi agli investimenti in innovazione e mitiga i costi di transazione, poiché il controllo diretto sugli asset critici consente alle imprese di sviluppare nuove tecnologie senza dipendere da contratti con partner esterni. Questo nel contesto CCU significa una maggiore capacità di gestire le incertezze tecnologiche e di mercato, nonché un miglior coordinamento tra cattura, trasporto, utilizzo della CO<sub>2</sub>. L'integrazione verticale permette inoltre alle aziende di appropriarsi più facilmente dei benefici dell'innovazione, incentivando investimenti più consistenti in ricerca e sviluppo. Di conseguenza, il progresso tecnologico nei progetti CCU sembra essere favorito da strutture integrate a monte, minimizzando inefficienze e costi contrattuali.

Osservando ora l'impatto delle variabili politiche, si può notare come esse, inaspettatamente, non influenzino il progresso tecnologico, salvo per gli investimenti dei vari paesi in ricerca e sviluppo di tecnologie low carbon.

- **Hp. 8.c): correlazione positiva tra le spese in ricerca e sviluppo per tecnologie a basse emissioni di carbonio (*avg\_lc\_rd\_expenditures*) e *delta\_trl*.** In effetti, la spesa media in R&D per tecnologie a basse emissioni di carbonio risulta essere positivamente correlata ed è statisticamente rilevante, suggerendo che i progetti realizzati in nazioni che investono di più in ricerca e sviluppo mostrano un progresso tecnologico superiore. Questo aspetto, all'interno di questo set di dati, indica che, sebbene il mercato del carbonio potrebbe non offrire segnali di prezzo abbastanza forti per favorire l'adozione delle tecnologie CCU, gli incentivi diretti alla R&D risultano essere strumenti più efficaci per incoraggiare innovazione e sviluppo nella scala TRL.

## 5.5 Modello di regressione logistica – Qual è la probabilità di avere un avanzamento significativo sulla scala TRL?

### 5.5.1 Modello di regressione Logit e domanda di ricerca

L'obiettivo di questo secondo modello di regressione è quello di stimare la probabilità con cui un progetto CCU può avere un avanzamento tecnologico significativo, in funzione delle variabili che sono state presentate in precedenza. La domanda risulta quindi essere: quali fattori influenzano la probabilità che un progetto CCU abbia un avanzamento sulla scala TRL maggiore di uno (se non lo hai già fatto prima, inserisci nota a piè di pagina e scrivi una frase del perché è: considerato per questo studio significativo)?

Per rispondere a questa domanda è stato deciso di utilizzare il modello di regressione Logit. Questo tipo di regressione consente di stimare la probabilità che una variabile dipendente binaria  $Y$  assuma il valore 1, data una o più variabili indipendenti,  $X_i$ . La regressione logistica utilizza la funzione logistica per trasformare una combinazione lineare delle variabili indipendenti in una probabilità, quindi compresa tra 0 e 1. Nel caso in cui ci sono più variabili indipendenti, dette anche predittori, la formula generale di questa funzione risulta essere:

$$P(Y = 1|X) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n}} = p$$

Dove:

- $Y$  è la variabile dipendente dicotomica con una distribuzione bernoulliana.
- $X$  è l'insieme di variabili indipendenti  $X_1, \dots, X_n$ .
- $\beta_1, \dots, \beta_n$  sono i coefficienti associati alle variabili  $X_1, \dots, X_n$ .

Per poter applicare questo modello è stata creata una nuova variabile, chiamata *significant\_delta\_trl*, che assume valore 1 se l'avanzamento sulla scala TRL del progetto è maggiore di 1, o altrimenti:

$$\begin{cases} \text{significant\_delta\_trl} = 1, & \text{se } \text{trl\_adv} > 1 \\ \text{significant\_delta\_trl} = 0, & \text{se } \text{trl\_adv} \leq 1 \end{cases}$$

In Tabella 23 viene presentata la distribuzione della variabile dipendente *significant\_delta\_trl*.

*Tabella 23: distribuzione della variabile dipendente significant\_delta\_trl.*

<b>significant_delta_trl</b>	<b>Frequenza</b>	<b>Percentuale</b>
0	67	64%
1	37	36%
Totale	104	100%

Il 64% dei progetti non è andato oltre uno scatto unitario sulla scala TRL, mentre il 36% ha registrato un avanzamento maggiore di uno, delineando una distribuzione sbilanciata verso gli zeri. Nonostante questo significativo scorporo di dati il 36% di progetti con variabile dipendente uguale a 1 risulta essere sufficiente per stimare una regressione logistica robusta e senza problemi di separazione perfetta. Si è scelto di sviluppare più modelli introducendo progressivamente le variabili nello stesso ordine come nei casi di regressione precedenti. Le ipotesi che sono state presentate per la regressione precedente rimangono invariate anche per questa regressione (Paragrafo 5.4.3).

### **5.5.2 Output e interpretazione dei risultati ottenuti**

Di seguito sono presentati i cinque modelli logit, in cui vengono gradualmente introdotte variabili per potenziare la capacità predittiva del modello. Per ciascun modello sono stati inizialmente calcolati i coefficienti della regressione Logit e in seguito gli effetti marginali. Gli effetti marginali sono stati inclusi per semplificare e rendere più chiara l'interpretazione dei risultati. Questi misurano quanto cambia la probabilità di accadimento di  $Y=1$  per una variazione unitaria delle variabili indipendenti  $X_i$ . Sono riportati gli effetti marginali medi, detti Average Marginal Effects (AME), che si ottengono calcolando l'effetto marginale per ogni osservazione e successivamente facendo la media tra questi. Questi coefficienti possono essere interpretati come il cambiamento assoluto nella probabilità di accadimento dell'evento  $Y=1$  e forniscono direttamente una variazione nella probabilità.

In *Tab. 24*, sono presentati i coefficienti  $\beta$ , cioè i log-odds, riguardanti le variabili nei vari modelli. Questi coefficienti non possono essere interpretati direttamente come in una regressione lineare. L'unico

elemento che può essere interpretato direttamente è il segno del coefficiente, il quale indica la direzione dell'effetto della variabile ad esso collegata, positivo o negativo, ma non specifica di quanto varia la probabilità. Per tale motivo sono stati calcolati gli effetti marginali. Guardando lo *Pseudo R<sup>2</sup>* si nota che aggiungendo progressivamente le variabili questo aumenta. Uno *Pseudo R<sup>2</sup>* maggiore indica un modello migliore, in grado di spiegare meglio la variabilità della variabile dipendente, proprio come l'*R-squared* in una regressione lineare. Valori tra 0.2 e 0.4 sono considerati dei buoni valori, mentre valori maggiori di 0.4 indicano un modello eccellente, in grado di spiegare gran parte della variabilità della variabile dipendente.

A partire dal primo modello, si nota che il livello iniziale di sviluppo tecnologico, misurato sulla scala TRL, presenta un coefficiente negativo e altamente significativo in tutti i modelli analizzati. Questo risultato conferma quanto emerso dalla regressione lineare sul *delta\_trl*: i progetti con un TRL iniziale più elevato tendono ad avere minori probabilità di raggiungere progressi tecnologici significativi. Passando invece alle variabili economico-finanziarie del progetto, emerge che il budget mostra un segno positivo ed è altamente significativo. Questo conferma e rafforza i risultati precedenti ottenuti tramite la regressione OLS, evidenziando l'importanza cruciale del finanziamento per lo sviluppo tecnologico. La regressione Logit si discosta da quella lineare precedente per quanto riguarda la percentuale finanziata pubblicamente. Infatti, sebbene nei modelli iniziali la parte di budget finanziata da un ente pubblico non risulta rilevante, nel modello conclusivo il coefficiente risulta positivo e significativo al 10%, indicando così quanto ipotizzato per la regressione OLS. In altre parole, un aumento del finanziamento pubblico potrebbe supportare il progresso tecnologico. Tuttavia, l'alta deviazione standard mostra una forte variabilità nei dati.

Tabella 24: Output regressioni logit sul livello significativo di variazione TRL.

Logit regression on significant $\Delta$ TRL					
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	significant_delta_trl	significant_delta_trl	significant_delta_trl	significant_delta_trl	significant_delta_trl
duration_yr	0.229 (0.140)	0.0909 (0.147)	0.110 (0.192)	0.0880 (0.197)	0.0410 (0.236)
trl_start	-0.549*** (0.128)	-0.829*** (0.175)	-1.101*** (0.312)	-1.089*** (0.298)	-1.180*** (0.303)
cop21	0.0804 (0.639)	0.363 (0.687)	0.536 (0.825)	0.466 (0.852)	1.568 (1.169)
log_budegt		0.505*** (0.154)	0.634*** (0.218)	0.628*** (0.211)	0.641*** (0.222)
public_share		0.513 (0.720)	1.202 (0.918)	1.168 (0.917)	1.753* (1.024)
vertical_integration			1.219 (0.886)	1.181 (0.866)	1.334* (0.779)
partner_count			-0.0296 (0.0484)	-0.0400 (0.0484)	-0.0510 (0.0604)
product_category_count			-0.919* (0.545)	-0.941* (0.531)	-1.064* (0.573)
avg_ets_prices					-0.0267* (0.0151)
avg_co2_trading_scheme					-0.239 (0.474)
avg_co2_tax					-0.182 (0.143)
avg_lc_rd_expenditures					0.558*** (0.204)
avg_eps_index				0.256 (0.339)	
Constant	1.279 (0.910)	-5.666** (2.388)	-6.545* (3.546)	-6.997* (3.619)	-6.461 (4.036)
Observations	104	104	104	104	104
Pseudo R2	0.160	0.224	0.275	0.276	0.355

Robust standard errors in parentheses

\*\*\* p&lt;0.01, \*\* p&lt;0.05, \* p&lt;0.1

Analizzando le variabili strutturali del progetto, emerge chiaramente che la diversificazione del prodotto, intesa come integrazione laterale, risulta significativa al 10% con un coefficiente negativo. Questo risulta differente rispetto alla precedente regressione OLS, dove tale variabile non si dimostrava statisticamente significativa. Questo dato suggerisce che una maggiore varietà di prodotti potrebbe ridurre le possibilità di un avanzamento tecnologico significativo. Ciò potrebbe essere attribuibile alla dispersione delle risorse su diversi ambiti tecnologici, piuttosto che a una focalizzazione su un progresso specifico e mirato. A differenza della regressione lineare precedente l'integrazione verticale a monte dei progetti appare debolmente significativa soltanto nell'ultimo modello. Il coefficiente risulta positivo,

avvalorando comunque quanto emerso dalla regressione OLS. Appare dunque vantaggioso dedicare una porzione del budget all'integrazione di sistemi avanzati di cattura della CO<sub>2</sub>, per evitare una perdita di valore a causa di comportamenti opportunistici da parte dei partner di progetto o di costi di transizione.

Esaminando ora le variabili di policy, si osserva che l'indice EPS, anche in questo caso, considerato da solo, non appare significativo e quindi non sembra influenzare la probabilità di avanzamento tecnologico significativo. Osserviamo invece che l'impatto dei prezzi dei permessi ETS è leggermente negativo e statisticamente significativo al 10%, indicando che un incremento del prezzo ETS potrebbe diminuire la probabilità di un progresso tecnologico significativo. Questo potrebbe indicare che i costi elevati dei permessi potrebbero promuovere strategie di abbattimento delle emissioni più immediate (es. efficienza energetica) invece di investimenti più a lungo termine in CCU. Un costo maggiore dei permessi ETS potrebbe non bastare a incentivare l'innovazione nei progetti CCU e potrebbe persino ostacolarla, portando le imprese a esplorare opzioni più rapide per rispettare le norme sulle emissioni. Ciò suggerisce che, per promuovere l'avanzamento delle tecnologie CCU, il carbon pricing deve essere sostenuto da politiche di supporto specifiche, come incentivi diretti per la ricerca e lo sviluppo, crediti di carbonio dedicati al CCU o requisiti di cattura per settori specifici. A sostegno di quanto affermato, l'ultimo modello di regressione Logit mostra che la spesa in ricerca e sviluppo per tecnologie a basse emissioni dei singoli paesi ha un impatto positivo e molto significativo, confermando quanto emerso dalla regressione OLS, ossia che gli investimenti in R&D costituiscono un elemento fondamentale per il progresso tecnologico nei progetti CCU. Di conseguenza, sembra che i finanziamenti diretti e gli incentivi economici per l'R&D siano più efficaci in questo settore, rispetto ad altri strumenti di policy come strumenti fiscali per la decarbonizzazione (tasse sulle emissioni di CO<sub>2</sub>) o come i mercati per la CO<sub>2</sub>, come i sistemi di scambio delle emissioni (ETS).

Per poter valutare l'effetto sulla probabilità di avanzare in maniera significativa sulla scala TRL per ogni singola variabile in Tab. 25 sono riportati gli effetti marginali per le regressioni commentate in precedenza.

*Tabella 25: Effetti marginali relativi alle variabili nelle diverse regressioni Logit.*

<b>Marginal Effects of Significant Delta TRL</b>					
<b>VARIABLES</b>	<b>(1)</b>	<b>(2)</b>	<b>(3)</b>	<b>(4)</b>	<b>(5)</b>
	<b>Marg. Eff.</b>				
duration_yr	0.0423*	0.0153	0.0174	0.0140	0.00568
	(0.0255)	(0.0247)	(0.0304)	(0.0312)	(0.0327)
trl_start	-0.101***	-0.139***	-0.174***	-0.173***	-0.163***
	(0.0176)	(0.0207)	(0.0343)	(0.0330)	(0.0307)
cop21	0.0148	0.0609	0.0848	0.0741	0.217
	(0.118)	(0.115)	(0.128)	(0.133)	(0.154)
log_budget		0.0848***	0.100***	0.0998***	0.0887***
		(0.0227)	(0.0284)	(0.0282)	(0.0276)
public_share		0.0861	0.190	0.186	0.243*
		(0.120)	(0.138)	(0.140)	(0.140)
vertical_integration			0.193	0.188	0.185*
			(0.131)	(0.131)	(0.106)
partner_count			-0.00469	-0.00636	-0.00707
			(0.00750)	(0.00751)	(0.00817)
product_category_count			-0.145*	-0.149*	-0.147**
			(0.0821)	(0.0806)	(0.0741)
avg_ets_prices					-0.00370*
					(0.00193)
avg_co2_trading_scheme					-0.0331
					(0.0655)
avg_co2_tax					-0.0251
					(0.0194)
avg_lc_rd_expenditures					0.0772***
					(0.0252)
avg_eps_index				0.0407	
				(0.0540)	
Observations	104	104	104	104	104

Standard errors in parentheses

\*\*\* p<0.01, \*\* p<0.05, \* p<0.1

## 6. CONCLUSIONE

Questo elaborato esplora in maniera approfondita l'ecosistema Carbon Capture Use and Storage (CCUS), con particolare attenzione verso le tecnologie Carbon Capture and Utilization (CCU). La tesi è stata divisa in due parti. La prima, di carattere teorico, si è focalizzata sull'approfondimento della natura tecnologica alla base dei progetti CCU, dei prodotti realizzabili tramite il riutilizzo della CO<sub>2</sub> catturata, sull'analisi del quadro normativo ed incentivante di tale ecosistema, fino all'analisi delle forme di collaborazione più efficienti al raggiungimento degli obiettivi prefissati.

In particolare, nel capitolo due, sono stati presentati i principali strumenti incentivanti, a livello di politiche ambientali, utili a spingere le tecnologie e i progetti CCU. È stato svolto anche un confronto tra i quadri normativi adottati in Europa e quelli in Nord America. Questo confronto ha evidenziato che l'UE e il Nord America incentivano gli investimenti privati nella decarbonizzazione e nei progetti CCU attraverso tre meccanismi principali: sovvenzioni pubbliche per settori strategici, crediti di carbonio proporzionali alle emissioni catturate o utilizzate e sistemi di limitazione e scambio delle emissioni per regolamentare il mercato. Tuttavia, i due approcci differiscono per qualche aspetto, l'UE si concentra su RD&D e standardizzazione, investendo maggiormente in tecnologie emergenti, mentre gli USA adottano incentivi economici diretti, puntando su tecnologie più mature.

Nel terzo capitolo sono stati presentati i principali modelli di collaborazione, sia inter-progetto sia intra-progetto. In particolare, nel primo caso, si è trattato il concetto di project hub, ovvero delle infrastrutture condivise che ottimizzano costi e risorse, facilitando la scalabilità dei progetti, ma fortemente dipendenti da incentivi governativi. Mentre, nel secondo caso, si sono trattate le forme di partnership tra aziende e istituzioni che favoriscono l'accesso ai finanziamenti, con strutture di governance flessibili che migliorano il successo operativo. Da uno studio di Choi and Contractor (2017) è emerso che le strutture ottimali di governance per questi progetti, che si traducono in migliori prestazioni delle collaborazioni sono quelle, non-equity-based, che hanno livelli moderati di interazione e complessità contrattuale.

La seconda parte si è concentrata sull'analisi empirica del dataset contenente 359 progetti CCU a livello mondiale di nostra creazione. L'analisi è stata eseguita applicando tre diversi modelli econometrici su

una parte dei dati raccolti, a causa dei numerosi dati mancanti (aspetto dovuto dalla poca trasparenza nel fornire le informazioni da parte dei responsabili dei progetti), in particolare le informazioni economiche finanziarie. Questi tre modelli hanno consentito di individuare alcuni fattori chiave ricorrenti nello spiegare l'avanzamento tecnologico dei progetti CCU. In particolare, quattro aspetti vengono confermati trasversalmente in tutti i modelli applicati: in primo luogo, il budget di progetto risulta sempre associato positivamente, sia al livello finale di maturità tecnologica sia al progresso registrato durante lo sviluppo, aumentando anche la probabilità di ottenere un avanzamento significativo sulla scala TRL; in secondo luogo, il livello iniziale sulla scala TRL mostra sistematicamente una relazione negativa con l'avanzamento, evidenziando che i progetti che trattano tecnologie che partono da uno stadio tecnologico meno maturo hanno maggiori probabilità di compiere salti significativi, suggerendo che il potenziale di progresso si riduce man mano che la tecnologia si avvicina alla fase commerciale; a livello strutturale, l'integrazione verticale è risultata positivamente correlata sia al livello finale di TRL sia all'avanzamento, indicando che il controllo diretto sulle fasi a monte (cattura) favorisce il progresso tecnologico, seppur con maggiore forza nei modelli lineari rispetto a quello logistico; infine, la spesa in R&D per tecnologie Low Carbon, intesa come proxy dell'impegno nazionale in innovazione sostenibile, risulta positivamente associata al progresso tecnologico, risultando una delle leve fondamentali, a livello di policy, per sostenere l'innovazione nel settore. In aggiunta a questi elementi comuni, l'analisi ha fatto emergere alcuni risultati rilevanti legati ai singoli modelli. Per quanto riguarda la struttura organizzativa del progetto, il numero di partner ha mostrato un effetto negativo sul livello TRL finale, probabilmente per via della maggiore complessità gestionale nei progetti con più soggetti coinvolti, ma non risulta significativo nei modelli che considerano il delta TRL. Alcuni aspetti sono emersi solamente nell'analisi con il modello Logit: in particolare, una maggiore diversificazione di prodotto (indicativa di un'elevata integrazione laterale) sembra ridurre la probabilità di avanzamento tecnologico significativo, ipotizzando che la dispersione di risorse su più output rallenti il progresso tecnologico. Anche l'effetto dei prezzi dei permessi ETS mostra una relazione negativa con la probabilità di avanzamento significativo, suggerendo che, in assenza di politiche complementari, un carbon pricing elevato possa incentivare soluzioni più immediate anziché investimenti in CCU.

Complessivamente, l'analisi conferma l'importanza di risorse economiche adeguate, di una struttura progettuale ben integrata e dell'intervento pubblico, soprattutto attraverso strumenti diretti di R&D, come principali fattori incentivanti per il successo tecnologico dei progetti CCU.



### Bibliografia

- 1) Chakkol, Mehmet, Selviaridis, K. and Finne, Max M. (2018) The governance of collaboration in complex projects. *International Journal of Operations and Production Management*. doi:10.1108/IJOPM-11-2017-0717
- 2) Chauvy, R., & Weireld, G. D. (2020). CO<sub>2</sub> Utilization Technologies in Europe: A Short Review. <https://doi.org/10.1002/ente.202000627>
- 3) Choe, C., Lee, B., & Lim, H. (2022). Sustainable and carbon-neutral green diesel synthesis with thermochemical and electrochemical approach: Techno-economic and environmental assessments. *Energy Conversion and Management*, 254, 115242. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115242>
- 4) Collis, J., Duch, K., & Schomäcker, R. (2022). Techno-economic assessment of jet fuel production using the Fischer-Tropsch process from steel mill gas. *Frontiers in Energy Research*, 10, 1049229.
- 5) Dimitriou, I., García-Gutiérrez, P., Elder, R. H., Cuéllar-Franca, R. M., Azapagic, A., & Allen, R. (2015). Carbon dioxide utilisation for production of transport fuels: process and economic analysis. <https://doi.org/10.1039/c4ee04117h>
- 6) Dowell, N. M., Fennell, P. S., Shah, N., & Maitland, G. C. (2017). The role of CO<sub>2</sub> capture and utilization in mitigating climate change. <https://doi.org/10.1038/nclimate3231>
- 7) Dziejarski, B., Krzyżyńska, R., & Andersson, K. (2023). Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment. *Fuel*, 342, 127776. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127776>
- 8) Eden, L., Hitt, M. A., Ireland, R. D., & Li, D. (2011). Governance in multilateral R&D alliances. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.2307/23252456>
- 9) Edrisi, A., Mansoori, Z., & Dabir, B. (2016). Urea synthesis using chemical looping process—Techno-economic evaluation of a novel plant configuration for a green production. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 44, 42-51.

- 10) Gadikota, G. (2021). Carbon mineralization pathways for carbon capture, storage and utilization. <https://doi.org/10.1038/s42004-021-00461-x>
- 11) Ghiat, I., & Al-Ansari, T. (2021). A review of carbon capture and utilisation as a CO<sub>2</sub> abatement opportunity within the EWF nexus. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101432>
- 12) Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J. R., Carter, E. A., Fuss, S., Dowell, N. M., Minx, J. C., Smith, P., & Williams, C. K. (2019). The technological and economic prospects for CO<sub>2</sub> utilization and removal. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1681-6>
- 13) [https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-10/CCUS-Chap\\_8-030521.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-10/CCUS-Chap_8-030521.pdf)
- 14) IEA (2019), Putting CO<sub>2</sub> to Use, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>, Licence: CC BY 4.0
- 15) IEA (2024), It is time for CCUS to deliver, IEA, Paris <https://www.iea.org/commentaries/it-is-time-for-ccus-to-deliver>, Licence: CC BY 4.0
- 16) IEA (2024)', Carbon Capture, Utilisation and Storage, IEA, <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage#how-does-ccus-work>
- 17) IEA (2024)", CO<sub>2</sub> Capture and Utilisation, IEA, <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/co2-capture-and-utilisation>
- 18) IFA (2024). Summary Report Medium-Term Fertilizer Outlook 2024 – 2028. [file:///Users/riccardomonaco/Downloads/2024\\_ifa\\_medium\\_term\\_outlook\\_report.pdf](file:///Users/riccardomonaco/Downloads/2024_ifa_medium_term_outlook_report.pdf)
- 19) Illich, M.; Rondi, L. (2023). Carbon Capture Use and Storage Projects (1990-2023), pp. 1-49.
- 20) Intellectual Property Office, 2021. Carbon capture, usage and storage: a worldwide overview of patenting related to the UK's ten point plan for a Green Industrial Revolution.
- 21) Itul, A., Diaz Rincon, A., Eulaerts, O.D., Georgakaki, A., Grabowska, M., Kapetaki, Z., Ince, E., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Shtjefni, D. and Jaxa-Rozen, M., Clean Energy Technology Observatory: Carbon capture utilisation and storage in the European Union - 2023 Status R2023)eport on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/882666, JRC134999.

- 22) Jarvis, S. M., & Samsatli, S. (2018). Technologies and infrastructures underpinning future CO<sub>2</sub> value chains: A comprehensive review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 85, 46–68. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.01.007>
- 23) Lhuillery, S., & Pfister, E. (2008). R&D cooperation and failures in innovation projects: Empirical evidence from French CIS data. *Research Policy*, 38(1), 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2008.09.002>
- 24) Magni, A. (2023, November 30). Polimeri da CO<sub>2</sub>. A che punto siamo? . sustainabilitylab. <https://sustainability-lab.net/2023/11/30/polimeri-da-co2-a-che-punto-siamo/>
- 25) Oxley, Joanne E. and Sampson, Rachelle C., The Scope and Governance of International R&D Alliances (June 2003). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=398320> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.398320>
- 26) Report UNECE, Technology Brief - Carbon Capture, Use and Storage (CCUS) (2021).
- 27) The CCUS Hub (2023). THE CCUS HUB PLAYBOOK: A guide for regulators, industrial emitters and hub developers.
- 28) Treccani (2013), [https://www.treccani.it/enciclopedia/risorse-convenzionali-e-non-convenzionali-del-petrolio\\_\(Lessico-del-XXI-Secolo\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/risorse-convenzionali-e-non-convenzionali-del-petrolio_(Lessico-del-XXI-Secolo)/)
- 29) UNFCCC, What Is the Paris Agreement?, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- 30) Wu, A., Wang, Z., & Chen, S. (2016). Impact of specific investments, governance mechanisms and behaviors on the performance of cooperative innovation projects. *International Journal of Project Management*, 35(3), 504–515. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.12.005>
- 31) Zhang, Z., Pan, S.-Y., Li, H., Cai, J., Olabi, A. G., Anthony, E. J., & Manović, V. (2020). Recent advances in carbon dioxide utilization. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109799>
- 32) Zhu, Y.; Wang, Y.; Zhou, B.; Hu, X.; Xie, Y. A Patent Bibliometric Analysis of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technology. *Sustainability* 2023, 15, 3484. <https://doi.org/10.3390/su15043484>

- 33) Grossman, Sanford J., and Oliver D. Hart. 1986. The costs and benefits of ownership: A theory of vertical and lateral integration. *Journal of Political Economy* 94(4): 691-719.