

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Gestionale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Percorso Finance



Tesi di Laurea di II livello

**Analisi dei Mercati Volontari di Carbonio e Valutazione
tecnico-economica degli investimenti in Biochar: un approccio
integrato per la compensazione delle emissioni**

Relatori:

Prof. Carlo Cambini

Dott. Flavio Pino

Candidato:

Alessandro Colosi

Anno Accademico 2024-2025

Ringraziamenti

Scrivere questa tesi è stato un viaggio intenso e arricchente, che non avrei potuto affrontare senza il supporto di molte persone a cui vorrei esprimere la mia profonda gratitudine.

In primo luogo, desidero ringraziare il mio relatore, il Professor Carlo Cambini, per la sua guida preziosa e la disponibilità costante che hanno reso possibile questo lavoro. Il suo entusiasmo e la sua competenza sono stati per me una fonte di grande ispirazione.

Un ringraziamento speciale va anche al mio correlatore, il Dottor Flavio Pino, per il tempo dedicato, per le osservazioni puntuali e per il prezioso contributo alla realizzazione di questa tesi. Il suo supporto è stato fondamentale per migliorare e approfondire il mio lavoro.

Un sentito grazie alla mia famiglia, che mi ha sempre sostenuto con affetto e incoraggiamento in ogni fase di questo percorso. Grazie per aver creduto in me anche nei momenti di difficoltà e per avermi dato la forza di andare avanti.

Un ringraziamento di cuore ai miei amici, che con la loro presenza hanno reso questo cammino meno faticoso e molto più speciale. Grazie a chi ha saputo ascoltarmi nei momenti di sconforto, a chi mi ha spronato quando la motivazione vacillava, e a chi ha semplicemente condiviso con me una risata, un caffè o una serata di svago, ricordandomi che la vita non è fatta solo di scadenze e obiettivi da raggiungere. Ognuno di voi, a suo modo, ha contribuito a rendere questa esperienza più ricca e significativa, e per questo vi sarò sempre grato.

Infine, ringrazio tutte le persone che, in un modo o nell'altro, hanno contribuito alla realizzazione di questa tesi, offrendomi il loro aiuto, il loro sapere e la loro esperienza.

A tutti voi, il mio più sincero grazie.

Sommario

INTRODUZIONE	8
PRIMA PARTE	10
1. Crediti di compensazione del carbonio (CCC)	10
1.1 Definizioni e concetti generali	10
1.2 Compliance Market (ETS) e Mercato Volontario (VCM)	10
2. Inquinamento come fallimento di mercato	11
2.1 Esternalità negative	11
2.2 Intervento dello Stato: tasse e sussidi Pigouviani	12
2.3 Esternalità e politiche climatiche	15
2.4 Analisi teorica sull'effetto del mercato volontario di crediti di carbonio	16
2.4.1 Scenario base (BAU, <i>Business As Usual</i>)	16
2.4.2 Scenario con presenza di un mercato di crediti di compensazione	17
3. Evoluzione storica delle politiche climatiche e la creazione del VCM	20
3.1 UNFCCC e Protocollo di Kyoto	20
3.2 Il ruolo della COP21 e della COP26 nella creazione di un Carbon Market	22
3.3 G7 Ambiente 2024: la “Carta di Venaria”	23
4. Voluntary Carbon Market (VCM)	25
4.1 Attori principali presenti nel VCM	26
4.2 Tipologie di progetti per compensare le emissioni in un contesto di VCM	28
4.3 Sviluppo dei progetti nel VCM	30
4.4 Criteri di qualità	33
4.5 Registri e programmi di compensazione	36
4.5.1 Verified Carbon Standard (VCS)	37
4.5.2 Gold Standard (GS)	37
4.5.3 American Carbon Registry (ACR)	38
4.5.4 Climate Action Reserve (CAR)	39

4.5.5 Plan Vivo	39
4.5.6 Confronto tra i diversi standard	40
4.5.7 Puro.Earth	42
4.6 Problemi del VCM e fallimenti del mercato.....	43
4.7 Regolamentazione del VCM e ruolo della tecnologia	46
4.8 Prospettive del VCM.....	49
SECONDA PARTE: ANALISI DI REGRESSIONE.....	51
5. Il rigore del VCM rispetto ai Clean Development Mechanisms	51
5.1 Panoramica di CDM, VCS e GS.....	51
5.2 Schema <i>Baseline-and-Credit</i> e modello Principale-Agente.....	52
5.3 Literature Review	54
5.4 Modello di regressione.....	55
5.5 Preparazione del dataset	58
5.5.1 Aggiornamento del Clean Development Mechanism.....	58
5.5.2 Aggiornamento ed ampliamento del Verified Carbon Standard (VERRA).....	59
5.5.3 Aggiornamento ed ampliamento del Gold Standard	60
5.6 Statistiche descrittive.....	61
5.7 Analisi di regressione: risultati.....	67
5.7.1 Considerazioni sull'indice di bontà di adattamento R-squared	69
5.7.2 Analisi dei coefficienti di ACT_TYPE_encoded.....	69
5.7.3 Analisi dei coefficienti di ACT_SIZE_encoded	70
5.7.4 Analisi dei coefficienti di ACT_REGION_encoded	70
5.7.5 Analisi dei coefficienti di REG_YEAR_encoded.....	71
5.7.6 Analisi degli effetti delle variabili dummy	71
5.8 Conclusioni	72
TERZA PARTE: Valutazione tecnico-economica degli scenari di investimento per la produzione di biochar a Cuba	74

6. Approfondimento sul biochar	75
6.1 Metodologie di produzione del biochar	75
6.1.1 Pirolisi.....	76
6.1.2 Carbonizzazione idrotermale	77
6.1.3 Gassificazione	77
6.1.4 Torrefazione.....	78
6.2 Applicazioni del biochar.....	78
6.3 Potenzialità e prospettive: il ruolo del biochar nelle Strategie Net Zero	79
7. Metodologia di VERRA per la regolamentazione dei progetti biochar: VM0044 ..	80
7.1 VM0044: ambito tecnologico	81
7.2 VM0044: Biomassa elegibile	81
7.3 VM0044: Criteri di applicazione	82
7.4 VM0044: Baseline e addizionalità	82
7.5 VM0044: Quantificazione delle riduzioni e rimozioni di emissioni di GHG.....	83
7.5.1 Emissioni nella fase di approvvigionamento.....	84
7.5.2 Emissioni nella fase di produzione.....	84
7.5.3 Emissioni nella fase di applicazione.....	87
7.5.4 Rilocalizzazione delle emissioni (leakage).....	88
8. Caso di studio: descrizione degli impianti scelti per la produzione di biochar	89
8.1 BST-10.....	94
8.2 BST-30.....	94
8.3 BST-50.....	94
8.4 Confronto dei parametri tecnici degli impianti BST-10/30/50	94
9. Caso di studio: descrizione preliminare degli scenari.....	96
9.1 Scenario 1: Comunità Bio	96
9.2 Scenario 2: Produzione Bio e Convenzionale a 100 km.....	98
9.3 Scenario 3: Produzione Bio e Convenzionale a 200 km.....	99

10. Condizioni di diversificazione del caso di studio: livelli dell'investimento iniziale, WACC e crescita dei prezzi dei crediti.....	100
11. Caso di studio: analisi dei costi capitali (CAPEX)	102
11.1 CAPEX: Scenario 1	104
11.2 CAPEX: Scenario 2.a	104
11.3 CAPEX: Scenario 2.b	105
11.4 CAPEX: Scenario 3.a	106
11.5 CAPEX: Scenario 3.b	107
11.6 CAPEX: confronto tra scenari	108
12. Caso di studio: analisi dei costi operativi (OPEX e COGS)	109
12.1 OPEX e COGS: Scenario 1	111
12.2 OPEX e COGS: Scenario 2.a	112
12.3 OPEX e COGS: Scenario 2.b.....	113
12.4 OPEX e COGS: Scenario 3.a	113
12.5 OPEX e COGS: Scenario 3.b.....	114
13. Caso di studio: analisi dei ricavi.....	115
14. Caso di studio: Discounted Free Cash Flow Analysis	116
14.1 DFCF: Scenario 1.....	117
14.2 DFCF: Scenario 2.a.....	119
14.3 DFCF: Scenario 2.b	121
14.4 DFCF: Scenario 3.a.....	123
14.5 DFCF: Scenario 3.b	125
14.6 DFCF: Conclusioni e raccomandazioni	127
CONCLUSIONI	128
Annex I	130
BIBLIOGRAFIA	132
SITOGRAFIA.....	134

INTRODUZIONE

Il seguente elaborato si pone l'obiettivo di analizzare i meccanismi di compensazione del carbonio, con un focus specifico sul Voluntary Carbon Market (VCM) e sulle potenzialità del biochar come strumento di mitigazione delle emissioni di gas serra. La crescente consapevolezza delle conseguenze ambientali delle emissioni ha portato all'adozione di soluzioni di compensazione per raggiungere la neutralità climatica, soprattutto nel contesto di mercati volontari. Questo studio si propone di fornire un quadro dettagliato e approfondito delle dinamiche di tali mercati, dei relativi attori e delle tecnologie impiegate, culminando in un'analisi economica di scenari di investimento specifici per la produzione di biochar.

Il lavoro si articola in un'indagine sui mercati di compensazione, esplorando gli incentivi economici e normativi che spingono le aziende e le istituzioni ad utilizzare i crediti di carbonio per bilanciare le proprie emissioni. In particolare, l'obiettivo è comprendere come le caratteristiche e le condizioni dei mercati volontari influenzino il processo di compensazione e valutare, attraverso un'analisi tecnico-economica, la convenienza di investire in progetti di biochar come mezzo per sequestrare il carbonio. Infine, il lavoro offre un'analisi quantitativa degli scenari di investimento, presentando modelli e stime di sostenibilità economica e finanziaria.

L'elaborato risulta essere organizzato in tre parti principali, ciascuna delle quali affronta un aspetto distinto del tema trattato:

1. **Prima parte:** la prima sezione introduce i concetti generali relativi ai crediti di compensazione del carbonio, analizzando le differenze tra il *Compliance Market* (ETS) ed il *Voluntary Carbon Market* (VCM). Inoltre, è esplorata la genesi e l'evoluzione storica dei mercati del carbonio, con riferimento ai principali trattati internazionali, tra cui il Protocollo di Kyoto e l'Accordo di Parigi. Infine, è presentato il VCM ed analizzati gli attori, le tipologie di progetti, nonché i criteri di qualità che lo contraddistinguono.
2. **Seconda parte:** la seconda sezione presenta un'analisi statistica volta a valutare l'efficacia ed il rigore dei meccanismi di compensazione del VCM in confronto ai *Clean Development Mechanisms* (CDM). In questo contesto, è sviluppato un modello di regressione applicato a dati aggiornati relativi agli standard VCS, GS e CDM. Questa sezione fornisce quindi una comprensione quantitativa della distribuzione e dell'impatto dei crediti di carbonio, evidenziando le variabili

significative che influenzano la qualità ed il valore dei crediti emessi in mercati volontari e regolamentati.

3. **Terza parte:** l'ultima sezione analizza il caso specifico della produzione di biochar a Cuba per conto di una nota azienda italiana, leader di settore nella produzione di caffè. Dopo un approfondimento sulle proprietà e sulle applicazioni del biochar, sono descritti i parametri tecnici e finanziari degli impianti considerati, seguiti da una dettagliata analisi dei costi e dei ricavi. Infine, è utilizzato il metodo dei *Discounted Free Cash Flow* (DFCF) per valutare la sostenibilità economica dei diversi scenari di investimento, concludendo con raccomandazioni specifiche in base ai risultati emersi.

Il presente elaborato, dunque, intende contribuire alla letteratura sui mercati di compensazione del carbonio e sulle applicazioni del biochar, fornendo anche una guida operativa per coloro i quali desiderano valutare progetti di investimento sostenibili nel settore delle compensazioni climatiche.

PRIMA PARTE

1. Crediti di compensazione del carbonio (CCC)

1.1 Definizioni e concetti generali

L'espressione "Credito di compensazione del carbonio" (CCC) indica una unità di carattere finanziario che corrisponde ad una tonnellata di CO₂ equivalente (o altri gas climalteranti, come l'ossido di diazoto, N₂O) evitata o assorbita tramite un progetto di salvaguardia ambientale.

Un credito di carbonio è considerato un certificato negoziabile perché può essere acquistato, venduto o scambiato sul mercato, come azioni o titoli. Questa caratteristica di negoziabilità consente alle aziende di acquistare crediti di carbonio per compensare il rilascio di carbonio e raggiungere gli obiettivi di riduzione delle emissioni, nell'ambito di una strategia globale *Net Zero*: infatti, questo strumento consente alle aziende di compensare le emissioni di GHG (*greenhouse gases*) che attualmente non possono essere eliminate dai processi produttivi con delle emissioni "negative" (note appunto come "carbon offset"), al fine di raggiungere la neutralità degli impatti climatici (Ravetti, 2021).

1.2 Compliance Market (ETS) e Mercato Volontario (VCM)

I crediti di compensazione del carbonio non sono da confondersi con i *carbon credits/carbon allowances*, che corrispondono al permesso di emettere una tonnellata di CO₂ equivalente in un mercato regolamentato (*compliance markets*) quale l'Emission Trading Scheme (ETS) Europeo. Esistono, infatti, due mercati paralleli: in primo luogo, il sopracitato ETS, ovvero un mercato basato sull'intervento iniziale di un regolatore pubblico che ha il compito di fissare un livello di qualità ambientale e determinare il numero di permessi da mettere in circolazione; in alternativa, il mercato volontario di CCC (Voluntary Carbon Market o VCM), che sarà oggetto di ulteriore analisi nel corso di questo documento.

Il termine "carbon offset" è stato introdotto per la prima volta nel 1997, in occasione della sottoscrizione del protocollo di Kyoto, e da allora si è giunti alla creazione sia di mercati regolamentati che di mercati volontari. Il primo tipo di mercato è quello che ha interessato la maggior parte del volume dei crediti di carbonio scambiati finora: infatti, esso rappresenta il 90% del volume globale di scambio di carbonio, per un ammontare complessivo di oltre 200 miliardi di dollari all'anno. Tuttavia, il VCM è cresciuto significativamente nell'ultimo decennio in assenza di supervisione del regolatore pubblico (Chen et al., 2021).

2. Inquinamento come fallimento di mercato

2.1 Esternalità negative

Le scelte di consumo, produzione e investimento fatte da individui, famiglie e aziende spesso hanno ripercussioni su persone non direttamente coinvolte nelle transazioni. Talvolta, tali impatti indiretti sono trascurabili; tuttavia, quando diventano significativi, possono causare problemi noti agli economisti come esternalità. Le esternalità si generano, dunque, quando il consumo o la produzione da parte di un consumatore o di un'impresa genera effetti per tutto il contesto, causando una differenza tra il rendimento o il costo privato e quello della società nel suo complesso. Per questo motivo, esse rappresentano una delle principali ragioni di intervento del governo nell'economia.

Un tipico esempio di esternalità negativa legato alla produzione è rappresentato dall'inquinamento: il soggetto che inquina prende decisioni soltanto sulla base del costo diretto e sul conseguente profitto individuale, senza considerare i costi indiretti, ovvero i costi sociali correlati all'inquinamento. Questi ultimi, ad esempio, possono includere l'aumento dei costi sanitari causati dal peggioramento della qualità della vita, oppure la perdita di opportunità produttive, nel momento in cui l'inquinamento danneggia attività di altri settori come il turismo. Poiché i costi indiretti non sono sostenuti dal produttore e quindi non vengono trasferiti all'utente finale dei beni prodotti dall'inquinatore, i costi sociali o totali della produzione sono maggiori dei costi privati (Church and Ware, 2000).

La *Figura 1* mostra una analisi grafica delle conseguenze causate dalla presenza di esternalità negative sul mercato. MC (Marginal Cost) indica il costo marginale che la società paga per l'utilizzo di impianti che generano inquinamento; MEC (Marginal External Cost) rappresenta l'aumento del costo imposto agli utenti a valle per ogni livello di produzione, cioè il costo sociale legato alla presenza di esternalità: più l'azienda produce, più aumenta il costo sociale derivante dall'inquinamento. Infine, MSC (Marginal Social Cost) è dato da $MC+MEC$ e rappresenta la somma dei costi marginali di produzione più tutti i costi marginali esterni. Assumendo che l'impresa abbia una funzione di produzione a proporzioni fisse e non possa modificare la sua combinazione di input, ne consegue che l'unico modo per ridurre l'inquinamento è tramite la riduzione dell'output di produzione. Il meccanismo di scelta della produzione in presenza di esternalità negative funziona nel modo seguente: l'impresa ha l'obiettivo di massimizzare i profitti producendo la quantità q_1 , che risulta dall'incrocio tra MC e il prezzo P, mentre il livello di produzione efficiente è q^* ; il vero costo

di produzione che l'azienda dovrebbe considerare, invece, è MSC. Di conseguenza, anche in un contesto di concorrenza perfetta (che risulta essere la miglior forma di mercato per il consumatore) si ottiene una soluzione inefficiente dal punto di vista sociale, poiché si otterrebbe un livello di produzione troppo elevato rispetto a quello sostenibile. L'area evidenziata nella parte di destra della figura misura, infatti, il costo sociale associato all'eccessiva produzione.

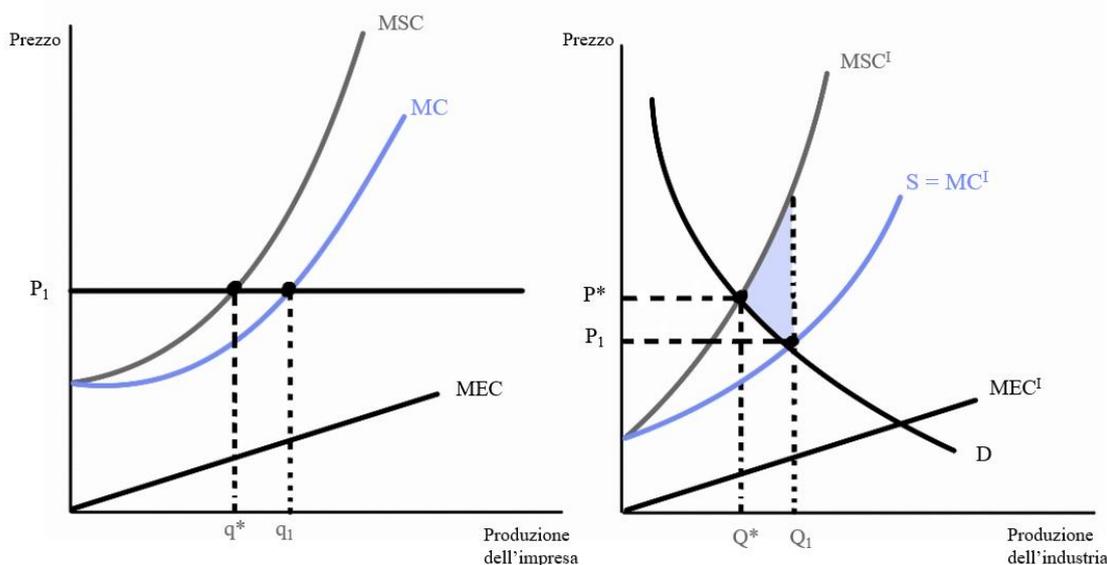


Figura 1

L'obiettivo, quindi, risulta essere quello di spostare MC il più possibile verso MSC: ciò obbliga l'impresa a considerare anche i costi marginali derivanti dalle esternalità. A tale scopo, possono essere inseriti dei costi di produzione aggiuntivi alle imprese, oppure può essere creato un mercato delle esternalità tramite l'inserimento di diritti di inquinamento (si veda, a tal proposito, quanto detto per il meccanismo dell'ETS nel capitolo 1.2).

2.2 Intervento dello Stato: tasse e sussidi Pigouviani

Per migliorare il benessere sociale, nella politica climatica si utilizzano principalmente due metodi al fine di ridurre le emissioni: tasse e sussidi.

Arthur Cecile Pigou, uno dei maggiori esponenti dell'economia del benessere, sviluppando il concetto di esternalità descritto in precedenza, giunse alla creazione di un meccanismo di internalizzazione delle esternalità (Pigou, 1932). In presenza di divergenze tra costo privato e costo sociale, l'aumento di produzione inquinante non considera il danno alla collettività e tale comportamento non è disincentivato, poiché il soggetto inquinante non sopporta un costo effettivo per la sua condotta; in altre parole, non esistono prezzi di mercato capaci di

regolare gli effetti esterni. L'idea, quindi, è quella di aumentare il costo marginale privato, affinché esso comprenda anche l'effetto dell'esternalità, conducendo così il soggetto produttore all'adeguamento della produzione alla nuova curva che sarà più vicina alla curva dei costi marginali totali.

Pigou propone due alternative sul piano operativo. La prima consiste nell'introduzione di una imposta specifica che grava su ciascuna unità inquinante prodotta, denominata in seguito "tassa pigouviana": in questo modo, la curva di costo privato determina un nuovo equilibrio in corrispondenza di una quantità minore, compatibile con le esigenze della collettività, e allo stesso tempo lo Stato ricava un ulteriore gettito di imposta. In *Figura 2* è mostrata una rappresentazione grafica della tassa pigouviana: tale imposta porta ad un incremento dei costi marginali privati di produzione, spingendo il soggetto inquinante a considerare i costi esterni all'interno delle proprie decisioni. In questo caso, dunque, la tassa risulta essere un "surrogato" del prezzo di mercato: quest'ultimo, infatti, porterebbe a soluzioni inefficienti che determinano un fallimento di mercato, cioè la produzione eccessiva rispetto a quella socialmente sostenibile.

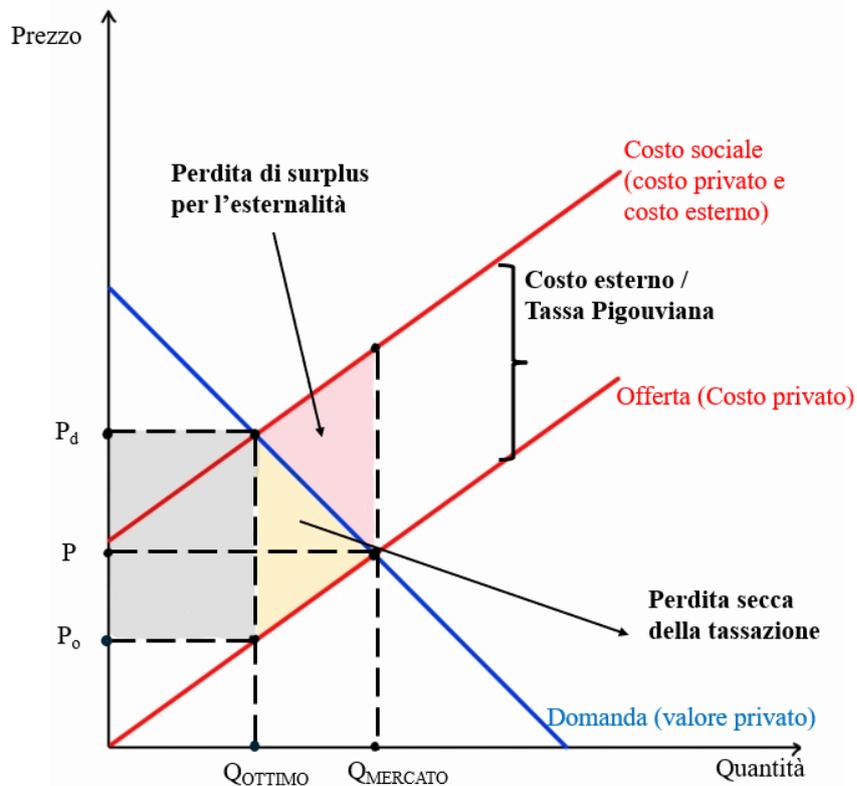


Figura 2

Tuttavia, così come accade per qualsiasi imposta sui beni di consumo, anche la tassa pigouviana porta alla diminuzione del surplus complessivo: tale riduzione, nota come perdita secca (*deadweight loss*), è intrinsecamente legata alla tassazione ed è ripartita tra i soggetti economici in relazione all'elasticità delle loro curve di domanda e offerta. Ad ogni modo, come detto in precedenza, tale imposta nasce per prevenire la perdita di benessere sociale collegata alla presenza di esternalità negative: all'equilibrio, dunque, l'imposta crea una perdita secca equivalente al risparmio di surplus ottenuto.

Analogamente, seguendo la stessa logica adottata in presenza di esternalità negative, Pigou sostiene che lo Stato dovrebbe sovvenzionare coloro che generano esternalità positive, nella misura in cui gli altri ne beneficiano, attraverso dei sussidi. Nel caso di esternalità positive, quindi, il sussidio determina un aumento dei benefici marginali privati di produzione, rendendo così implicitamente costoso non aumentare il livello di produzione. La *Figura 3* mostra graficamente il meccanismo del sussidio: l'ammontare ottimo di quest'ultimo è pari alla differenza di prezzo tra le curve SMB e PMB al livello di produzione Q^* . Il sussidio aumenta il prezzo dei produttori a P^*_{prod} , ma abbassa il prezzo applicato ai consumatori al livello P^*_{cons} , aumentando così la quantità ottima a Q^* . Lo Stato, quindi, pagherà l'importo totale evidenziato dall'area verde, sovvenzionando tutte le unità, anche quelle prodotte senza sussidio.

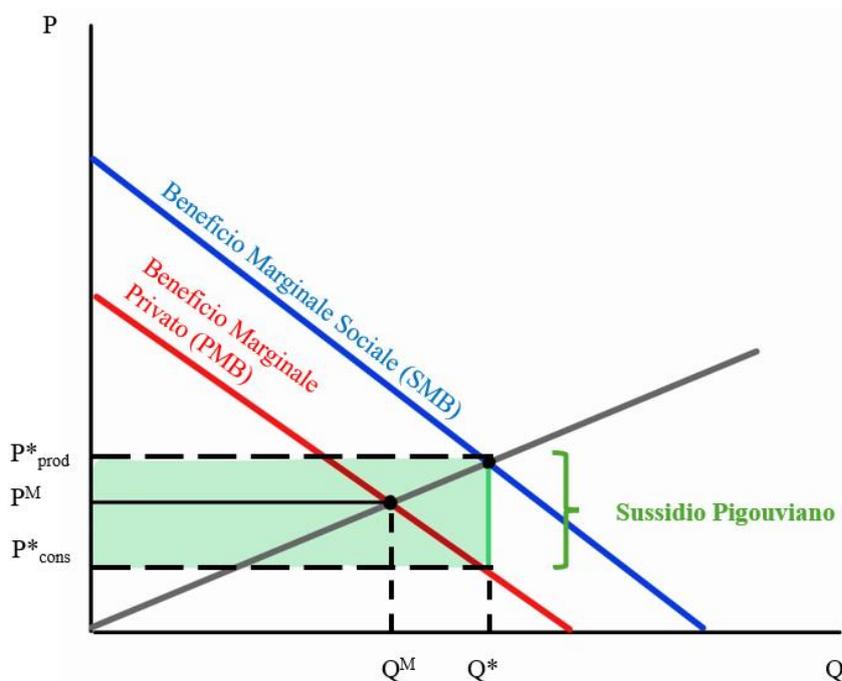


Figura 3

2.3 Esternalità e politiche climatiche

Nell'attuale scenario di politica climatica è possibile vedere l'applicazione di entrambe le soluzioni proposte da Pigou: infatti, il sistema ETS dell'UE può essere considerato alla stregua di una imposta pigouviana sulle esternalità negative, mentre il Voluntary Carbon Market implementa un meccanismo di sussidio alle aziende che conducono progetti che creano esternalità positive (Amadeo and Anderson, 2022). Oggi, il problema più complesso legato alle esternalità negative è rappresentato dalle emissioni di gas serra (GHG, *Greenhouse gases*): infatti, l'aumento delle emissioni di gas serra dovuto all'attività antropica è stato identificato come uno dei principali fattori che contribuiscono al fenomeno del riscaldamento globale. In assenza di politiche volte a limitare le emissioni di GHG, gli scienziati prevedono la crescita di questo problema e il conseguente cambiamento climatico, con tutti i problemi ad esso connessi: ad esempio, tutti i danni economici derivanti dagli eventi meteorologici che distruggono gli ecosistemi. Le esternalità, dunque, entrano in gioco poiché i costi e i rischi legati al cambiamento climatico sono sopportati dall'intera comunità, mentre vi sono pochi meccanismi volti a costringere coloro che traggono vantaggio dalle attività che emettono GHG ad internalizzare questi costi.

L'atmosfera, infatti, rappresenta un bene pubblico e ciò rende difficile l'identificazione di soluzioni tramite trattative private. Individuare e concordare politiche per internalizzare i costi sociali delle emissioni di GHG a livello globale rappresenta un problema estremamente complesso, anche alla luce della resistenza posta da alcuni individui e da aziende, e ciò porta ad una maggiore difficoltà nell'applicazione di politiche comuni (Tirole, 2008).

La sottostante *Figura 4* mostra i principali gas serra responsabili del cambiamento climatico: quest'ultimo si verifica quando la concentrazione di GHG nell'atmosfera risulta troppo alta, poiché essi intrappolano troppo calore sulla superficie terrestre, causando un aumento delle temperature.

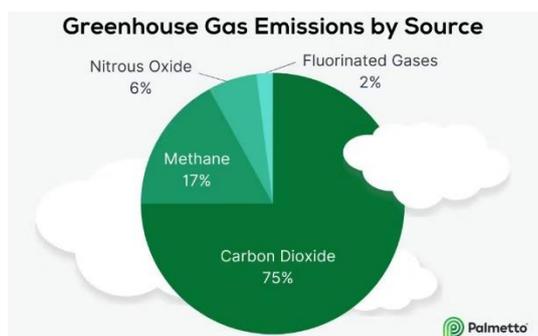


Figura 4 (fonte: www.palmetto.com)

2.4 Analisi teorica sull'effetto del mercato volontario di crediti di carbonio

Alcuni recenti studi hanno analizzato l'effetto apportato dai programmi volontari di crediti di carbonio sulle riduzioni nette delle emissioni di GHG (Wang et al., 2021) (Wei, 2016).

L'analisi è stata effettuata partendo dalla situazione in cui non vi è alcuna compensazione, passando poi allo scenario in cui la produzione è inserita in un contesto di mercato volontario di crediti di carbonio.

2.4.1 Scenario base (BAU, *Business As Usual*)

Lo scenario base studia il caso di produzione in assenza di scambio di crediti di compensazione. L'assunzione principale riguarda la possibilità di scelta per il produttore tra due diverse tecnologie di produzione, le quali comportano due diversi livelli di emissione:

- x_1 : tecnologia base, più accessibile a livello economico ma più inquinante;
- x_2 : tecnologia più costosa che permette di ridurre le emissioni.

Il produttore massimizza i profitti risolvendo il seguente problema di ottimizzazione, in cui è scelta soltanto una delle due tecnologie:

$$\begin{aligned} \text{Max } \pi &= (px_1 + px_2) - x_1C_1(x_1) - x_2C_2(x_2) \\ \text{s. t. } x_1x_2 &= 0 \\ x_1, x_2 &\geq 0 \end{aligned}$$

p rappresenta il prezzo del prodotto finale, mentre $C_i(x_i)$ è la funzione di costo per la produzione di x_i . Il due vincoli assicurano che soltanto una delle due tecnologie sia scelta, come detto in precedenza. Inoltre, si assume che $C_i(x_i)$ sia una funzione lineare crescente con la quantità prodotta:

$$C_i(x_i) = c_i + dx_i$$

Per semplicità, si assume inoltre che entrambe le funzioni di costo crescano ad un tasso positivo d all'aumentare dei volumi e che siano inizialmente redditizie sul mercato ($c_2 > c_1 > 0; p - c_i > 0; d > 0$).

Risolvendo tale problema si giunge alla conclusione che soltanto x_1 è prodotta, in quanto risulta essere economicamente più efficiente:

$$x_1^* = \frac{p - c_1}{2d}; \quad x_2^* = 0$$

Per quanto riguarda le emissioni, si assumono due livelli e_i tali che $e_1 > e_2$; inoltre, per semplicità, entrambi i livelli sono dello stesso segno. Il livello totale di emissioni in assenza di un mercato di crediti (*Business As Usual*, BAU) risulta essere:

$$EB^* = e_1x_1^* + e_2x_2^* = \frac{e_1(p - c_1)}{2d}$$

Di conseguenza, e_1 rappresenta la baseline di emissioni che dovrà essere migliorata nello scenario successivo affinché il mercato di crediti sia ritenuto conveniente. Si noti, infine, che EB^* potrebbe essere negativo, qualora $e_1 < 0$.

2.4.2 Scenario con presenza di un mercato di crediti di compensazione

L'idea di base di questo scenario è quella analizzata nei capitoli precedenti: i produttori che riescono a ridurre le emissioni rispetto al caso BAU possono partecipare in questo mercato ed essere pagati in base alla differenza apportata.

In contrapposizione allo scenario precedente, in questo caso si aggiunge il prezzo delle emissioni di carbonio nel modello (M): così facendo, i produttori possono essere incentivati a scegliere x_2 e quindi a ridurre tali emissioni. Analiticamente, ciò porta ad un modello del tipo:

$$Max \pi = (px_1 + px_2) - x_1C_1(x_1) - x_2C_2(x_2) - M[x_1(e_1 - e^b) + x_2(e_2 - e^b)]$$

$$s. t. x_1x_2 = 0$$

$$x_1x_2 \geq 0$$

dove e^b è il livello di base di emissione per unità di produzione che i produttori devono raggiungere per partecipare al mercato e ricevere un pagamento. In questo caso, quindi, i produttori ricevono una sovvenzione solo se il loro livello netto di emissioni è inferiore ad e^b : di conseguenza, si impone $e^b = e_1$ dal momento che x_1 fa riferimento al caso BAU e l'equazione diventa:

$$Max \pi = (px_1 + px_2) - x_1C_1(x_1) - x_2C_2(x_2) - M[x_2(e_2 - e_1)]$$

Da questa equazione si evince che continuare ad usare la tecnologia x_1 comporta la non partecipazione al mercato, mentre usando x_2 si ottiene un pagamento pari a $Mx_2(e_1 - e_2)$, ma anche un maggior costo di produzione.

La soluzione ottima, quindi, dipende dal prezzo M :

$$\text{se } M < \frac{c_2 - c_1}{e_1 - e_2} \quad \rightarrow \quad x_{1,v}^* = \frac{p - c_1}{2d}; \quad x_{2,v}^* = 0$$

$$\text{se } M > \frac{c_2 - c_1}{e_1 - e_2}: \quad \rightarrow \quad x_{1,v}^* = 0 \quad ; \quad x_{2,v}^* = \frac{p - c_2 - M(e_2 - e_1)}{2d}$$

Quindi, sotto una certa soglia di prezzo M , il produttore continua a preferire la tecnologia x_1 ; invece, nel momento in cui M cresce sopra tale soglia, il produttore adatta la produzione alla tecnologia più efficiente dal punto di vista delle emissioni, ovvero la più desiderabile a livello sociale. A questo punto si può vedere come i livelli di emissioni (E_v^*) sono influenzati dai pagamenti ricevuti nel mercato volontario (considerando, quindi, solo la produzione con x_2 nello scenario in cui $M > \frac{c_2 - c_1}{e_1 - e_2}$):

$$E_v^* = e_2 x_{2,v}^* = \frac{e_2 [p - c_2 - M(e_2 - e_1)]}{2d}$$

Dall'equazione precedente, è possibile notare che le emissioni sono positivamente correlate con il prezzo del carbonio M per strategie di produzione con emissioni positive ($e_2 > 0$, cioè casi in cui il mercato paga per progetti di riduzione delle emissioni), mentre sono negativamente correlate per strategie che generano emissioni negative ($e_2 < 0$, ovvero i progetti di sequestro di GHG, oggetto di analisi nel prosieguo).

A questo punto si esegue un confronto tra E_v^* e il livello di emissioni nel caso BAU:

$$E_v^* - EB^* = e_2 x_{2,v}^* - e_1 x_1^* = \frac{e_2 [p - c_2 - M(e_2 - e_1)]}{2d} - \frac{e_1 (p - c_1)}{2d}$$

Per semplificare l'equazione, si impone:

$$c_2 = c_1 + \Delta c$$

$$e_1 = e_2 + \Delta e$$

L'equazione, quindi, diventa:

$$E_v^* - EB^* = e_2 x_{2,v}^* - (e_2 + \Delta e) x_1^* = \frac{e_2 (p - c_1 - \Delta c + \Delta e M)}{2d} - \frac{(e_2 + \Delta e) (p - c_1)}{2d}$$

Semplificando, si ottiene:

$$E_v^* - EB^* = e_2 (x_{2,v}^* - x_1^*) - \Delta e x_1^* = \frac{\Delta e (p - c_1) - e_2 \Delta c + \Delta e M e_2}{2d}$$

Si noti che tutti i termini di quest'ultima equazione sono definiti positivamente, eccezion fatta per e_2 (positivo per progetti di riduzione, negativo per progetti di sequestro). A questo punto, è necessario proseguire l'analisi indagando l'effettivo impatto della presenza del mercato: per far ciò, si considerino separatamente i due casi in cui le emissioni nette sono positive (programma di riduzione) o negative (programma di sequestro).

Nel caso di emissioni nette positive ($e_1, e_2 > 0, \Delta e > 0$), il termine $+\Delta e M e_2$ è composto da termini tutti positivi: di conseguenza, ciò può portare ad un incremento delle emissioni all'aumentare del prezzo M . Quindi, si risolve l'equazione precedente con M tale che le emissioni dello scenario corrente superino quelle del caso BAU:

$$E_v^* - EB^* > 0 \leftrightarrow M > \frac{c_2 - c_1}{e_1 - e_2} + \frac{p - c_1}{e_2}$$

Quando M supera tale soglia, quindi, si ottiene un "effetto rimbalzo" (dall'inglese *rebound effect*): ciò significa che l'introduzione di un prezzo delle emissioni M troppo alto provoca, paradossalmente, un aumento delle stesse sopra il livello base.

Nella situazione in cui le emissioni nette sono negative, considerando il caso in cui si voglia raggiungere un aumento della dimensione del sequestro di GHG ($x_2 > x_1$) a parità di tecnologia disponibile (quindi Δc e Δe sono entrambi nulli), si ottiene che la differenza di emissioni tra i due scenari si annulla. Di conseguenza, il prezzo M non fornisce alcun incentivo ad aumentare la dimensione del progetto di sequestro.

In conclusione, si può evidenziare il fatto che il mercato volontario possa fornire incentivi all'utilizzo di tecnologie ecologicamente più efficienti (nonostante il costo superiore) grazie al processo di "internalizzazione" delle esternalità negative. Tuttavia, sia nel caso di progetto di riduzione che in quello di sequestro delle emissioni, il mercato volontario può portare ad effetti indesiderabili o risultare inefficace nel fornire incentivi. Per questo motivo, nel seguito della trattazione non saranno analizzati soltanto gli effetti positivi della compensazione, ma anche i possibili fallimenti di mercato ad essa associati.

3. Evoluzione storica delle politiche climatiche e la creazione del VCM

3.1 UNFCCC e Protocollo di Kyoto

I negoziati multilaterali per affrontare il problema del cambiamento climatico indotto dall'uomo hanno prodotto un complesso insieme di politiche che comprende la Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (*United Nations Framework Convention on Climate Change*, UNFCCC) e il Protocollo di Kyoto (Ashford G., 2014).

Nel 1992, in occasione della Conferenza sull'ambiente e sullo sviluppo delle Nazioni Unite tenutasi a Rio de Janeiro (comunemente nota come Summit della Terra), è stata approvata l'UNFCCC. Tale convenzione è entrata in vigore nel 1994 ed è stata ratificata da 198 nazioni nel corso del tempo. Il ruolo dell'UNFCCC nel rivolgere l'attenzione sul problema del cambiamento climatico e nell'attribuire responsabilità alle azioni umane in merito è stato cruciale: infatti, la convenzione ha prodotto un accordo che ha ottenuto un ampio consenso internazionale su diversi principi. L'obiettivo principale riguardava la stabilizzazione delle concentrazioni di gas serra nell'atmosfera ad un livello che eviti interferenze dannose, assicurando allo stesso tempo un contesto favorevole allo sviluppo economico. Inoltre, l'UNFCCC riconosce il contributo dei combustibili fossili come causa della presenza di GHG nell'atmosfera e il legame tra l'aumento delle emissioni di GHG e l'alterazione dei sistemi climatici della Terra. In conclusione, l'UNFCCC include un meccanismo di assistenza finanziaria per i Paesi in via di sviluppo, mirato ad affrontare gli impatti del cambiamento climatico.

Durante la terza sessione della Conferenza delle Parti della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, svoltasi nel 1997, è stato stipulato l'ormai noto "Protocollo di Kyoto". Questo accordo coinvolge più di 160 nazioni ed è mirato alla mitigazione del cambiamento climatico attraverso una cooperazione globale volta alla riduzione delle emissioni di gas serra.

Il Protocollo di Kyoto ha stabilito impegni specifici per i Paesi industrializzati e quelli in transizione economica, richiedendo una riduzione del 5,2% delle emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990 entro il 2012. È importante sottolineare che il Protocollo non ha imposto limiti sulle emissioni a tutti i firmatari, ma solo a quelli elencati nell'Annex I: si tratta di un gruppo di 39 nazioni che include i membri dell'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico (OCSE) e quelli in transizione economica. La scelta è stata governata dal principio di "responsabilità comune ma differenziata", che implica che

i paesi industrializzati abbiano un ruolo maggiore nella gestione delle emissioni, considerando le esigenze di crescita dei paesi in via di sviluppo. In *Figura 5* è mostrata la partecipazione dei vari Stati, basata sugli Annex I e II del Protocollo:

- in verde le nazioni con obiettivi vincolanti nel secondo periodo;
- in viola quelle con obiettivi vincolanti nel primo periodo, ma non nel secondo;
- in blu quelle senza obiettivi vincolanti;
- in giallo quelle con obiettivi vincolanti nel primo periodo ma che hanno abbandonato il Protocollo;
- in arancione quelle che hanno firmato il Protocollo, senza poi ratificarlo;
- in rosso quelle che fanno parte delle Nazioni Unite ma che non hanno preso parte al Protocollo.

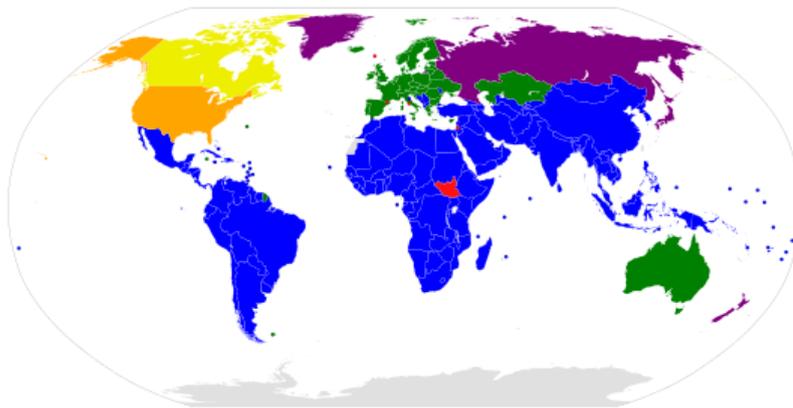


Figura 5 (fonte: www.wikipedia.org)

Al fine di garantire una attuazione flessibile del Protocollo di Kyoto, sono stati introdotti tre meccanismi principali, che di fatto creano un mercato delle emissioni (“*Carbon Market*”):

- *Emission Trading System*: meccanismo mediante il quale i Paesi soggetti a limiti sulle emissioni, se riescono a ridurle oltre gli obiettivi previsti, possono vendere il surplus ad altri Paesi che invece non riescono a raggiungere i propri obiettivi.
- *Joint implementation*: si tratta di una attuazione congiunta degli obblighi individuali, che permette ai Paesi di collaborare, accordandosi su una diversa distribuzione degli obblighi, per raggiungere collettivamente gli obiettivi complessivi fissati.
- *Clean Development Mechanisms*: meccanismi attuati per fornire assistenza negli sforzi per la riduzione delle emissioni ai Paesi privi di obblighi vincolanti.

La data in cui il protocollo è diventato giuridicamente vincolante a livello internazionale è il 16 febbraio 2005, quando la Russia ha depositato lo strumento di ratifica.

3.2 Il ruolo della COP21 e della COP26 nella creazione di un Carbon Market

Come analizzato in precedenza, il Protocollo di Kyoto ha dato il via alla creazione del cosiddetto mercato delle emissioni, o “*Carbon Market*”. Negli anni successivi si sono susseguite numerose conferenze sul clima, tra cui ricordiamo la COP21 di Parigi del 2015 e la COP 26 del 2021 di Glasgow: queste ultime, infatti, hanno sicuramente contribuito allo sviluppo di tale mercato.

Il documento ratificato al termine della COP21 del 2015 è noto come “Accordo di Parigi”. Al termine di ogni COP, la Conferenza delle parti della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC), viene infatti ratificato un documento che ufficializza gli accordi presi durante i negoziati. In questo accordo, l’obiettivo principale è quello di ridurre i livelli di emissioni di gas serra al fine di contenere l’aumento della temperatura globale sotto i 2°C rispetto al periodo preindustriale, impegnandosi a limitarlo a 1,5°C. Al fine di conseguire questo obiettivo, si sottolinea l’importanza di far sì che le emissioni globali di gas serra raggiungano il loro massimo il più presto possibile, per poi diminuire fino ad arrivare alla neutralità entro la seconda metà del secolo.

La Conferenza sul Clima del 2021 svolta a Glasgow, nota come Cop26, ha seguito il percorso delineato dalla Cop21: partendo dagli impegni intrapresi nell’Accordo di Parigi, i partecipanti alla Cop26 hanno identificato nuovi obiettivi per orientare l’approccio condiviso alle questioni climatiche. In accordo con quanto stabilito dall’articolo 6 dell’Accordo di Parigi, durante la COP26 sono stati identificati due approcci per lo scambio di crediti volti alla riduzione delle emissioni:

- ITMO (*Internationally Transferred Mitigation Outcomes*): si tratta di un termine introdotto dal Protocollo di Kyoto per riferirsi ai crediti di carbonio scambiati a livello internazionale tra due governi (i cosiddetti scambi bilaterali).
- SDM (*Sustainable Development Mechanism*): sistema internazionale multilaterale, supervisionato da un organo delle Nazioni Unite, che facilita la formazione di un mercato di scambio di emissioni, accessibile sia al settore pubblico che a quello privato.

Tuttavia, rispetto a quanto previsto dall'art. 6 dell'Accordo di Parigi, la COP26 non è, invece, riuscita a dare un seguito operativo a un terzo meccanismo immaginato, quello “non di mercato”, come è il caso degli “Aiuti allo sviluppo”, volto a incoraggiare la cooperazione climatica tra i Paesi in contesti non commerciali (Zupi M., 2023).

Nel contesto della discussione sull'attuazione dell'articolo 6 dell'Accordo di Parigi, non è stata fornita una chiara direttiva riguardo alla compravendita volontaria di crediti. Oltre al Clean Development Mechanism (CDM), regolamentato dalle Nazioni Unite, esiste un mercato autonomo di crediti di carbonio chiamato Voluntary Carbon Market (VCM), che opera su scala globale e su base volontaria. Questo mercato consente a imprese, organizzazioni o individui che desiderano neutralizzare o ridurre le proprie emissioni senza poter sostenere gli investimenti necessari nel breve termine di acquistare e utilizzare crediti di compensazione di carbonio. Tali crediti sono principalmente generati da progetti climatici promossi nei Paesi in via di sviluppo e sono certificati da enti terzi secondo standard di qualità stabiliti, che saranno oggetto di analisi approfondita nel prosieguo. Nonostante l'assenza di regolamentazione, è proprio a partire dall'Accordo di Parigi che i VCM hanno iniziato a crescere (Ravetti, 2021).

3.3 G7 Ambiente 2024: la “Carta di Venaria”

L'ultimo passo dei governi dei Paesi più industrializzati del mondo per raggiungere gli obiettivi di mantenimento di un limite di aumento della temperatura e di attuazione di strategie “*net-zero*” è stato fatto in occasione del G7 Ambiente, Energia e Clima, tenutosi a Venaria Reale il 29 e 30 aprile 2024. Nel documento finale del G7 dei Ministri dell'Energia e dell'ambiente, denominato “Carta di Venaria”, si sottolinea l'impegno dei Paesi ad eliminare gradualmente l'attuale produzione di energia da carbone, in modo tale da ridurre del 35% le emissioni globali da combustibili fossili entro il 2035.

Ulteriori impegni assunti da tale accordo riguardano proprio la creazione di schemi innovativi per raggiungere la decarbonizzazione, tra cui i metodi utilizzati dal VCM. Di seguito sono riportate due note significative tratte dal documento finale prodotto dal G7 (“Climate, Energy and Environment Ministers' Meeting Communiqué,” 2024):

“16. We recognize the importance of results-based payments for reducing emissions from deforestation and forest degradation and the role of conservation, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks in developing countries (REDD+), while respecting environmental and social safeguards, and payments for ecosystems services, as

well as high integrity carbon credits and other innovative financial mechanisms, as appropriate.”

“20.vii. [...] We commit to stimulate innovative schemes, such as payment for ecosystem services, green bonds, biodiversity offsets and credits, and benefit-sharing mechanisms, with environmental and social safeguards.”

Da queste due note risulta chiaro il sostegno dei governi alla creazione di forme alternative per il raggiungimento del carbon offset, tra cui appunto la creazione di meccanismi di scambio di crediti di carbonio, con una particolare attenzione alla loro qualità.

4. Voluntary Carbon Market (VCM)

L'Organizzazione delle Nazioni Unite (ONU) ha definito gli obiettivi di sviluppo sostenibile (*Sustainable Development Goals*, SDGs) al fine di assicurare un futuro migliore e più sostenibile per l'umanità. L'obiettivo numero 13 riguarda proprio la lotta al cambiamento climatico: "Promuovere azioni, a tutti i livelli, per combattere il cambiamento climatico". La *Figura 6* mostra l'elenco degli obiettivi specificati dall'ONU.



Figura 6 (Fonte: <https://sdgs.un.org/goals>)

A tal proposito, la creazione di un mercato volontario di compensazione delle emissioni, denominato come Voluntary Carbon Market (VCM), ricopre un importante ruolo nella transizione verso la neutralità di carbonio. Come è stato visto in precedenza, il VCM è un meccanismo volontario di generazione di crediti di carbonio che sono creati, verificati e scambiati al di fuori della regolamentazione dei governi: infatti, individui e società comprano crediti di compensazione del carbonio per pareggiare le proprie emissioni di GHG in un mercato parallelo a quello creato dal regolatore pubblico.

Il ruolo della compensazione nella transizione verso il *Net-Zero* può essere riassunto in alcuni punti principali, che saranno oggetto di ulteriori analisi nel seguito:

- Attribuire un prezzo alle emissioni di CO₂ (seguendo, quindi, quanto visto in precedenza con il meccanismo di internalizzazione delle esternalità negative).
- Indirizzare i finanziamenti verso progetti di mitigazione che riducono le emissioni di CO₂ da subito, e che di solito non ottengono facilmente capitali nei mercati locali.

- Promuovere concretamente pratiche quali la conservazione delle foreste, la riforestazione e l'agricoltura rigenerativa.

Significative sono a questo proposito le parole di Christiana Figueres, ex Segretaria Esecutiva della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC) tra il 2010 e il 2016. Quest'ultima, infatti, ha dichiarato che i meccanismi di compensazione rappresentano una parte necessaria degli sforzi volti a migliorare la resilienza alle future catastrofi, con l'obiettivo di migliorare la qualità della vita umana sul pianeta per molti anni a venire. L'ex Segretaria dell'UNFCCC ha inoltre sottolineato che, se condotti con integrità e regolamentati da norme e meccanismi di responsabilità adeguati, gli offset possono assistere sia le aziende che i Paesi, indipendentemente dalle dimensioni, nel passaggio verso un futuro a emissioni *Net-zero*, fornendo allo stesso tempo supporto alle comunità locali. Figueres, tuttavia, ha ribadito l'importanza di ridurre le emissioni, insistendo sul fatto che i meccanismi di offset non dovrebbero rappresentare un "permesso" duraturo per continuare ad emettere.

Nel prosieguo di questo capitolo saranno analizzati alcuni aspetti principali di questo mercato: in primo luogo, saranno individuati gli attori che ne fanno parte; in secondo luogo, sarà fatta una rassegna delle varie tipologie di progetti che possono rientrare in questo contesto. Inoltre, saranno analizzati i criteri di qualità a cui tali crediti devono attenersi e i registri nati per garantirli; infine, si affronteranno i problemi e le critiche relativi a tale mercato.

4.1 Attori principali presenti nel VCM

La concezione, l'attuazione e la gestione dei progetti nati in un contesto di compensazione volontaria delle emissioni di carbonio richiedono la collaborazione di diverse entità. Sebbene gli attori coinvolti possano differire da un progetto all'altro, esistono alcune categorie di operatori di mercato che rimangono costanti e risultano presenti nella quasi totalità dei progetti (Chen et al., 2021). La seguente *Figura 7* mostra gli attori principali in un contesto di compensazione volontaria delle emissioni di carbonio.

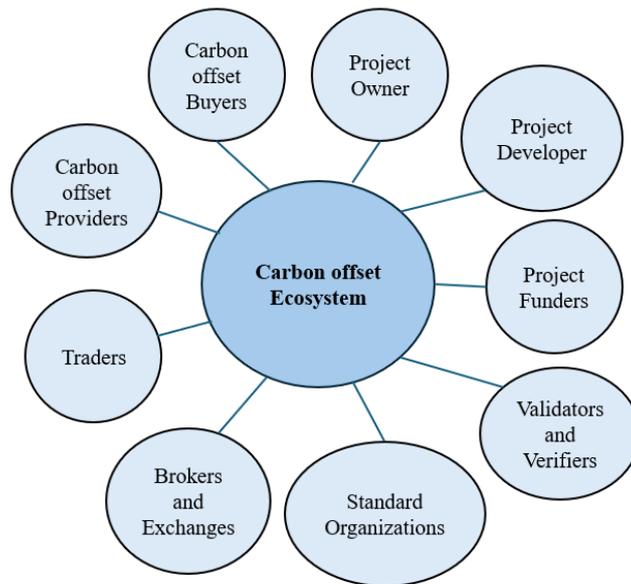


Figura 7

- **Project Owner:** si tratta di persone fisiche, aziende o altre organizzazioni e rappresentano i proprietari del progetto attraverso cui l'offset viene messo in atto.
- **Project Developer:** persone fisiche o organizzazioni che sviluppano un progetto di riduzione delle emissioni. Possono essere il proprietario stesso del progetto, oppure consulenti e fornitori di servizi specializzati. Il loro compito riguarda l'organizzazione del progetto in tutte le sue fasi, tra cui la presentazione dei documenti necessari alla registrazione e alla certificazione, oppure l'ottenimento dei finanziamenti necessari.
- **Project Funders:** si tratta di banche, società di private equity, investitori privati, organizzazioni no-profit o altre organizzazioni in grado di fornire i finanziamenti necessari alla realizzazione del progetto.
- **Validators and Verifiers:** validatori accreditati di terze parti incaricati di convalidare il progetto e di verificarne le riduzioni di emissioni previste e raggiunte.
- **Standards Organizations:** entità che definiscono un insieme di regole e di criteri per l'emissione di crediti di compensazione, nate per certificare la qualità dei progetti proposti.
- **Brokers and Exchanges:** intermediari che facilitano la negoziazione di crediti volontari di carbonio. Le borse rappresentano piattaforme di negoziazione ufficiali, mentre i broker organizzano transazioni private per prodotti non standardizzati o per piccoli volumi di crediti.

- **Traders:** professionisti che effettuano una compravendita dei crediti per sfruttare le distorsioni dei prezzi di mercato e le opportunità di arbitraggio.
- **Carbon-Offset Providers:** fornitori che offrono crediti di compensazione da un portafoglio di progetti, ottenuto da intermediari o direttamente dagli sviluppatori.
- **Carbon-Offset Buyers:** rappresentano gli acquirenti finali, ovvero coloro che comprano i crediti di compensazione di carbonio per controbilanciare le proprie emissioni di GHG, e che li ritirano definitivamente dal mercato dopo l'utilizzo.

L'analisi degli attori e degli stakeholders risulta fondamentale per capire i flussi e i processi che nascono nell'ambito del mercato volontario dei crediti di compensazione del carbonio. Tale analisi, infatti, permette di comprendere meglio le relazioni tra le diverse entità: infatti, in questo contesto, le azioni intraprese da una entità influenzano tutte le entità correlate.

4.2 Tipologie di progetti per compensare le emissioni in un contesto di VCM

Nel contesto del Voluntary Carbon Market si individuano due principali categorie di progetti che generano crediti di carbonio: i progetti di riduzione e quelli di rimozione. L'obiettivo di tali iniziative è quello di ridurre o eliminare le emissioni di gas serra (GHG) dall'atmosfera, contribuendo così alla mitigazione dei cambiamenti climatici (Vickers et al., 2012).

I progetti di riduzione si concentrano sulla prevenzione e abbassamento delle emissioni di gas serra che altrimenti si verificherebbero in una situazione di *Business As Usual*. Solitamente, essi coinvolgono l'adozione di tecnologie o pratiche più "pulite" che riducono o eliminano le emissioni, evitando dunque i danni climatici ad esse collegate. Questi progetti mirano ad evitare le emissioni sostituendo attività ad alte emissioni con alternative a basse emissioni. Ad esempio, un progetto di questo tipo potrebbe prevedere l'installazione di sistemi di energia rinnovabile in situazioni in cui l'utilizzo di combustibili fossili risulta essere tuttora economicamente vantaggioso. In tal caso, l'installazione di pannelli solari o turbine eoliche, che producono energia pulita e sostituiscono il bisogno di generazione di energia da combustibili fossili, rappresenta un metodo per generare crediti di compensazione. Attraverso la riduzione delle emissioni, tali progetti contribuiscono a ridurre l'impronta di carbonio complessiva. Esistono, inoltre, progetti di riduzione "*nature-based*": si tratta di progetti che utilizzano la natura come "tecnologia" principale per evitare la produzione di emissioni aggiuntive. Un esempio di tali progetti è rappresentato dalla conservazione di aree naturali a rischio di sfruttamento: da un lato queste iniziative aiutano

a preservare l'ecosistema e la biodiversità, dall'altro comportano una diminuzione delle emissioni.

Per quanto riguarda i progetti di rimozione, noti anche come progetti di sequestro del carbonio o di compensazione, si fa riferimento a tecnologie create per catturare e immagazzinare o compensare le emissioni di gas serra già presenti nell'atmosfera. Questi progetti coinvolgono attività volte alla rimozione di anidride carbonica o altri gas serra dall'aria, immagazzinandoli in serbatoi naturali o artificiali. Queste iniziative migliorano la capacità della vegetazione e del suolo di assorbire CO₂ attraverso la fotosintesi, riducendo in maniera efficace la concentrazione di GHG nell'atmosfera nel corso del tempo. Le pratiche ad oggi più diffuse per sequestrare CO₂ sono sempre “*nature-based*” e la principale è la cosiddetta pratica di “*Afforestation and Reforestation*” (AR). Questi progetti coinvolgono la creazione di nuove foreste (afforestazione) o il ripristino delle foreste esistenti (riforestazione). Gli alberi assorbono anidride carbonica durante la fotosintesi, rendendo questi progetti efficaci nella rimozione di CO₂ dall'atmosfera (Olander and Ebeling, 2011).

La *Figura 8* mostra uno schema della divisione proposta in precedenza.

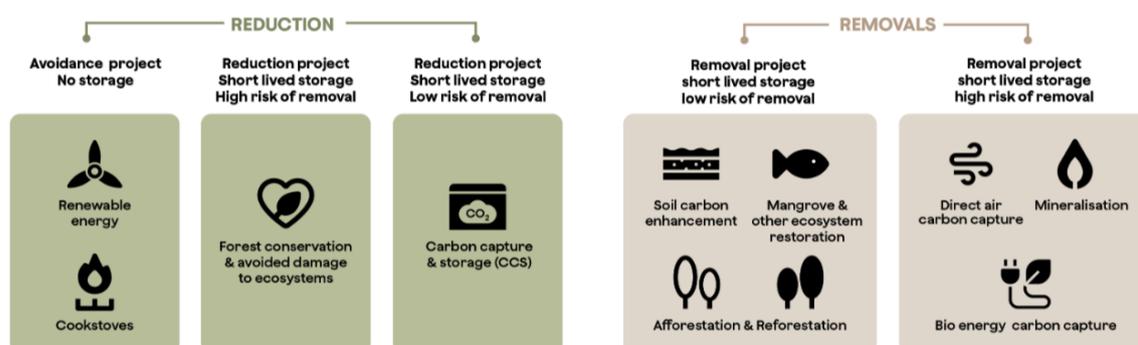


Figura 8

(Fonte: <https://www.senken.io/blog/what-are-the-types-and-categories-of-projects-in-vcms>)

Una categoria importante di progetti di compensazione delle emissioni è rappresentata dai cosiddetti “Forest carbon project”. Il sopracitato AR (*Afforestation and Reforestation*) ne è solo un esempio, ma ne esistono altri, riconosciuti dai principali enti certificatori come il Verified Carbon Standard (che saranno oggetto di analisi specifica nel prosieguo del capitolo). Tra questi, si possono citare i seguenti progetti (Lee et al., 2018):

- *Improved Forest Management* (IFM): si tratta di progetti che mirano attivamente a migliorare la gestione delle foreste. I promotori che progettano un progetto IFM

devono effettuare una analisi dei principali fattori che causano la degradazione delle foreste e descrivere alcune azioni specifiche, controllabili dal promotore del progetto e dai potenziali partner, per contrastare le pressioni alla degradazione e/o promuovere un miglioramento della gestione forestale. Queste azioni potrebbero includere, ad esempio, l'estensione del periodo di rotazione del terreno, la riduzione dei danni legati all'abbattimento mediante un miglior piano stradale, l'incremento delle aree di conservazione e l'adozione di pratiche per migliorare la rigenerazione.

- *Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation (REDD)*: si tratta di un particolare tipo di progetto volto alla cattura del carbonio attraverso le piante presenti nelle foreste. In questo caso, le foreste preesistenti non vengono rimosse, bensì conservate, protette o gestite in modo diverso rispetto al passato. Tale approccio mira a ridurre le emissioni derivanti dalla deforestazione, limitando il tasso di conversione della foresta in altre tipologie di uso del suolo. È importante notare che questi progetti non implicano un cambiamento nelle dimensioni dell'area forestale, che rimane costante.

Queste tipologie di progetti risultano essere molto più interessanti di altri, dal momento che possono generare alcuni “co-benefici” durante il raggiungimento dell’obiettivo di riduzione delle emissioni (Chenost et al., 2010). Infatti, un progetto di questo genere include co-benefici di tipo socio-economico, quali la creazione di posti di lavoro e la diminuzione della povertà, ma anche di tipo ambientale, come la gestione delle risorse idriche e la conservazione della biodiversità. Tutti questi vantaggi sono importanti per lo sviluppo stesso dei progetti e per la successiva vendita dei crediti ad essi connessi nel VCM.

4.3 Sviluppo dei progetti nel VCM

Il processo di sviluppo di un progetto per la compensazione del carbonio dura tipicamente tra i 18 mesi e i 6 anni ed è scomponibile in 6 fasi diverse (Battocletti et al., 2023). La seguente *Figura 9* presenta uno schema delle fasi di sviluppo.

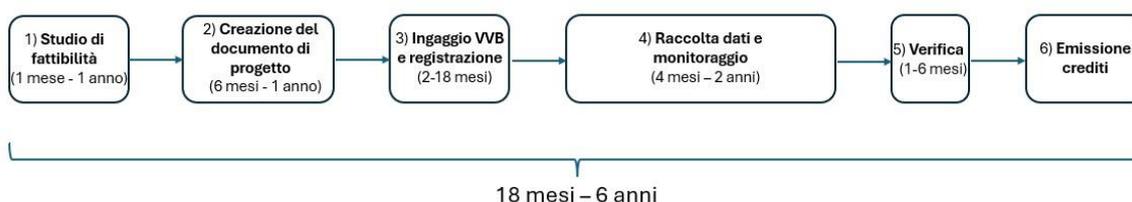


Figura 9

L'inizio del processo è caratterizzato dalla valutazione preliminare di fattibilità: in questa fase, lo sviluppatore del progetto si occupa di avviare i colloqui con le parti interessate e seleziona un organismo normativo per la futura certificazione dei crediti.

In secondo luogo, lo sviluppatore del progetto elabora un documento nel quale descrive le principali caratteristiche e fornisce le informazioni necessarie per valutarne la qualità. Tale documento, inoltre, dovrà contenere una stima della quantità di emissioni ridotte o evitate nel corso degli anni.

Nella fase successiva, il responsabile del progetto ingaggia un VVB (*Validation and Verification Bodies*): si tratta di un ente specializzato, scelto tra quelli accreditati dall'organismo normativo che certifica il progetto (i cosiddetti "Standard" che saranno analizzati in seguito), che ha lo scopo di controllare e confermare che il progetto sia conforme ai requisiti stabiliti. Tali VVB pagano una tassa annuale di accreditamento per mantenere la loro autorizzazione.

Nel corso del progetto, il VVB svolge una funzione di monitoraggio attraverso verifiche, visite in loco e analisi dettagliate dei dati rilevanti. Dal momento che questi controlli proseguono per tutto lo svolgimento del progetto, questa fase risulta essere la più lunga: infatti, essa occupa un intervallo temporale dai 4 mesi ai 2 anni.

Alla fine del progetto, l'ente certificatore esegue l'ultima fase di verifica, che può durare da 1 a 6 mesi: se l'ente stabilisce che il progetto è stato eseguito in conformità ai suoi standard, si può procedere con la quantificazione del volume di crediti di compensazione generati.

Infine, una volta che i crediti sono certificati, lo sviluppatore del progetto paga una tassa di emissione all'organismo normativo: quest'ultima risulta essere proporzionale al numero di crediti di compensazione generati. Inoltre, i futuri acquirenti di tali crediti dovranno pagare una ulteriore tassa per la creazione di un account presso lo standard di certificazione in questione: in questo modo, essi potranno trasferire e ritirare crediti di carbonio sul mercato.

La seguente *Figura 10* mostra una schematizzazione dei diversi attori presenti nel corso dello sviluppo del progetto e i cash flow generati durante le diverse fasi.

La successiva *Figura 11*, invece, mostra nel dettaglio tutte le interazioni tra i diversi stakeholders presenti nel Voluntary Carbon Market.

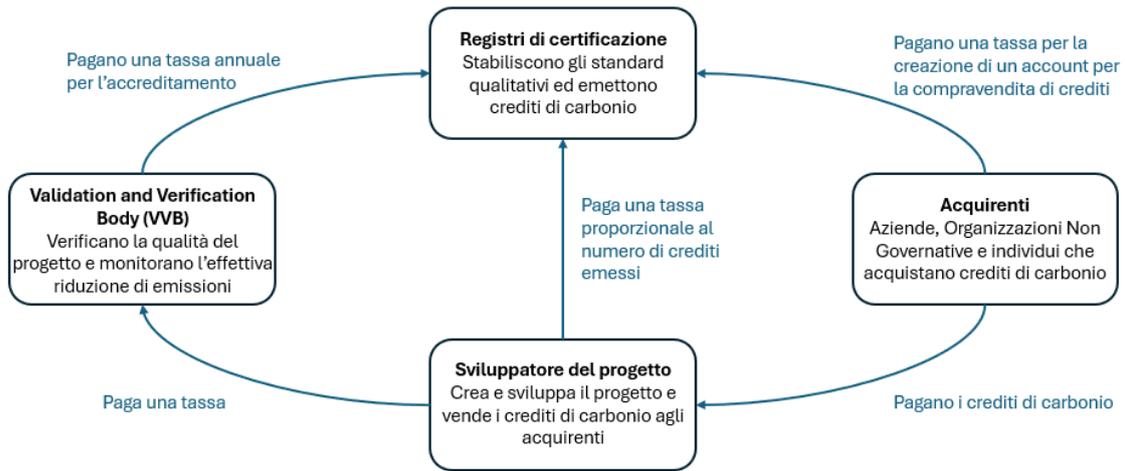


Figura 10

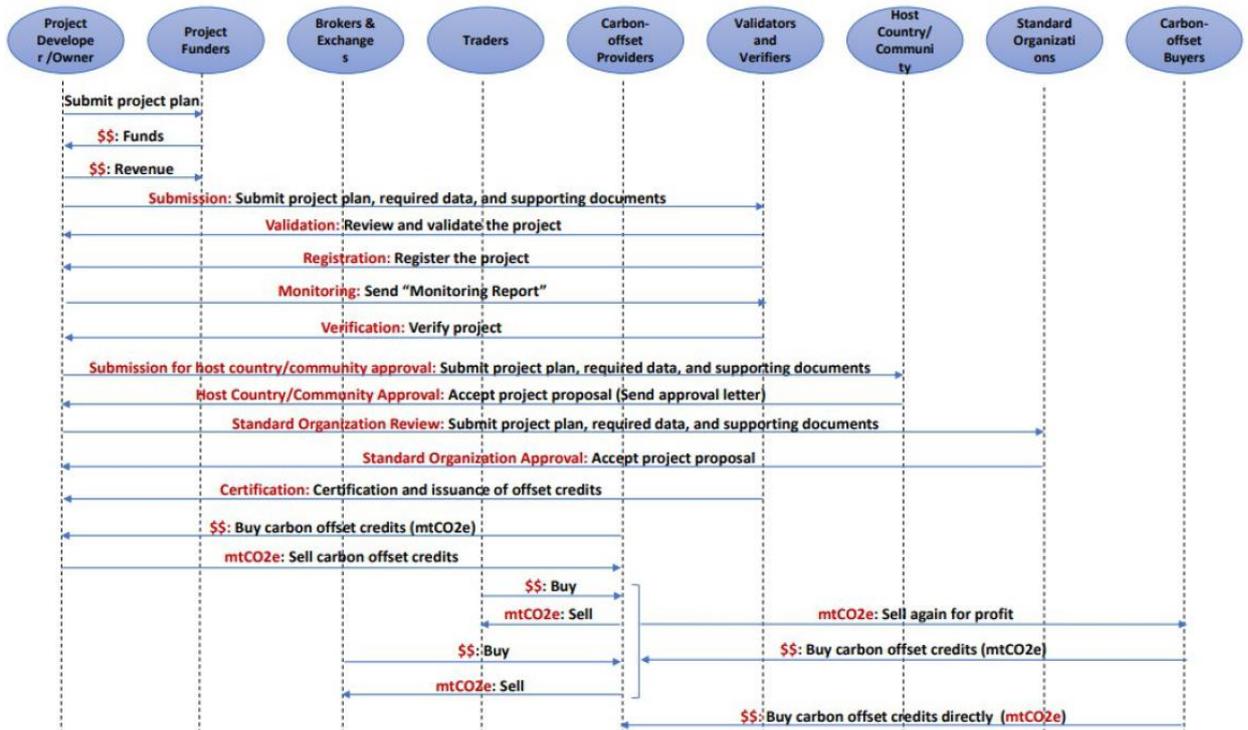


Figura 11

Fonte: (Chen et al., 2021)

4.4 Criteri di qualità

La Task Force sulla Scalabilità dei Mercati Volontari di Carbonio (TSVCM)¹, una iniziativa guidata dal settore privato volta al raggiungimento di una scala efficiente del mercato volontario di carbonio per contribuire al raggiungimento degli obiettivi dell'Accordo di Parigi, stabilisce che gli offset possono essere considerati di alta qualità se soddisfano i seguenti requisiti: devono essere reali, addizionali, quantificabili, verificabili e permanenti. Inoltre, non devono causare danni sociali o ambientali.

L'idea centrale dietro ad una compensazione del carbonio è che essa si possa sostituire alla riduzione di emissioni di GHG che una organizzazione avrebbe fatto autonomamente. Infatti, se l'emissione globale di GHG utilizzando un credito di compensazione del carbonio non è superiore rispetto al caso di riduzione autonoma delle emissioni, allora il credito è considerato in grado di preservare l'integrità ambientale (Schneider and La Hoz Theuer, 2019). Tuttavia, come anticipato in precedenza, è anche importante che non sorgano significativi danni (sia di natura ambientale che sociale) a seguito dell'utilizzo dei crediti. Quando si parla, dunque, di "qualità" di un credito di compensazione di carbonio, ci si riferisce al livello di fiducia che si può avere nell'utilizzo di tale credito affinché il principio base appena esposto sia rispettato.

Ad ogni modo, è possibile ricondurre il concetto di qualità ai seguenti criteri (Broekhoff et al., 2019):

- **Addizionalità:** i crediti devono essere riconducibili a riduzioni o rimozioni di emissioni di GHG che, in assenza della compravendita di tali crediti, non si sarebbero verificate. Si tratta, dunque, della caratteristica principale e può essere ulteriormente suddivisa in addizionalità finanziaria e addizionalità normativa.
 - Addizionalità finanziaria: questo criterio richiede che il progetto non sarebbe stato realizzato in assenza dei ricavi generati dalla vendita dei crediti. Dimostrare tale requisito risulta essere particolarmente impegnativo per i progetti di riduzione, poiché richiede di stabilire che non sarebbero state evitate emissioni senza il progetto stesso. Al contrario, tale criterio risulta essere più agevolmente verificabile nel caso dei progetti di rimozione dei GHG, in particolar modo per quelli che si basano sull'utilizzo della

¹ Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets, Public Consultation Report 3 (2021), https://www.iif.com/Portals/1/Files/TSVCM_Public_Consultation.pdf

tecnologia. Infatti, le tecnologie attuali per rimuovere la CO₂ dall'atmosfera sono costose: di conseguenza, è improbabile che lo sviluppatore del progetto abbia sufficienti incentivi ad intraprendere un simile piano senza la possibilità di rivendere i crediti di compensazione corrispondenti.

- Addizionalità normativa: l'addizionalità richiede anche che il progetto non sia realizzato allo scopo di soddisfare un requisito normativo. Pertanto, se una entità intraprende un progetto basato sull'utilizzo di energie rinnovabili in risposta alla nuova regolamentazione, essa non potrà emettere compensazioni di carbonio.

- **Accuratezza della stima**: affinché un credito sia di qualità, è necessario evitare sovrastime, che possono essere causate da diversi fenomeni.
 - Sovrastima delle emissioni iniziali di riferimento (*baseline emissions*): le riduzioni di GHG possono essere sovrastimate qualora le emissioni di base fossero state stimate al rialzo.
 - Sottostima delle emissioni effettive: molte tipologie di progetti riducono, ma non eliminano, le emissioni di GHG. Le riduzioni di GHG sono calcolate attraverso un confronto tra le emissioni effettive dopo l'implementazione del progetto con le emissioni di base previste. Di conseguenza, sottostimando le emissioni effettive, si ottiene una sovrastima della riduzione di GHG.
 - Noncuranza degli effetti indiretti (*spillover e leakage*): un progetto può avere effetti positivi sulle emissioni di GHG in un determinato ambito ma potrebbe (anche indirettamente) spostare il problema in un'altra area, diminuendo così l'efficacia della compensazione.
 - Assegnazione anticipata di crediti (*forward crediting*): in casi rari, i crediti possono essere emessi per riduzioni di GHG che un progetto mira a raggiungere in futuro. Qualora il progetto si rivelasse fallimentare, tale pratica conduce ad un eccessivo numero di crediti in circolazione, non corrispondenti ad un effettivo beneficio ambientale.

- **Permanenza**: le riduzioni di emissioni associate ai crediti non possono essere modificate dopo la generazione degli stessi. Tuttavia, alcuni progetti possono essere soggetti ad "inversioni": ad esempio, a seguito di un progetto di riforestazione, un eventuale incendio causerebbe il rilascio della CO₂ che il progetto stesso aveva

sequestrato. Per far fronte a questo problema, la maggior parte dei programmi ha istituito una “riserva tampone” per affrontare il rischio di inversione: in questo approccio, i crediti sono messi da parte in una riserva comune e possono essere utilizzati per compensare le inversioni di qualsiasi progetto. In questa evenienza, i crediti sono cancellati dalla riserva per conto degli acquirenti del progetto. Queste riserve risultano essere efficaci, ma presentano un problema di “rischio morale” se utilizzate per compensare le inversioni causate dall’uomo stesso (come, ad esempio, l’abbattimento intenzionale di alberi).

- **Rivendicazione esclusiva:** il sistema dei crediti di compensazione deve garantire che ogni riduzione sia rivendicata esclusivamente da una sola parte. Se più entità rivendicano la stessa riduzione, si verifica il fenomeno di “*double counting*”, che può avvenire in diversi modi:
 - Doppia emissione: è il caso in cui sono emessi più crediti per la stessa riduzione.
 - Doppio utilizzo: se due parti diverse contano sullo stesso credito per esigere il riconoscimento di riduzioni diverse.
 - Doppia rivendicazione: può verificarsi quando un progetto ottiene crediti per riduzioni già contate da un’altra entità.

La *Figura 12* mostrata nella prossima pagina presenta uno schema riassuntivo delle tre tipologie di problemi di “*double counting*”.

- **Assenza di danni sociali o ambientali:** i programmi di compensazione dispongono di politiche di salvaguardia ambientale e sociale, che hanno l’obiettivo di ridurre il rischio di effetti dannosi causati dai progetti registrati. Un criterio fondamentale, infatti, è quello secondo cui un progetto deve dimostrare di essere in conformità con tutti i requisiti legali della giurisdizione in cui è collocato e non deve creare danni sociali o ambientali. Inoltre, esistono anche alcuni programmi che richiedono la dimostrazione della presenza di benefici sociali e ambientali “congiunti” (i cosiddetti “co-benefici” nominati nel capitolo 4.2).

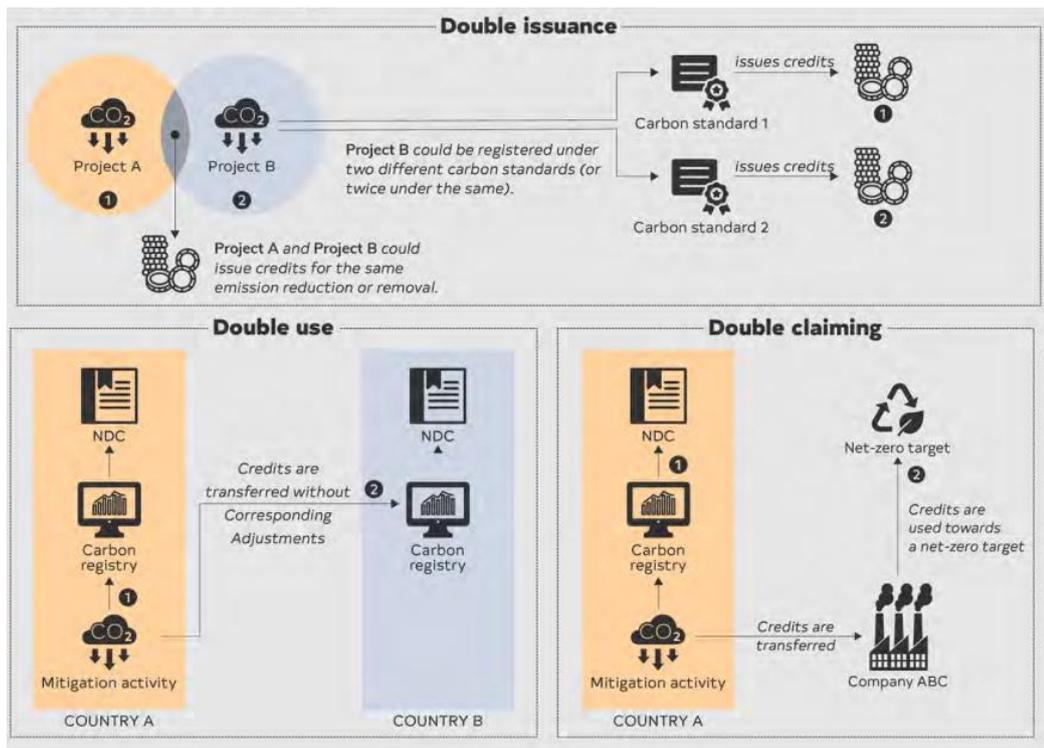


Figura 12

(Fonte: <https://vcmprimer.org/wp-content/uploads/2023/12/vcm-explained-full-report.pdf>)

4.5 Registri e programmi di compensazione

Lo sviluppo del Voluntary Carbon Market è strettamente legato alla presenza di enti certificatori: sebbene questo mercato non sia soggetto a stringente regolamentazione dei governi, è evidente che sia necessaria la presenza di organizzazioni che garantiscano la qualità dei crediti in circolazione, al fine di mantenere l'integrità del mercato stesso; di conseguenza, esistono due macrocategorie di organizzazioni che svolgono tali funzioni.

In primo luogo, vi sono i programmi di regolamentazione governativi, tra cui il sopracitato *Clean Development Mechanism* (CDM) di emanazione dell'ONU: questa categoria supervisiona lo scambio di compensazioni di carbonio garantendo il rispetto degli accordi internazionali sul clima. Si può dunque affermare che tali enti si occupano principalmente della certificazione di crediti di compensazione per scopi normativi, in riferimento ai mercati regolamentati (*compliance markets*, come l'ETS citato in precedenza).

L'altra categoria, invece, fa riferimento principalmente ad organizzazioni non governative (ONG) indipendenti. In questo caso, i registri sono nati con l'obiettivo di monitorare lo

sviluppo dei progetti di compensazione presenti nel mercato volontario. Recentemente, tuttavia, entrambe le categorie hanno iniziato ad occuparsi dei progetti di entrambi i tipi di mercati.

Dal momento che l'attenzione principale di questo lavoro è posta sul mercato volontario, di seguito saranno analizzati i principali standard di certificazione operanti nel VCM. Ciascun programma possiede caratteristiche uniche, nonché una normativa rigorosa personalizzata a seconda dell'obiettivo perseguito dalla tipologia di progetti oggetto di certificazione (Lee et al., 2018).

4.5.1 Verified Carbon Standard (VCS)

Il Verified Carbon Standard risulta essere il programma di compensazione di crediti di carbonio più utilizzato al mondo². Nato nel 2007 su iniziativa dell'organizzazione no-profit VERRA, esso mira allo sviluppo del mercato volontario attraverso la standardizzazione dell'unità di carbonio, al fine di garantire la qualità ed una maggiore intercambiabilità dei crediti (Bayon et al., 2012). Tale programma è divenuto il leader mondiale nel VCM grazie alla sua rigidità normativa, esprimibile in termini di regole da seguire e requisiti di qualità, alla sua adattabilità ai nuovi sviluppi tecnologici e soprattutto alla sua trasparenza: infatti, ciascun progetto è disponibile e consultabile sul registro pubblico di VERRA e ciò rappresenta una garanzia di qualità per gli acquirenti di crediti.

Il VCS, oltre alle proprie norme in materia di sviluppo di progetti di compensazione di carbonio, integra alcune metodologie sviluppate dal CDM e dal Climate Action Reserve (un ulteriore standard di certificazione che sarà oggetto di analisi successive).

È importante sottolineare, inoltre, che il VCS permette l'emissione di crediti soltanto a seguito della validazione e della verifica dei risultati del progetto: tramite questa emissione *ex-post*, il VCS vuole evitare la pratica di *forward crediting* che, come anticipato nel capitolo precedente, potrebbe minare la qualità effettiva della compensazione.

4.5.2 Gold Standard (GS)

Nato in Svizzera nel 2003 sotto l'egida di un gruppo di organizzazioni no-profit (World Wildlife Fund, SouthSouthNorth ed Helio International tra le principali), il Gold Standard (GS) è stato sviluppato per superare le carenze del CDM. Quest'ultimo, infatti, si concentra esclusivamente sulla riduzione delle emissioni di carbonio, seguendo gli obiettivi imposti a

² <https://verra.org/programs/verified-carbon-standard/>

partire dal Protocollo di Kyoto. L'ambito dei progetti del Gold Standard, invece, risulta essere più ampio: infatti, tutte le attività certificate devono produrre un impatto verso un minimo di 3 obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite (SDGs)³.

L'attenzione del Gold Standard alla creazione di co-benefici sociali ed ambientali è confermata dalla metodologia di sviluppo dei progetti: esso fornisce una “matrice di sostenibilità”, con l'obiettivo di guidare i *project owners* verso la creazione di progetti in linea con i criteri di sviluppo sostenibile. Inoltre, il GS richiede che gli indicatori critici siano monitorati per l'intero periodo di accreditamento e che le informazioni sullo stato di tali indicatori siano incluse nei rapporti di verifica, per garantire una maggiore trasparenza verso tutti gli stakeholders (Kollmuss et al., 2008).

4.5.3 American Carbon Registry (ACR)

Fondato nel 1996 negli Stati Uniti dall'organizzazione no-profit Environmental Resources Trust sotto il nome “GHG Registry”, esso rappresenta il primo registro privato volontario di compensazione di GHG. Il registro è stato poi rinominato “American Carbon Registry” nel 2008, a seguito dell'acquisizione da parte di Winrock International.

Attualmente, il registro può vantare una esperienza ventennale nello sviluppo di standard e di metodologie rigorose per la supervisione e la registrazione di progetti di compensazione: gli acquirenti di crediti di alta qualità possono fare affidamento su tale registro, che opera contemporaneamente sia sul mercato volontario che in quello regolamentato. L'ACR, infatti, è stato accettato a partire dal 2012 come registro di compensazione nel mercato regolamentato della California, il cosiddetto *California Climate Action Registry (CCAR)*; inoltre nel 2020 è stato approvato dall'Organizzazione Internazionale per l'Aviazione Civile (ICAO) per fornire crediti da usare nello Schema di Regolazione delle emissioni di carbonio dell'Aviazione Internazionale (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA*)⁴.

L'attenzione principale di tale registro è posta su alcuni settori chiave, in grado di contribuire al raggiungimento di risultati su larga scala: in primo luogo, alcune tecniche di silvicoltura (le tecniche IFM analizzate nel capitolo 4.2); inoltre, l'ACR cura l'implementazione di progetti di cattura e sequestro di carbonio (*Carbon Capture and Sequestration, CCS*); infine,

³ <https://www.goldstandard.org/gold-standard-for-the-global-goals/our-standard>

⁴ <https://acrcarbon.org/our-markets/voluntary-carbon-market/>

il registro promuove la rimozione di gas diversi dalla CO₂, inclusi i gas refrigeranti ad alto potenziale di riscaldamento globale (GWP).

4.5.4 Climate Action Reserve (CAR)

Il Climate Action Reserve rappresenta un programma di compensazione volontario nato negli Stati Uniti nel 2008. Tale registro si occupa di supervisionare le iniziative di compensazione volontarie sviluppate in negli Stati Uniti, in Canada e in Messico, ma supporta anche alcuni progetti afferenti ai mercati regolamentati, principalmente quelli della California e di Washington.

La missione del CAR risulta essere lo sviluppo di soluzioni di mercato credibili ed innovative per contrastare il cambiamento climatico. Tale programma, inoltre, fornisce assistenza ad organismi di supervisione indipendenti di terze parti e rilascia crediti di carbonio, denominati *Climate Reserve Tonnes* (CRT). Questi ultimi sono emessi a seguito di un rigoroso processo, che prevede un'ampia partecipazione di diversi stakeholders: grazie al suo elevato grado di trasparenza, questo protocollo è largamente considerato come uno degli standard di qualità più elevato per i progetti di compensazione del carbonio⁵.

4.5.5 Plan Vivo

Plan Vivo nasce nel 1994 dal desiderio di aiutare le comunità messicane di Chiapas a piantare alberi e a generare i primi crediti di carbonio al mondo sul mercato volontario⁶. Si tratta di uno standard di certificazione di progetti di uso del suolo, cambiamento di uso del suolo e silvicoltura su piccola scala (*Land use, land use change and forestry*, LULUCF), intrapresi principalmente nei paesi in via di sviluppo.

L'attenzione principale di tale organizzazione è rivolta alla creazione di co-benefici per le comunità rurali e alla conservazione della biodiversità, oltre allo scopo primario della riduzione delle emissioni di carbonio.

La differenza principale tra questo standard e i precedenti, tuttavia, è rappresentata dal metodo di emissione dei crediti: infatti, la Fondazione Plan Vivo principalmente certifica ed emette crediti di compensazione di carbonio *ex-ante*; quindi, gli sviluppatori del progetto ottengono i crediti all'inizio del progetto, mentre i benefici da esso derivanti saranno rilasciati nel corso della vita utile dello stesso.

⁵ <https://www.climateactionreserve.org/how/voluntary-offset-program/>

⁶ <https://www.planvivo.org/history>

Questa scelta risulta essere strettamente legata alla natura stessa dei progetti in questione: infatti, la pratica di *forward crediting* è riconosciuta come uno strumento di sostegno alle comunità rurali emarginate, che altrimenti non potrebbero partecipare al mercato del carbonio. Gli agricoltori dei paesi in via di sviluppo necessitano di finanziamenti anticipati per la creazione di sistemi forestali sostenibili: per questo motivo, essi non possono permettersi di investire in pratiche sostenibili con la sola speranza di poter vendere i crediti di carbonio da esse risultanti in futuro.

Come visto in precedenza, tuttavia, tale pratica implica l'insorgenza di alcuni rischi. Dal momento che l'impegno di tale registro risulta essere il sostegno alle comunità rurali, Plan Vivo ha creato un sistema di gestione del rischio pur di continuare in questa pratica di emissione. Tra le misure principali vi sono degli schemi di pagamento basati sulle prestazioni, in cui gli sviluppatori del progetto accettano un continuo monitoraggio e ricevono una parte dei pagamenti a seguito del raggiungimento di obiettivi predefiniti, ma soprattutto la creazione di una "riserva" di crediti non venduti, che possono essere utilizzati come copertura per eventuali perdite causate da eventi imprevisti nello svolgimento dei progetti.

4.5.6 Confronto tra i diversi standard

Come si evince dalla panoramica dei diversi standard proposta in precedenza, i registri differiscono in quanto ad obiettivi e servizi proposti, ma tutti perseguono lo scopo di fornire crediti di carbonio di alta qualità ai consumatori finali, garantendo trasparenza nel processo di certificazione per mantenere la loro credibilità (Chen et al., 2021).

Attraverso i dati pubblicati nel Voluntary Registry Offset Database, elaborato dal Berkeley Carbon Trading Project, è possibile avere un'idea della diversa quota di mercato servita dai diversi progetti. La seguente *Figura 13*, tratta da elaborazioni del database sopracitato, evidenzia il ruolo di leader ricoperto dal Verified Carbon Standard di VERRA, che raggiunge circa il 72% di market share. Gli altri registri mostrati sono il Gold Standard (GS), il Climate Action Reserve (CAR) e l'American Carbon Registry (ACR); il programma Plan Vivo non è mostrato poiché la sua quota risulta essere molto meno significativa delle altre (0,5% circa).

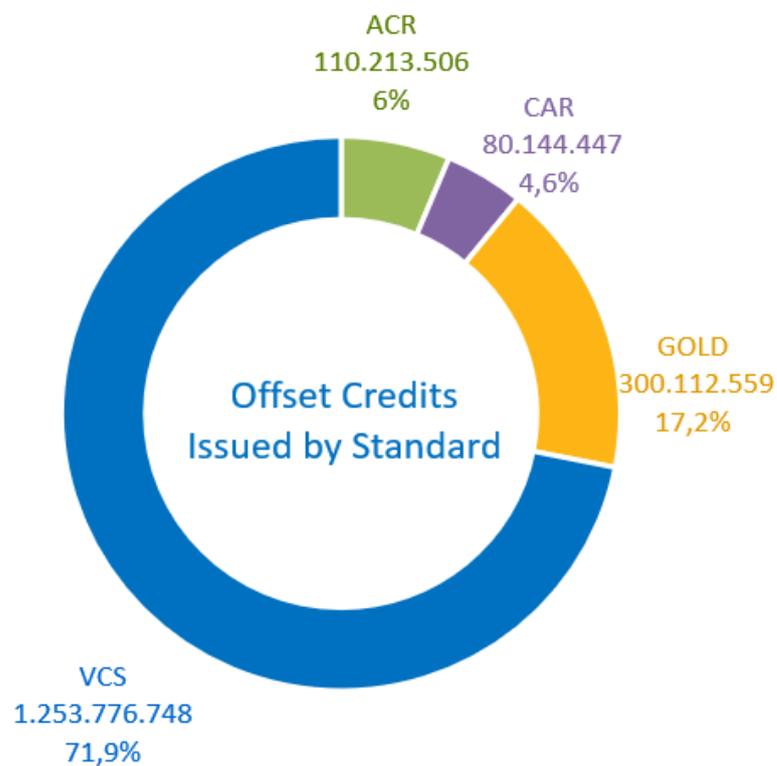


Figura 13

Significativa è anche la *Figura 14*, elaborata a partire dal sopracitato database, che mostra gli ambiti di sviluppo dei progetti: da tale figura si evince la predominanza di progetti *nature-based*, soprattutto relativi alle foreste e alla miglior gestione dei terreni.

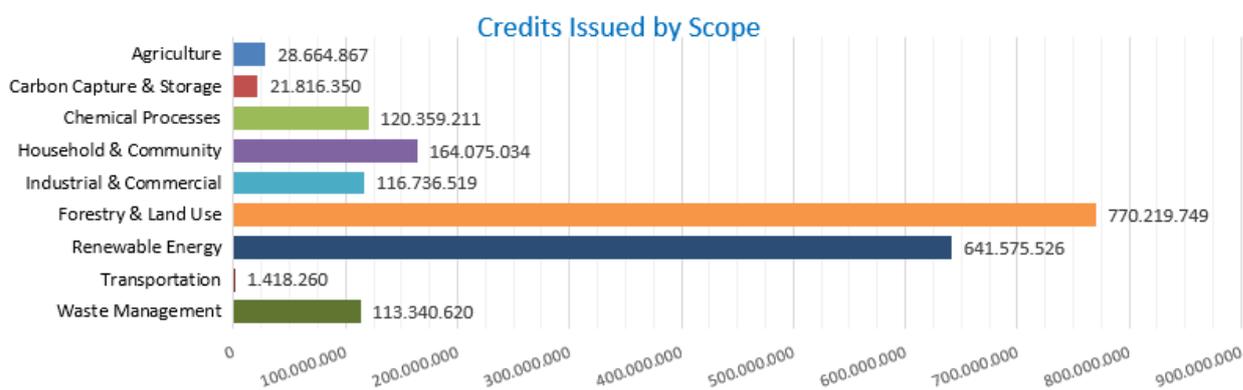


Figura 14

4.5.7 Puro.Earth

Oltre agli standard analizzati in precedenza, esistono altri programmi di compensazione di carbonio nel mercato volontario. Tra questi, risulta essere particolarmente rilevante **Puro.Earth**: si tratta di uno standard nato nel 2017 con l'idea di creare un modello di business scalabile per incentivare lo sviluppo di progetti di rimozione del carbonio. Ad oggi, con più di 170.000 tonnellate di CO_2 rimosse, *Puro.Earth* si posiziona come piattaforma leader mondiale per i progetti di rimozione ingegneristica del carbonio⁷. Tale crescita è testimoniata da due eventi rilevanti: in primo luogo, nel 2021 Nasdaq ha acquisito una quota di maggioranza in *Puro.Earth* al fine di creare una famiglia di indici unici per tracciare il prezzo del sequestro di carbonio⁸; inoltre, nel 2023 lo standard Puro è diventato il primo programma di crediti incentrato su progetti di rimozione permanente a ricevere l'approvazione dell'*International Carbon Reduction and Offset Alliance (ICROA)*.

Come detto in precedenza, l'attenzione di tale standard è posta sui progetti di rimozione: infatti, *Puro.Earth* non emette crediti per progetti di riduzione o di evitamento delle emissioni. Ciò è indice del fatto che questo programma mira ad evitare errori di conteggio dei crediti, garantendo una quantificazione rigorosa delle compensazioni ed una maggior trasparenza.

I metodi di rimozione adottati da *Puro.Earth* risultano essere molteplici e di seguito sono citati i principali:

- **Biochar**: si tratta di un materiale carbonioso molto stabile, in grado di resistere nel suolo per centinaia di anni, ottenuto da una conversione termochimica (denominata pirolisi) di rifiuti organici. Tale composto risulta essere impiegato per molteplici scopi, tra cui come ammendante del terreno o per il trattamento delle acque piovane. Il biochar sarà oggetto di ulteriori analisi approfondite nel corso della terza parte di questo lavoro.
- **Materiali carbonati**: si tratta di materiali di scarto industriali, quali scorie di acciaio o acque alcaline, che a seguito di una reazione con la CO_2 formano carbonati, immagazzinando l'anidride carbonica per periodi geologici.

⁷ <https://puro.earth/about>

⁸ <https://www.nasdaq.com/solutions/carbon-removal-platform>

- **Stoccaggio terrestre delle biomasse (*Terrestrial Storage of Biomass, TSB*):** è una soluzione di stoccaggio naturale a lungo termine. Tale metodo sposta il carbonio presente nel legno dal ciclo veloce, in cui si decompone in mesi o anni, inserendolo nel ciclo lento, al fine di imitare le condizioni in cui si crea naturalmente il carbone; si tratta, dunque, di un metodo di immobilizzazione del carbonio.
- **Carbonio immagazzinato geologicamente:** la metodologia di *Puro.Earth* consente la cattura dell'anidride carbonica dall'aria (*Direct Air Capture, DAC*) o da fonti biogeniche (*Bio-energy Carbon Capture Storage, BECCS*). A seguito della cattura, si procede con lo stoccaggio geologico attraverso l'iniezione diretta della CO_2 nelle formazioni geologiche profonde.

Il punto di forza di *Puro.Earth*, tuttavia, risulta essere il processo di verifica: infatti, questo standard garantisce un elevato grado di trasparenza e sottopone gli sviluppatori dei progetti di rimozione ad un rigoroso processo, per confermare l'effettivo impatto dei loro prodotti. Lo sviluppatore del progetto, di conseguenza, deve dichiarare la rimozione effettiva attraverso una valutazione del ciclo di vita del suo prodotto (*Lifecycle Assessment, LCA*), da cui deve risultare che tale prodotto ha rimosso più CO_2 di quanta ne abbia emessa durante il processo di produzione.

4.6 Problemi del VCM e fallimenti del mercato

A seguito dell'analisi dei criteri di qualità e della descrizione dei diversi standard di certificazione, è necessario soffermarsi sui riscontri effettivi del mercato: infatti, nonostante i vari impegni intrapresi volti a garantire l'integrità del VCM, esistono diversi problemi che causano dei veri e propri fallimenti di mercato.

Un primo problema riguarda la scala effettiva del VCM: secondo un report redatto da Shell e Boston Consulting Group nel 2021⁹, infatti, il VCM rappresenta un mercato in crescita (con un tasso di crescita annua composto del 30% dal 2015), ma è in grado di compensare soltanto una percentuale inferiore all'1% delle emissioni di CO_2 globali (sulla base dei volumi cancellati nel 2020 tra VCS, GS, ACR e CAR). La seguente *Figura 15*, tratta dal report sopracitato, evidenzia questo aspetto e mostra come più dell'80% delle emissioni rimanga non compensato da alcun tipo di programma.

⁹ “*Prospettiva per il mercato volontario della CO_2* ”, Shell, BCG (2021), disponibile al sito <https://www.shell.com/shellenergy/othersolutions/carbonmarketreports.html>

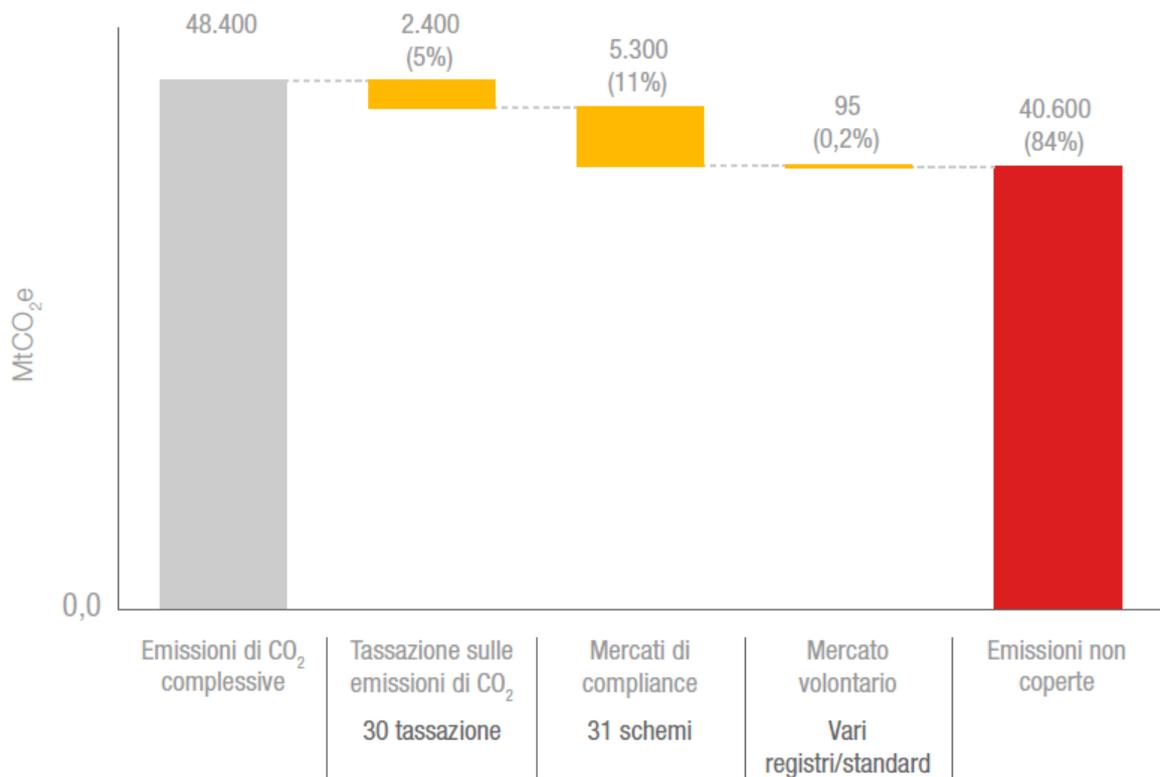


Figura 15

(Fonte: “Prospettiva per il mercato volontario della CO₂”, Shell, BCG, 2021)

Tale report, inoltre, evidenzia come il VCM sia un mercato altamente frammentato: la presenza di molteplici registri, ognuno dei quali avente un proprio metodo di valutazione, comporta una mancanza di standardizzazione, che si riflette in un divario tra domanda e offerta. Esistono, infatti, ampie differenze nel rapporto tra domanda e offerta in base alla tipologia e alla qualità dei progetti: le emissioni di crediti (*issuance*) continuano a superare i ritiri (*retirements*) e questo fenomeno evidenzia come l’offerta sia cresciuta più velocemente della domanda. Nel VCM, dunque, esiste un surplus di crediti percepiti come di bassa qualità: questi ultimi rimangono invenduti sul mercato e sono spesso caratterizzati da prezzi bassi (che riflettono, dunque, il valore intrinseco di tali crediti). I crediti di maggior qualità, invece, sono meno soggetti a questo disallineamento tra domanda e offerta. La seguente *Figura 16* mostra l’andamento delle emissioni e dei ritiri dei crediti nel VCM, evidenziando gli aspetti discussi in precedenza.

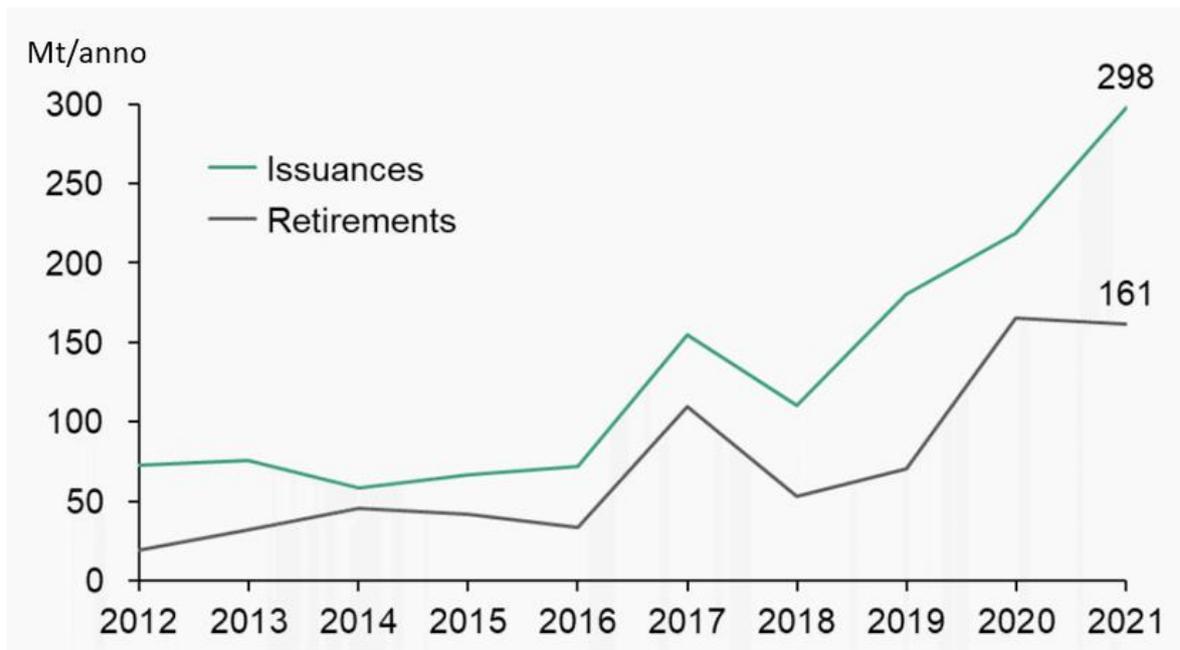


Figura 16

(Fonte: <https://www.carbon-direct.com/insights/assessing-the-state-of-the-voluntary-carbon-market-in-2022>)

Un ulteriore elemento di criticità caratterizzante il VCM è collegato alla credibilità: secondo un recente studio (Battocletti et al., 2023) esiste, infatti, un problema di credibilità dovuto alla natura stessa del modello su cui il VCM è basato. Infatti, il mercato volontario è costruito secondo uno schema che nella regolamentazione finanziaria è denominato “*issuer-pays*”: in questo schema vi è un ente di controllo, chiamato a vigilare sulla qualità dei progetti dei soggetti emittenti, che ottiene la sua fonte principale di entrate dagli emittenti stessi. Tale modello è chiaramente riconducibile alle relazioni esistenti nel VCM, in particolare quelle tra sviluppatori di progetti e standard di certificazione e ancora tra sviluppatori e VVB.

Nella prima relazione, lo sviluppatore promuove un progetto di compensazione ed è tenuto a pagare lo standard di certificazione sulla base del numero di crediti di carbonio da emettere. Nella seconda, invece, è il VVB che riceve una tassa dal project developer per la certificazione della qualità dei crediti. Il problema di credibilità, dunque, sorge proprio in merito a questi pagamenti dovuti: tutte e tre le parti in causa, infatti, possono trarre benefici da un fenomeno di inflazione dei crediti. Lo sviluppatore trae vantaggio poiché più è elevato il numero di crediti certificati, maggiore può essere il guadagno potenziale derivante dalla vendita degli stessi. I VVB, invece, hanno incentivi ad essere più indulgenti verso i project developers al fine di essere incaricati nuovamente in futuro da questi ultimi. Infine, gli

standard di certificazione beneficiano di maggiori introiti all'aumentare del numero di crediti certificati.

È evidente, quindi, che i diversi attori coinvolti possiedano incentivi a comportarsi in maniera opportunistica, lasciando spazio così ad un rischio di azzardo morale: tale fenomeno è alimentato dall'impossibilità, per gli acquirenti, di rilevare l'effettiva qualità dei crediti certificati. Infatti, il modello “*issuer-pays*” non risulta essere dannoso se gli acquirenti potessero valutare perfettamente la qualità dei crediti: così facendo, essi potrebbero determinare i casi in cui un ente certificatore “gonfia” il numero di crediti emessi. In questa situazione, quindi, il danno reputazionale per i certificatori funge da deterrente per i comportamenti opportunistici, in quanto causerebbe delle perdite superiori ai benefici ottenuti da tali atteggiamenti.

Infine, il problema principale che affligge il VCM riguarda l'efficacia dei crediti emessi, espressa in termini di addizionalità, permanenza e gli altri criteri di qualità analizzati nei capitoli precedenti. Un esempio lampante di questo fenomeno è ben riassunto in un recente lavoro di ricerca (West et al., 2020): gli autori, analizzando 12 progetti REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation in developing countries*) attuati nella foresta amazzonica brasiliana tra il 2008 e il 2017, mostrano come tali progetti certificati da VERRA (VCS) hanno sovrastimato le riduzioni delle emissioni di carbonio. Tale studio evidenzia come la stima della baseline di riferimento sia l'aspetto cruciale da valutare in questi progetti: come detto nei capitoli precedenti, infatti, un errore nella valutazione della baseline può compromettere l'accuratezza della stima della riduzione di emissioni. Effettivamente, lo studio in questione dimostra che l'errore è legato al fatto che le stime dei progetti erano basate sulle tendenze storiche di deforestazione, ma queste ultime non risultavano essere più plausibili nel momento dello sviluppo effettivo del progetto.

4.7 Regolamentazione del VCM e ruolo della tecnologia

Secondo un recente report di KPMG¹⁰, è indubbio che i governi svolgano un ruolo cruciale nello sviluppo del VCM e nel mantenimento della sua integrità. Infatti, i regolatori dovrebbero attuare politiche rigorose, volte ad aumentare la fiducia dei consumatori nei confronti dei crediti di carbonio, con particolare riguardo verso la loro qualità. Tale report

¹⁰ “*How can we scale a trusted voluntary carbon market?*”, 2024, report dell'evento “*Race to Zero: Empowering and Expanding Voluntary Carbon Markets*” organizzato da KPMG a Singapore il 24 ottobre 2023; disponibile al sito <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/sg/pdf/2024/01/how-can-we-scale-a-trusted-voluntary-carbon-market.pdf>

evidenzia l'importanza di assicurare una maggiore trasparenza per ristabilire questa fiducia: per far ciò, una possibile soluzione riguarda l'implementazione di un sistema tecnologico integrato che sia in grado di determinare il prezzo dei crediti in modo equo e permetta il monitoraggio delle prestazioni dei progetti in tempo reale. Il tentativo, dunque, è quello di affrontare l'asimmetria informativa relativa alla qualità dei crediti e per far ciò si ricorre a tecnologie quali la blockchain e l'intelligenza artificiale.

Un primo passo in questa direzione è stato fatto da World Bank attraverso *Climate Warehouse*¹¹: si tratta di una piattaforma pubblica e open-source che mira ad aumentare l'integrità, la trasparenza e la robustezza del conteggio delle riduzioni di emissioni trasferite a livello internazionale, in accordo con l'Articolo 6 dell'Accordo di Parigi. Essa utilizza la tecnologia blockchain: in particolare, si tratta di una tecnologia di archiviazione dei dati che consente la gestione decentralizzata degli stessi tra i vari partecipanti della rete (detti "nodi"), senza fare affidamento su un nodo centrale. La caratteristica peculiare della blockchain sta nella sua sicurezza: infatti, ciascun nodo è impossibilitato ad alterare la cronologia delle transazioni poiché la modifica di un blocco di transazioni implicherebbe la modifica retroattiva di tutti i blocchi successivi.

Il report prodotto da *Climate Warehouse*¹² dimostra che la blockchain semplifica la condivisione di dati tra i diversi registri di crediti di carbonio ed evidenzia i principali vantaggi ad essa associati:

- **Trasparenza:** la tecnologia blockchain, come detto in precedenza, è decentralizzata. Essendo accessibile a tutti i nodi, essa fornisce un metodo efficace di tracciamento degli effetti dei progetti di compensazione in tutta la loro vita utile.
- **Integrità:** il meccanismo di blocco delle alterazioni di tale registro ne garantisce l'immutabilità, assicurando quindi l'integrità dei dati.
- **Inclusività:** la sua natura decentralizzata permette l'accesso ai dati ad ogni nodo della blockchain.
- **Responsabilizzazione:** il design peer-to-peer della blockchain fa sì che ogni partecipante abbia il pieno controllo sui propri dati.

¹¹ <https://www.theclimatewarehouse.org/tools/simulation-3>

¹² "Climate Warehouse Simulation III", Report finale (2022), disponibile al sito <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099605009212233328/pdf/IDU09ef226cf0a663041d60869f07078d1af9fd3.pdf>

La seguente *Figura 17*, tratta dal report sopracitato, riassume i principali vantaggi associati all'utilizzo della blockchain nella creazione di un registro di crediti di carbonio nel mercato volontario.

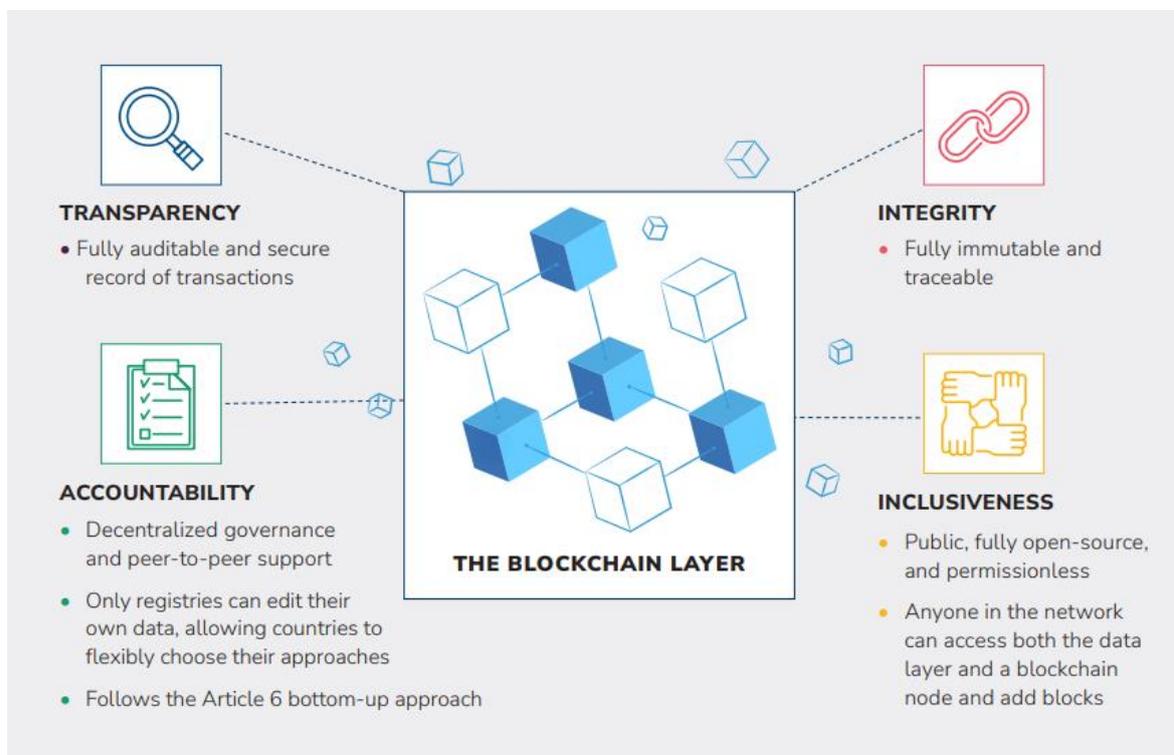


Figura 17

(Fonte: “Climate Warehouse Simulation III”, Report finale 2022)

L’ausilio della tecnologia, dunque, risulta essere cruciale per lo sviluppo del VCM; tuttavia, come detto ad inizio paragrafo, la crescita di questo mercato passa soprattutto attraverso le politiche regolatorie dei governi. Secondo un recente studio (Bakhtary and Streck, 2023), infatti, i governi svolgono un ruolo chiave per sbloccare il potenziale del VCM, creando quadri istituzionali che ne consentano la crescita. Ad esempio, gli autori sostengono che i governi possono collegare i programmi del mercato volontario di carbonio alle politiche pubbliche create in un’ottica *net-zero*, per garantire l’allineamento e la coerenza complessiva di tali iniziative. In particolare, tale studio afferma che i governi possono svolgere una triplice funzione per garantire lo sviluppo del VCM:

- **Regolatori:** in primo luogo, i governi devono stabilire normative atte a guidare lo sviluppo dei progetti di compensazione nei loro territori. Le agenzie pubbliche, inoltre, possono impegnarsi a creare un registro condiviso: imponendo la

registrazione dei vari attori coinvolti, tale iniziativa può portare ad una maggior trasparenza del mercato (come visto in precedenza con la blockchain). In aggiunta, le linee guida istituzionali possono prevedere accordi di condivisione dei benefici, affinché i progetti contribuiscano alla creazione di benefici sociali, oltre a quelli di contrasto al cambiamento climatico. Infine, i governi possono prevedere l'utilizzo dei crediti del mercato volontario in maniera integrata con i mercati regolamentati (*compliance markets*).

- **Facilitatori:** in qualità di facilitatori, i governi sostengono i progetti di compensazione attraverso investimenti pubblici o attraverso l'acquisto diretto di crediti, promuovendo pubblicamente tali iniziative.
- **Sviluppatori:** in questo caso, i governi partecipano direttamente al VCM. Entità pubbliche quali comuni, regioni o agenzie possono essere sponsor e co-sviluppatori di progetti di compensazione, collaborando dunque con i project developer.

4.8 Prospettive del VCM

La gravità dell'emergenza climatica comporta la creazione e lo sviluppo di iniziative volte a contrastarla: in questi termini, il mercato volontario dei crediti di compensazione del carbonio fornisce alle aziende i mezzi per ottenere un impatto diretto sul cambiamento climatico. Per questo motivo, il VCM deve affrontare le sfide necessarie per crescere in termini di dimensioni, struttura e soprattutto credibilità: per far ciò, come detto, è fondamentale l'intervento dei governi, ma un importante ruolo è svolto da altre iniziative, tra cui la *Taskforce for Scaling Voluntary Carbon Markets* (TSVCM) citata in precedenza.

Secondo il report di Shell e BCG già citato precedentemente¹³, esistono diversi fattori cruciali per indirizzare lo sviluppo del VCM nel breve termine: in primo luogo, come visto nel paragrafo precedente, è necessaria una maggiore coordinazione tra il mercato volontario e quelli di compliance, per determinare più accuratamente la domanda di crediti. In secondo luogo, risulta fondamentale il coinvolgimento di istituti di credito per garantire un maggior accesso ai finanziamenti agli sviluppatori dei progetti: soltanto così, infatti, i project developer possono promuovere iniziative di compensazione per far fronte alla crescente domanda di crediti di qualità. Inoltre, l'offerta di crediti può essere aumentata garantendo tempi di consegna più brevi: una maggior standardizzazione delle metodologie può portare

¹³ “*Prospettiva per il mercato volontario della CO₂*”, Shell, BCG (2021), disponibile al sito <https://www.shell.com/shellenergy/othersolutions/carbonmarketreports.html>

allo sviluppo di progetti in modo più rapido, fornendo così alle aziende dei mezzi immediati per il contrasto del cambiamento climatico. Infine, servono incentivi per gli sviluppatori volti ad aumentare la portata e la scalabilità dei loro progetti.

La crescente attenzione delle aziende verso i criteri ESG (*Environmental Social Governance*) porterà, con tutta probabilità, all'aumento di domanda di crediti *nature-based*, in particolare verso soluzioni di rimozione: infatti, tali iniziative risultano percepite come di alta qualità dagli acquirenti. La seguente *Figura 18* mostra il possibile trend futuro di sviluppo dell'offerta di crediti di carbonio, per far fronte al fenomeno appena analizzato.

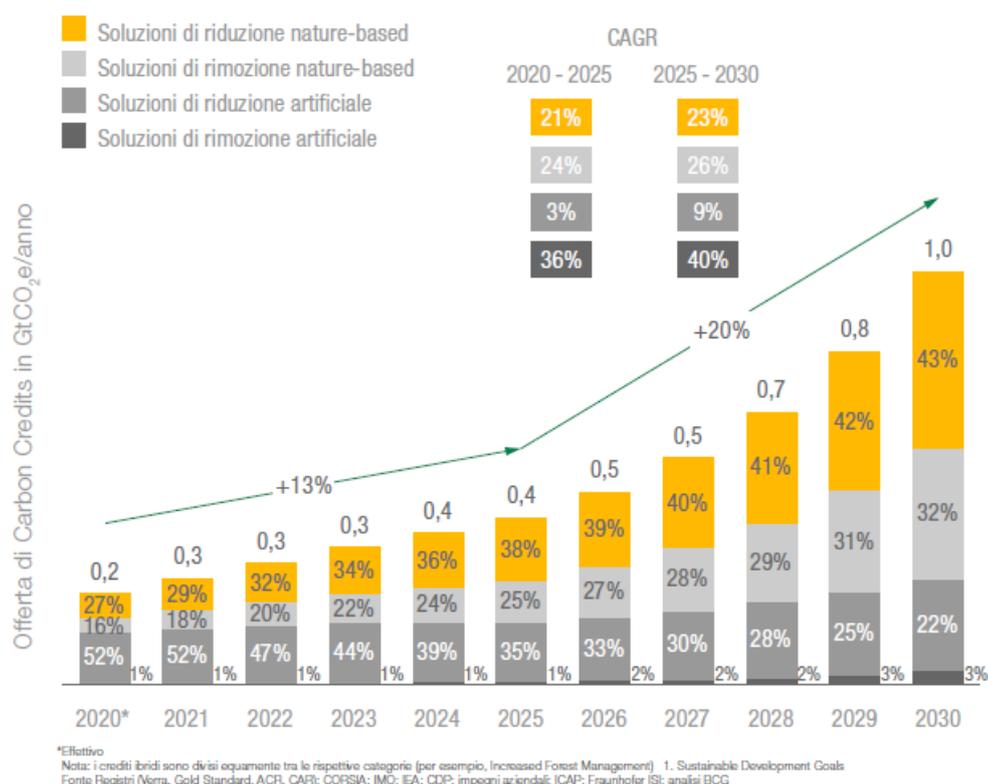


Figura 18

(Fonte: “Prospettiva per il mercato volontario della CO₂”, Shell, BCG, 2021)

Dalle analisi condotte, dunque, risulta che il VCM potrà ricoprire un ruolo cruciale nella lotta al cambiamento climatico soltanto se riuscirà a svilupparsi mantenendo un alto grado di integrità, superando quindi i problemi di credibilità e di qualità che attualmente lo affliggono.

SECONDA PARTE: ANALISI DI REGRESSIONE

5. Il rigore del VCM rispetto ai Clean Development Mechanisms

5.1 Panoramica di CDM, VCS e GS

Uno dei concetti principali relativi al mercato dei crediti di compensazione del carbonio riguarda la qualità di tali crediti, come analizzato nei capitoli precedenti. Lo scopo di questa parte sarà, dunque, analizzare se vi sono differenze tra i meccanismi di compensazione di compliance e quelli volontari in termini di “rigore”, ovvero nel processo di emissione dei crediti, in particolar modo in relazione al numero di crediti emessi: infatti, come analizzato in precedenza, uno dei problemi principali riguarda la sovrastima e l’inflazione del numero di crediti emessi.

L’analisi seguente si soffermerà in particolare su tre schemi di compensazione: il Clean Development Mechanism (CDM), che rappresenta uno degli strumenti di compliance nati dal Protocollo di Kyoto, e due schemi volontari, il Verified Carbon Standard (VCS) e il Gold Standard (GS). Mentre i due standard appartenenti al mercato volontario sono stati visti nel capitolo 4, è necessario invece approfondire ulteriormente il discorso sul CDM.

Il Clean Development Mechanism è uno dei meccanismi flessibili previsti dal Protocollo di Kyoto (art. 12) che consente alle imprese dei paesi industrializzati, sottoposti a vincoli di emissione, di implementare progetti che mirano alla riduzione delle emissioni di gas serra nei paesi in via di sviluppo, privi di tali vincoli. Risulta dunque evidente la duplice funzione di questo meccanismo: da un lato esso consente ai paesi in via di sviluppo di disporre di tecnologie più avanzate ed ecosostenibili, dall’altro permette di ottenere una riduzione delle emissioni in aree economicamente vantaggiose, raggiungendo una diminuzione globale dei costi necessari a soddisfare gli obblighi provenienti dal Protocollo di Kyoto. A seguito di tali progetti, qualora sia raggiunta una effettiva diminuzione delle emissioni, si generano dei crediti di emissioni, noti come CERs (Certified Emission Reductions), che possono essere utilizzati per l’adempimento degli obblighi di riduzione delle emissioni. Il processo relativo ad un progetto del CDM può essere suddiviso in diverse fasi: in primo luogo, una azienda privata o un ente pubblico promuove la realizzazione di un progetto in un paese in via di sviluppo, con l’obiettivo dichiarato di riduzione delle emissioni di gas serra. Successivamente, l’emissione evitata è valutata come differenza tra la quantità di gas serra emessa effettivamente e quella che sarebbe stata emessa in assenza del progetto (baseline)

ed è accreditata sotto forma di CERs. Infine, i crediti possono essere accumulati per usi futuri o direttamente venduti sul mercato.

Tutti i progetti di compensazione del carbonio si basano su standard internazionali, di cui i tre in analisi risultano essere i principali. Tali standard stabiliscono i requisiti essenziali che i progetti di compensazione devono soddisfare per essere riconosciuti come metodi comprovati per la riduzione delle emissioni di CO_2 e garantiscono la comparabilità dei certificati sia del mercato volontario sia di quello obbligatorio. Mentre il Gold Standard e il Verified Carbon Standard sono impiegati nel mercato volontario del carbonio, il Clean Development Mechanism è impiegato anche in quello obbligatorio. La differenza sostanziale tra questi tre schemi, tuttavia, non può essere ricondotta soltanto all'elemento della volontarietà, dal momento che anche il CDM può essere impiegato nel mercato volontario, ma va ricercata nella struttura istituzionale del regolatore: infatti, ogni progetto basato sul CDM deve essere approvato dal governo ospitante ed essere iscritto nel registro CDM delle Nazioni Unite.

5.2 Schema *Baseline-and-Credit* e modello Principale-Agente

È importante sottolineare il fatto che tutti e tre i meccanismi in esame sono basati su uno schema denominato *Baseline-and-Credit* (BAC): in questo schema, a differenza del *Cap-and-Trade*, non vi è un limite esplicito alle emissioni aggregate. Ogni impresa, infatti, ha il diritto di effettuare un certo livello di emissioni (baseline), derivato dai livelli di emissioni storiche o da uno standard di prestazione che specifica il rapporto consentito tra emissioni e produzione. Le aziende, dunque, ricevono crediti in relazione a quanto il loro livello di emissioni risulta inferiore alla baseline e tali crediti possono essere venduti ad altre aziende che invece superano i loro livelli di riferimento. L'effetto è quello di limitare le emissioni globali ad un limite implicito, pari alla somma delle singole baseline delle aziende (Buckley et al., 2004). Inoltre, una ulteriore differenza rispetto ai sistemi *Cap-and-Trade* sta nel fatto che i crediti sono calcolati progetto per progetto e non sulla base delle emissioni complessive dell'impresa.

La seguente *Figura 19* mostra uno schema esemplificativo del meccanismo *Baseline-and-Credit* visto in precedenza.

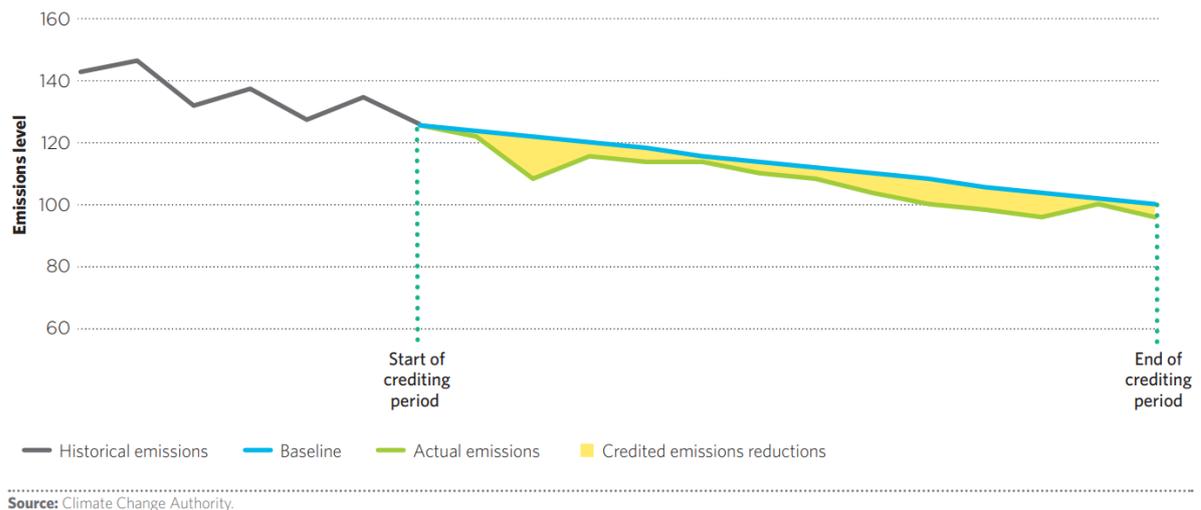


Figura 19

(Fonte: *Coverage, Additionality And Baselines - Lessons From The Carbon Farming Initiative And Other Schemes - CCA Study – Australian Government Climate Change Authority – April 2014*)

Gli schemi BAC, tuttavia, possono generare problemi e fallimenti di mercato, i quali possono essere analizzati e spiegati dalla teoria del Principale-Agente (*Principal-Agent Theory*, PAT) (Jensen and Meckling, 1976). Tale teoria considera le organizzazioni come un insieme di contratti tra individui e si concentra sui problemi che sorgono quando un Principale delega l'autorità decisionale o altri compiti ad un Agente, che agisce per suo conto; queste situazioni sono comuni nella vita quotidiana delle organizzazioni e possono avere conseguenze negative per la massimizzazione del benessere complessivo. Secondo il modello, nel momento in cui sia il Principale che l'Agente perseguono l'obiettivo di massimizzare la propria utilità, quest'ultimo potrebbe intraprendere azioni che non massimizzano il benessere del Principale: tali dinamiche creano i cosiddetti "costi di agenzia" (*agency costs*), che includono i costi necessari a riallineare gli incentivi dei soggetti e i costi legati alla perdita residua subita dal Principale a seguito del disallineamento degli stessi. Il problema principale che la teoria affronta risulta essere l'asimmetria informativa esistente tra i due attori nella relazione contrattuale.

Nel contesto del mercato dei crediti di compensazione del carbonio, tale teoria risulta essere molto significativa e la sua struttura analitica può aiutare a comprendere maggiormente le situazioni esistenti nel mercato. Infatti, nello specifico, il Principale risulta essere l'ente regolatore, mentre l'Agente è rappresentato dallo sviluppatore del progetto di compensazione. In questo assetto, gli sviluppatori potrebbero adottare un comportamento

opportunistico: infatti, “gonfiando” i livelli di emissione di riferimento (baseline), essi possono sovrastimare l’ammontare di riduzioni di emissioni e di conseguenza ottenere un maggior numero di crediti, che comporta un aumento dei loro ricavi. Gli sviluppatori, dunque, possono potenzialmente creare una perdita residua sotto forma di danno reputazionale per il Principale e allo stesso tempo catturare i benefici pecuniari per sé stessi. Questi problemi, inoltre, risultano ulteriormente amplificati dalla natura stessa dello schema di regolamentazione del mercato dei crediti, ovvero il modello “*issuer-pays*” analizzato nel paragrafo 4.6.

Per tutti i motivi sovra esposti, è necessario tener conto degli aspetti della teoria del Principale-Agente per effettuare una analisi approfondita dei sistemi Baseline-and-Credit come quelli in esame di VCS, GS e CDM.

5.3 Literature Review

Lo scopo di questa seconda parte del lavoro, come detto, è quello di analizzare se esistono differenze in termini di rigore nel processo di emissione di crediti tra il CDM e i due registri del VCM, vale a dire VCS e GS. Da una prospettiva di governance, tali registri risultano essere distinti: il CDM è il risultato di un trattato internazionale come il Protocollo di Kyoto, con ambizioni multilaterali e una duplice presenza sia nel mercato regolamentato che in quello volontario; VCS e GS, invece, appartengono a regimi regolatori completamente privati, la cui attenzione è posta sull’elemento di volontarietà dello sviluppo dei progetti. Di conseguenza, tali registri attraggono fonti di domanda anche molto diverse tra loro e per questo motivo le ricerche empiriche dovrebbero differenziare chiaramente tra CDM e i VCM nell’analisi dei risultati.

Il primo studio scientifico che ha cercato di esplorare empiricamente se esistono differenze di rigosità tra CDM e VCM è stato un lavoro di tesi proposto da Thomas Üblackner, uno studente di Transnational Governance presso l’European University Institute (Üblackner, 2023).

I seguenti paragrafi di questo lavoro si propongono come un ampliamento ed aggiornamento delle analisi effettuate da Üblackner: infatti, queste ultime analisi sono effettuate su un dataset contenente i progetti di CDM, VCS e GS aggiornati a maggio 2023. In particolare, si è scelto di proseguire sulla stessa linea dell’autore per quanto riguarda la scelta dei registri da utilizzare per diversi motivi: in primo luogo, il CDM è il meccanismo di offset appartenente al mercato di compliance più importante ed utilizzato al mondo, nonché quello

con più informazioni disponibili pubblicamente; per quanto riguarda VCS e GS, invece, sono i due registri privati che dominano il VCM e spesso applicano metodologie conformi a quelle del CDM. Di conseguenza, la scelta di proseguire con questi registri è risultata la più prudente in termini di confronto tra i diversi standard e la più giudiziosa per ottenere un ampliamento coerente del lavoro di Üblackner.

5.4 Modello di regressione

In armonia con il lavoro di Üblackner, si è scelto di effettuare una regressione multipla ai minimi quadrati ordinari (*Ordinary Least Squares*, OLS) utilizzando un dataset contenente le informazioni dei progetti relativi ai tre registri sopra nominati.

L'analisi di regressione con il metodo dei minimi quadrati rappresenta una forma di regressione lineare multipla utilizzata per modellare le relazioni tra una variabile dipendente ed una o più variabili indipendenti. In particolare, lo stimatore OLS è uno strumento statistico che minimizza la differenza quadratica media tra i valori attuali della variabile dipendente e il valore predetto in base alla retta stimata (Stock and Watson, 2012).

Un modello di regressione OLS utilizza la seguente equazione:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + \varepsilon_i \quad i = 1, \dots, n$$

dove:

- Y_i = valore osservato della variabile dipendente sul punto i
- X_{ki} = valore della variabile indipendente k sul punto i
- β_0 = intercetta della popolazione ignota (valore costante)
- β_k = coefficiente di regressione o pendenza per la variabile esplicativa k sul punto i . Tale coefficiente può essere visto come l'effetto su Y di una variazione in X_k , tenendo le altre variabili indipendenti costanti.
- ε_i = errore dell'equazione di regressione (fattori omessi).

Inoltre, per assicurare la validità del modello di regressione multipla, devono valere le seguenti assunzioni:

- La distribuzione di ε condizionata alle X ha media nulla:

$$E(\varepsilon_i | X_{1i} = x_1, \dots, x_{ki} = x_k) = 0$$

Tale condizione implica che lo stimatore $\widehat{\beta}_k$ è non distorto (*unbiased*).

- $(X_{1i}, \dots, X_{ki}, Y_i), i = 1, \dots, n$ sono indipendenti ed identicamente distribuite (i.i.d.)

- Gli outlier sono rari: X_1, \dots, X_k e Y hanno momenti quarti finiti:

$$E(X_{1i}^4) < \infty, \dots, E(X_{ki}^4) < \infty, E(Y_i^4) < \infty$$

- Non vi è collinearità perfetta: la collinearità perfetta si ha quando uno dei regressori è funzione lineare esatta degli altri.

A questo punto, dopo aver selezionato i tre registri di riferimento, è stato necessario identificare la variabile dipendente più significativa per analizzare se i VCM sono effettivamente più rigorosi del CDM nel processo di emissione dei crediti. Uno degli indicatori chiave presente in tutti e tre i registri risulta essere adatto a questa necessità: si è deciso di selezionare come variabile dipendente la “riduzione annuale stimata delle emissioni in $mtCO_2e$ dei progetti”. Infatti, tale variabile risulta essere significativa poiché esiste un collegamento diretto tra la riduzione annuale stimata delle emissioni e l’inflazione dei crediti, come spiegato nel paragrafo precedente.

Le riduzioni annuali stimate costituiscono un risultato intermedio nel ciclo del progetto, determinato dal progettista nel documento di design del progetto (Project Design Document, PDD) anteriore alla registrazione. Il loro valore economico, tuttavia, dipende dai prezzi che i singoli crediti raggiungono a seguito della verifica del progetto: se i prezzi sono considerati come variabili, potrebbe esserci un legame causale tra l’entità delle riduzioni di emissioni assegnate ad un progetto ed il prezzo del singolo credito. Infatti, può accadere che un progetto con una minore quantità di crediti ma percepito dal mercato come di alta qualità può generare un reddito maggiore per i progettisti rispetto ad un progetto con una maggiore quantità di crediti venduti ad un prezzo più basso. Per questi motivi, seguendo la teoria del Principale-Agente enunciata in precedenza, è più probabile che i disallineamenti di incentivi tra regolatore e sviluppatore del progetto siano più rilevanti per questo indicatore intermedio rispetto a quello finale. Di conseguenza, data la sua disponibilità per tutti i registri e la sua forza esplicativa, si è deciso di utilizzare tale variabile per analizzare la rigorosità di VCM e CDM.

Formalmente, il modello di regressione utilizzato è il seguente:

$$EMI_RED_i = \beta_0 + \beta_1 ACT_TYPE_i + \beta_2 ACT_SIZE_i + \beta_3 ACT_REGION_i \\ + \beta_4 REG_YEAR_i + \beta_5 ISS_DUMMY_i + \beta_6 VCM_DUMMY_i + \varepsilon$$

dove:

- EMI_RED_i = riduzioni annuali stimate delle emissioni del progetto i espresse in tonnellate metriche di CO_2 equivalente, variabile dipendente numerica discreta;
- ACT_TYPE_i = tipologia di attività del progetto i secondo la classificazione del Programma Ambientale delle Nazioni Unite, variabile categorica;
- ACT_SIZE_i = dimensione dell'attività del progetto i secondo la terminologia del CDM, variabile dummy;
- ACT_REGION_i = regione del Paese ospitante il progetto i classificata secondo l'ultimo sistema della World Bank, variabile categorica;
- REG_YEAR_i = anno di registrazione del progetto i come effetti fissi, variabile categorica;
- ISS_DUMMY_i = variabile dummy uguale ad 1 se il progetto i aveva una data di emissione del primo credito accessibile al momento del recupero dell'informazione dal dataset;
- VCM_DUMMY_i = variabile dummy uguale ad 1 se il progetto i è stato registrato con uno schema appartenente al VCM (quindi o VCS o GS);
- β_0 = intercetta che cattura gli effetti per le osservazioni in cui tutte le variabili esplicative sono a zero
- β_1, \dots, β_6 = coefficienti variabili come da modello;
- ε = termine di errore

Per garantire la validità del modello, è necessario intraprendere alcune misure correttive, specialmente nell'ottica di rispettare le assunzioni sopra enunciate. Per esempio, il campione di progetti presente nel dataset dovrebbe essere limitato alle osservazioni registrate dopo l'anno 2009, ovvero dal momento in cui tutti i registri risultano attivi contemporaneamente. Tuttavia, nonostante le precauzioni adottate, è noto già in partenza che tale analisi non possa fornire una interpretazione causale robusta, poiché i progetti non sono assegnati in modo casuale ai registri. Di conseguenza, si può creare un problema per quanto riguarda l'indipendenza delle variabili e la causalità inversa. Per questi motivi, i coefficienti ottenuti dovranno essere interpretati con molta cautela e potranno fornire soltanto una misura di associazione, ovvero che esiste una relazione tra le variabili in esame, ma non è possibile dimostrare un rapporto di causa-effetto diretto tra le stesse.

5.5 Preparazione del dataset

Il punto di partenza è stato, come detto in precedenza, il lavoro svolto da Üblackner: il suo dataset¹⁴ conteneva 11.788 progetti, appartenenti ai tre registri designati.

La prima operazione necessaria per raffinare i dati di partenza è stata quella di eliminare dal dataset tutti i progetti con anno di registrazione antecedente al 2009, per il motivo spiegato nel paragrafo precedente; di conseguenza, si giunge ad una prima rielaborazione contenente 10.431 progetti.

Dal momento che le informazioni necessarie per aggiornare ed ampliare il dataset non sono disponibili presso un'unica risorsa, si è deciso di organizzare il lavoro di revisione selezionando un registro alla volta, data anche l'eterogeneità delle informazioni disponibili di ogni meccanismo di offset. Di seguito saranno analizzate le operazioni svolte per ciascuno di essi.

5.5.1 Aggiornamento del Clean Development Mechanism

La prima operazione effettuata è stata quella di scaricare l'intero dataset di progetti del CDM direttamente dal sito del registro¹⁵, da cui si ottiene un insieme di 13.174 progetti.

Tuttavia, per effettuare le analisi successive, è necessario che i progetti siano stati registrati; di conseguenza, si è deciso di selezionare soltanto i progetti con stato "Registered with issuance" e con "End of Crediting Period". Per aggiornare correttamente i progetti già presenti nel dataset di partenza, è stato necessario filtrare i progetti con "First issuance" (ovvero la data di emissione dei primi crediti) appartenente al 2023 e al 2024. Il motivo di questa query è legato al fatto che i dati del CDM presenti nel database di partenza sono aggiornati al mese di marzo 2023; pertanto, i progetti con data di emissione successiva ad essa sono stati aggiornati manualmente.

Per quanto riguarda il 2024, invece, non è stato possibile aggiungere ulteriori progetti dal momento che le informazioni disponibili sul sito del CDM sono aggiornate al 2 gennaio 2024 e molti progetti non hanno ancora ottenuto la registrazione effettiva.

¹⁴ Il dataset di Üblackner è disponibile al seguente indirizzo:
<https://drive.google.com/drive/folders/1FHX5mYEa5ckMX3AYQXgG39eCXfG2M-L5?usp=sharing>

¹⁵ <https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>

Questo processo ha permesso di assicurarsi che il dataset utilizzato per le analisi di regressione fosse il più aggiornato possibile, nonostante le limitazioni legate alla mancanza di informazioni ulteriori relativamente al 2024.

5.5.2 Aggiornamento ed ampliamento del Verified Carbon Standard (VERRA)

Per quanto riguarda il VCS, il primo passo è stato quello di recuperare l'intero insieme di progetti disponibili sul sito del registro¹⁶: è importante sottolineare che tale registro non fornisce tutte le informazioni in un unico dataset (come accade invece per il CDM); pertanto, è risultato necessario scaricare le informazioni in momenti diversi, unendo tutto in un unico dataset utilizzando come chiave di join il numero identificativo univoco di ogni progetto.

Successivamente, per aggiornare correttamente i dati presenti nel dataset di partenza, è stato necessario selezionare dai dati recuperati dal sito tutti quei progetti che avevano una data di registrazione antecedente all'ultimo aggiornamento del lavoro di Üblackner (28 aprile 2023 per il VCS) ma con data di emissione dei crediti successiva (quindi dal periodo che intercorre tra il 29 aprile 2023 e il 19 luglio 2024). Tale ricerca ha condotto a 431 risultati, che sono stati conseguentemente aggiornati in merito alle date di "First issuance": anche la variabile dummy ISS_DUMMY è stata aggiornata al valore 1, in quanto a seguito dell'aggiornamento è diventata disponibile una data di prima emissione dei crediti.

Inoltre, per il VCS sono risultati disponibili ulteriori informazioni per i progetti del 2024, a differenza del CDM. In particolare, al dataset iniziale sono stati aggiunti 294 progetti (a partire dalla riga 10.432 in poi), di cui 205 sono progetti con data di registrazione nel periodo sopracitato ma senza una data di emissione disponibile, mentre i restanti 89 risultano essere progetti registrati e con data di emissione appartenente allo stesso periodo.

Tali operazioni hanno permesso di consolidare il dataset di partenza e di completarlo, includendo tutti i progetti del VCS più recenti con le relative informazioni necessarie per effettuare i confronti con quelli del CDM e di GS. In particolare, le informazioni relative alla dimensione del progetto (necessarie a seguito della presenza della variabile ACT_SIZE) non sono direttamente disponibili per il registro di VERRA; ciononostante, è stato possibile recuperare tale valore a seguito di considerazioni sulla metodologia dei progetti. Infatti, le metodologie dei progetti del VCS sono essenziali per quantificare i benefici reali di un progetto in termini di riduzione delle emissioni e forniscono i requisiti per determinare i

¹⁶ <https://registry.verra.org/app/search/VCS/All%20Projects>

confini del progetto, identificare la baseline di partenza e quantificare i risultati dei progetti. Sebbene queste metodologie siano progettate per essere applicabili ad una vasta gamma di progetti, gran parte di tali metodologie possono risultare più adatte a progetti di dimensioni specifiche a causa della natura dei requisiti del progetto di compensazione, nonché delle procedure coinvolte nel suo sviluppo. Ciò accade per una duplice ragione: da un lato per facilitare l'implementazione dei progetti, dall'altro per garantire un monitoraggio ed una verifica accurati delle emissioni di GHG.

Per questi motivi è risultato possibile recuperare a ritroso l'informazione relativa alla dimensione del progetto a partire dalla metodologia utilizzata (informazione invece presente nel database di VERRA).

5.5.3 Aggiornamento ed ampliamento del Gold Standard

Infine, l'ultimo aggiornamento del dataset iniziale riguarda i progetti del registro Gold Standard. Anche in questo caso la prima azione necessaria è stata quella di scaricare i dati relativi a tutti i progetti registrati da Gold Standard dal 2009 al 2024¹⁷.

Similmente a quanto accaduto per il VCS, anche per GS è risultato necessario recuperare le informazioni in passi successivi a causa della loro frammentarietà, con una successiva unificazione degli stessi sulla base dell'identificativo del progetto.

La procedura seguita è stata la stessa utilizzata per il VCS: di 417 progetti con data di emissione appartenente al periodo in esame, 219 sono risultati già presenti nel dataset di partenza e sono stati aggiornati per quanto riguarda la data di "First issuance" (e la relativa variabile dummy), mentre i 198 rimasti sono stati aggiunti all'elenco dei progetti a partire dalla riga 10.726 in poi.

Quest'ultimo processo di raccolta, aggiornamento ed ampliamento dei dati dei progetti ha permesso di ottenere un dataset completo e revisionato, il quale rappresenterà il punto di partenza per le analisi di regressione che saranno sviluppate nei paragrafi successivi.

¹⁷ <https://registry.goldstandard.org/projects?q=&page=1> , <https://registry.goldstandard.org/credit-blocks?q=&page=1>

5.6 Statistiche descrittive

La seguente sezione ha lo scopo di effettuare una analisi descrittiva delle caratteristiche delle variabili chiave del dataset, per verificare contestualmente che i campioni siano rappresentativi per ogni variabile. Per effettuare tali analisi sono stati utilizzati due software: Stata e Microsoft Excel.

Il dataset finale, ottenuto attraverso i passaggi elencati nei precedenti paragrafi, è composto da 10.922 progetti: 6.515 registrati presso il CDM (59,65%), 2.295 presso il VCS (21,01%) e 2.112 presso il GS (19,34%). Il campione, pertanto, risulta essere distribuito in modo non omogeneo, con più della metà delle osservazioni nel CDM. La seguente *Tabella 1* mostra le percentuali, per ogni registro, di progetti che hanno già emesso crediti (ovvero è disponibile una data di “First issuance”, con la relativa variabile dummy “ISS_DUMMY” uguale ad 1): come si può notare, soltanto il 39% dei progetti CDM ha già emesso crediti, mentre tale valore risulta essere decisamente superiore per il VCS (in tabella “VERRA”, con il 78% circa) e per il GS (79% circa).

Key
frequency
column percentage

ISS_DUMMY	Registry			Total
	CDM	GOLDSTD	VERRA	
0	4,006	448	511	4,965
	61.49	21.21	22.27	45.46
1	2,509	1,664	1,784	5,957
	38.51	78.79	77.73	54.54
Total	6,515	2,112	2,295	10,922
	100.00	100.00	100.00	100.00

Tabella 1

Le caratteristiche dei progetti, specialmente per quanto riguarda la categoria, rivelano significative differenze tra i tre registri. La seguente *Figura 20* mostra quanto è rilevante ogni categoria di progetto in relazione al campione totale del dataset: in particolare, si può notare come la categoria “Wind” (energia eolica) risulta essere dominante, con circa il 28% delle osservazioni totali.

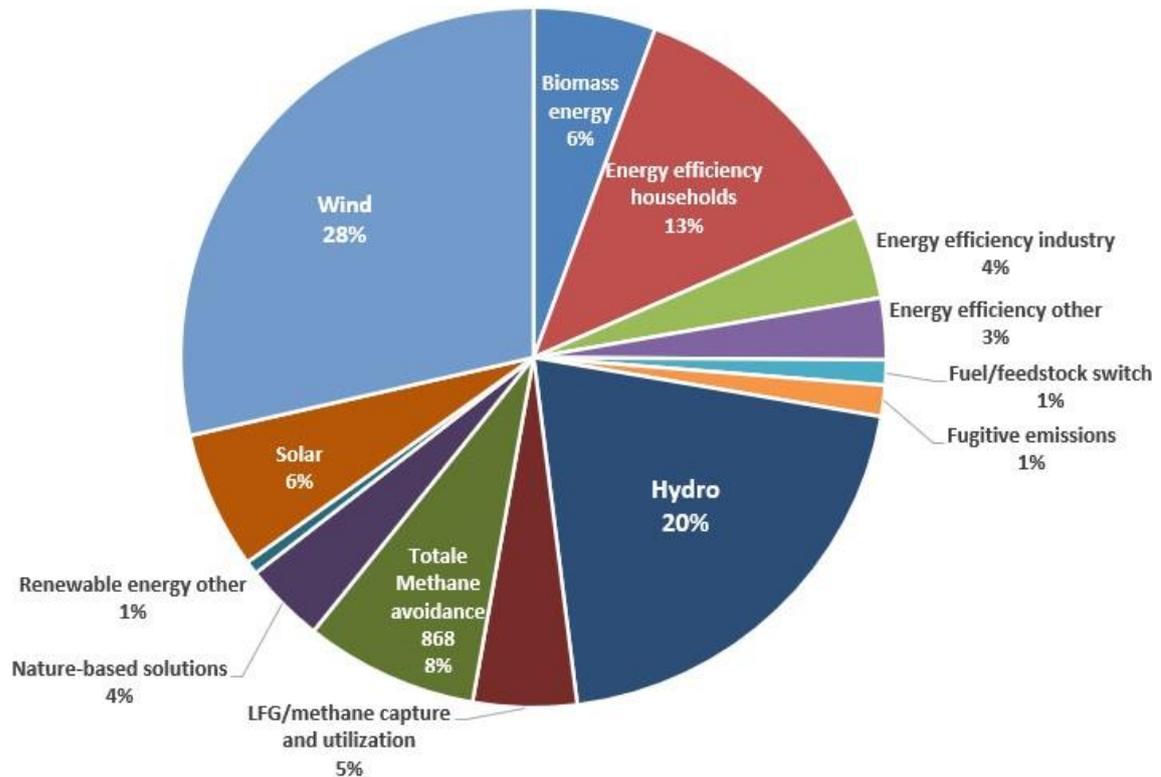


Figura 20

La successiva *Tabella 2*, invece, mostra il peso di ciascuna categoria per il registro di riferimento. Da questa si può notare come la sola categoria “Wind” costituisca più di un terzo delle osservazioni del CDM (35,12%), mentre per VERRA le tipologie risultano essere meglio distribuite, con “Wind” ancora dominante (24,62%), seguita dalla categoria “Hydro” (13,59%) e dalle soluzioni “Nature-based” (13,46%). In particolare, la categoria “Hydro” assume una certa importanza anche per il registro CDM, con un 27,67%: ciò trova riscontro anche nel fatto che tale categoria è la seconda più ricorrente a livello complessivo, rappresentata dal 20% del totale dei progetti.

Per quanto riguarda il registro Gold Standard, si nota una netta prevalenza della categoria “Energy efficiency households” (55,78%): si tratta di progetti (solitamente su piccola scala) di economia domestica, basati su abitazioni progettate per utilizzare e sprecare meno energia possibile. La seconda categoria più rilevante per il GS risulta essere “Methane avoidance” (12,41%): infatti, tale registro certifica numerosi progetti di elaborazione dei rifiuti in loco, che quindi evitano le emissioni di metano causate dai rifiuti organici inviati alle discariche.

Key
frequency
column percentage

ACT_TYPE	Registry			Total
	CDM	GOLDSTD	VERRA	
Biomass energy	410 6.29	45 2.13	157 6.84	612 5.60
Energy efficiency households	88 1.35	1,178 55.78	131 5.71	1,397 12.79
Energy efficiency industry	269 4.13	10 0.47	144 6.27	423 3.87
Energy efficiency other	128 1.96	28 1.33	154 6.71	310 2.84
Fuel/feedstock switch	80 1.23	0 0.00	47 2.05	127 1.16
Fugitive emissions	133 2.04	0 0.00	24 1.05	157 1.44
Hydro	1,803 27.67	104 4.92	312 13.59	2,219 20.32
LFG/methane capture and utilization	341 5.23	16 0.76	162 7.06	519 4.75
Methane avoidance	450 6.91	262 12.41	156 6.80	868 7.95
Nature-based solution	63 0.97	34 1.61	309 13.46	406 3.72
Renewable energy other	37 0.57	15 0.71	16 0.70	68 0.62
Solar	425 6.52	151 7.15	118 5.14	694 6.35
Wind	2,288 35.12	269 12.74	565 24.62	3,122 28.58
Total	6,515 100.00	2,112 100.00	2,295 100.00	10,922 100.00

Tabella 2

Analizzando la scala dei progetti è possibile effettuare altre osservazioni. La seguente *Tabella 3* mostra la suddivisione dei progetti di ciascun registro per dimensione, variabile che può assumere soltanto i valori “LARGE” e “SMALL”, in armonia con la terminologia del CDM. Da questa tabella si evince che il CDM è utilizzato per il 70,50% dei progetti di grandi dimensioni, seguito da VERRA con il 20,93%, mentre il GS ha una quota soltanto pari all’8,58%. Quest’ultima osservazione è in accordo con quanto visto in precedenza sulla tipologia prevalente di progetti del GS, i quali risultano essere appunto di piccola dimensione: infatti, dalla tabella si può altresì notare che il 77,18% dei progetti GS è su scala ridotta. Il registro VCS, invece, risulta essere il più equilibrato dei tre, con una distribuzione equilibrata delle scale (51,24% “LARGE” e 48,76% “SMALL”).

ACT_TYPE	Registry			Total
	CDM	GOLDSTD	VERRA	
LARGE	3,962	482	1,176	5,620
	70.50	8.58	20.93	100.00
	60.81	22.82	51.24	51.46
SMALL	2,553	1,630	1,119	5,302
	48.15	30.74	21.11	100.00
	39.19	77.18	48.76	48.54
Total	6,515	2,112	2,295	10,922
	59.65	19.34	21.01	100.00
	100.00	100.00	100.00	100.00

Key
frequency
row percentage
column percentage

Tabella 3

In termini di distribuzione geografica, invece, si può notare dalla seguente *Figura 21* come quasi la metà dei progetti (48,26%) sia sviluppata nella porzione di regione asiatica orientale adiacente all'Oceano Pacifico, seguita dal Sud asiatico (23,68%).

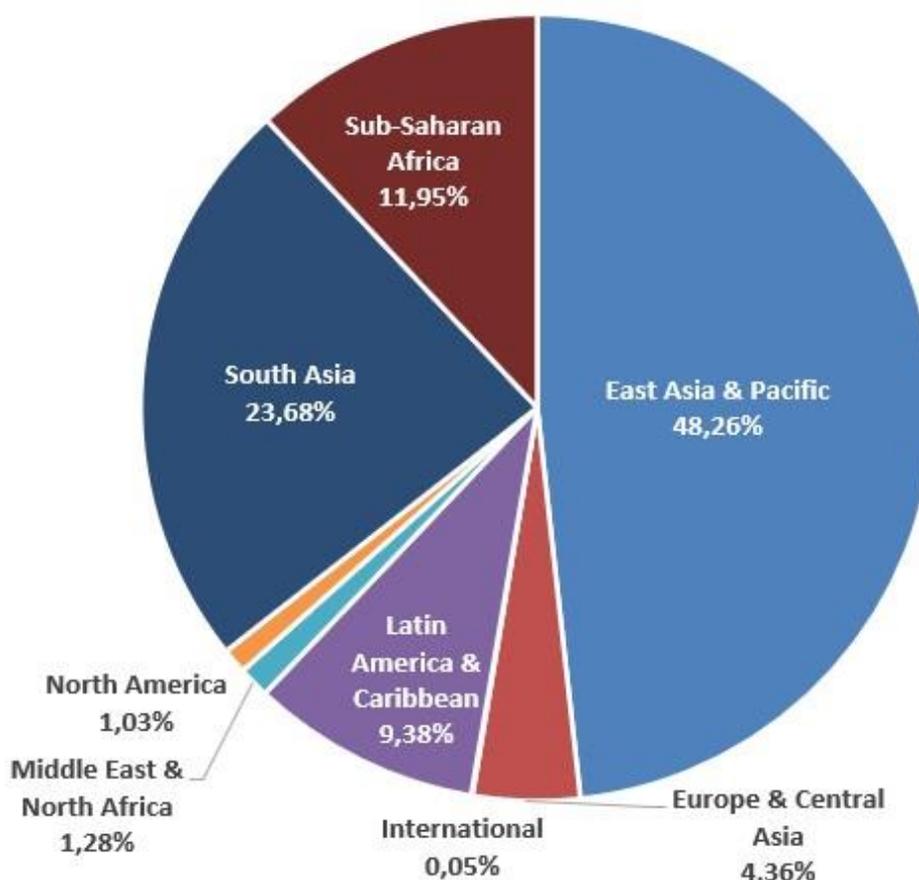


Figura 21

La seguente *Tabella 4* fornisce una ulteriore suddivisione delle aree geografiche per registro utilizzato, mostrando nette differenze tra il CDM e i due registri del VCM. Infatti, circa due terzi del totale dei progetti CDM registrati si trovano in Asia orientale e Pacifico, seguiti dall'Asia meridionale (21,03%) e dall'America Latina e Caraibi (9,50%). Si può altresì osservare che nessun progetto del CDM è stato realizzato in Nord America, in accordo con il fatto che gli Stati Uniti ed il Canada appartengono all'Annex I del Protocollo di Kyoto, ovvero paesi industrializzati che non possono ospitare progetti di compensazione.

VERRA presenta una distribuzione simile al CDM, con una netta prevalenza della regione asiatica. Il registro Gold Standard, invece, si distingue dai precedenti in quanto poco meno della metà dei suoi progetti si trova nell'Africa subsahariana (43,84%): di conseguenza, una quota significativa dei progetti del GS è ospitata da Paesi a basso reddito (i cosiddetti “low income countries”), in zone caratterizzate da economie in via di sviluppo. Da sottolineare, inoltre, la presenza di 6 osservazioni di progetti catalogati come “International” per GS: si tratta di progetti di efficienza nei trasporti marittimi, non riconducibili ad un'unica regione del pianeta.

ACT_REGION	Registry			Total
	CDM	GOLDSTD	VERRA	
East Asia & Pacific	4,191	359	721	5,271
	79.51	6.81	13.68	100.00
	64.33	17.00	31.42	48.26
Europe & Central Asia	61	195	220	476
	12.82	40.97	46.22	100.00
	0.94	9.23	9.59	4.36
International	0	6	0	6
	0.00	100.00	0.00	100.00
	0.00	0.28	0.00	0.05
Latin America& Caribbean	619	98	308	1,025
	60.39	9.56	30.05	100.00
	9.50	4.64	13.42	9.38
Middle East & North Africa	116	6	18	140
	82.86	4.29	12.86	100.00
	1.78	0.28	0.78	1.28
North America	0	3	110	113
	0.00	2.65	97.35	100.00
	0.00	0.14	4.79	1.03
South Asia	1,370	519	697	2,586
	52.98	20.07	26.95	100.00
	21.03	24.57	30.37	23.68
Sub-Saharan Africa	158	926	221	1,305
	12.11	70.96	16.93	100.00
	2.43	43.84	9.63	11.95
Total	6,515	2,112	2,295	10,922
	59.65	19.34	21.01	100.00
	100.00	100.00	100.00	100.00

Key
frequency
row percentage
column percentage

Tabella 4

Infine, si può confrontare la dimensione temporale della registrazione dei progetti per ogni meccanismo di offset: la seguente *Tabella 5* mostra la suddivisione per ogni registro in tre periodi temporali, ovvero 2009-2013, 2014-2018 e 2019-2024. Si ribadisce, per chiarezza, che il dataset è stato “pulito” dalle osservazioni dei progetti con data di registrazione antecedente al 2009, in quanto tale anno risulta essere il primo con tutti e tre i registri in funzione.

REG_YEAR	Registry			Total
	CDM	GOLDSTD	VERRA	
2009-2013	6,118	373	343	6,834
	89.52	5.46	5.02	100.00
	93.91	17.66	14.95	62.57
2014-2018	346	664	174	1,184
	29.22	56.08	14.70	100.00
	5.31	31.44	7.58	10.84
2019-2024	51	1,075	1,778	2,904
	1.76	37.02	61.23	100.00
	0.78	50.90	77.47	26.59
Total	6,515	2,112	2,295	10,922
	59.65	19.34	21.01	100.00
	100.00	100.00	100.00	100.00

Key
frequency
row percentage
column percentage

Tabella 5

Da questa tabella si evince una tendenza ben definita del CDM: la quasi totalità di progetti ad esso appartenenti sono stati registrati tra il 2009 ed il 2013 (93,91%), con una traiettoria discendente nei due successivi periodi (5,31% e 0,78% rispettivamente). Al contrario, i due VCM seguono una traiettoria inversa, grazie al recente aumento dell’interesse degli attori economici nei confronti del mercato volontario dei crediti di carbonio. Infatti, entrambi i registri volontari hanno registrato più della metà dei loro progetti totali nell’ultimo periodo (50,90% per Gold Standard e 77,47% per VERRA).

Tale tendenza ottiene un ulteriore riscontro guardando al peso di ogni registro nei diversi periodi (cioè la seconda riga di ogni periodo). Il CDM risultava dominante nel primo periodo, con una quota dell’89,52% del totale dei progetti registrati, fino al crollo dell’ultimo periodo con soltanto l’1,76%. Viceversa, VERRA passa dal 5,02% del primo periodo fino a rappresentare oltre la metà dei progetti registrati tra 2019 e 2024 (61,23%).

Le statistiche descrittive riportate evidenziano le caratteristiche chiave dei tre registri in esame, considerando anche le differenze significative che intercorrono tra essi in termini di categoria, scala, distribuzione geografica e temporale. Tali risultati forniscono una base per le analisi di regressione sviluppate nei successivi paragrafi, permettendo di esaminare le dinamiche di ciascun meccanismo di offset nel contesto del mercato dei crediti di carbonio.

5.7 Analisi di regressione: risultati

In questo paragrafo sarà sviluppata la discussione relativa ai risultati della regressione OLS effettuata tramite il software Stata sul dataset precedentemente ottenuto. Si precisa che il termine “_cons” presente al fondo dell’output rappresenta l’intercetta β_0 del modello di regressione, quando tutte le variabili indipendenti sono zero. In questo caso, essa cattura il valore atteso per la combinazione di categorie baseline: il caso base di riferimento considerato risulta essere quello di un progetto di “Biomass energy” di dimensione “LARGE” sviluppato nella regione “North America” nel periodo “2009-2013”. Pertanto, ogni coefficiente nella regressione rappresenta la variazione rispetto a questo caso baseline.

Una ulteriore precauzione adottata riguarda il valore “International” della variabile ACT_REGION: come analizzato nel paragrafo precedente, tale valore risulta essere associato soltanto a 6 osservazioni appartenenti al registro GS. Di conseguenza, il coefficiente associato ad “International” potrebbe risultare molto instabile (molto grande o molto piccolo) e potrebbe non riflettere un vero effetto ma piuttosto la variabilità casuale. Dal momento che è molto difficile ottenere risultati significativi ed affidabili con un numero molto limitato di osservazioni per una data categoria, esistono due possibili alternative per affrontare il problema: una prima via potrebbe essere quella di accorpate logicamente la categoria “International” con un’altra regione con caratteristiche simili, in modo tale da ottenere un numero complessivo di osservazioni maggiore. Tuttavia, seppur percorribile in linea teorica, tale opzione non risulta essere significativa poiché il valore “International” era stato creato proprio alla luce del fatto che i progetti ad esso associati non potevano essere ricondotti ad un’unica regione del mondo. A questo punto, si è deciso di optare per la seconda alternativa, ovvero rimuovere la categoria “International” dalla variabile ACT_REGION utilizzando il comando “drop” di Stata, poiché si è ritenuto che le 6 osservazioni non fossero sufficienti per produrre stime affidabili. Di conseguenza, il campione di osservazioni finale del dataset risulta essere di 10.916 progetti.

La seguente *Tabella 6* rappresenta l’output della regressione OLS ottenuta con il software Stata utilizzando il seguente comando:

```
regress EMI_RED i.ACT_TYPE_encoded i.ACT_SIZE_encoded  
ib6.ACT_REGION_encoded i.REG_YEAR_encoded ISS_DUMMY VCM_dummy
```

Le variabili stringa sono state trasformate in variabili numeriche categoriali attraverso il comando “encode” e successivamente spaccettate attraverso il prefisso “i”, che in Stata crea

automaticamente variabili dummy per variabili categoriali. In particolare, per la variabile ACT_REGION si è deciso di specificare la categoria baseline utilizzando il prefisso “ib6”, dove il numero 6 indica il valore specifico della variabile da usare come baseline (ovvero “North America”).

Source	SS	df	MS			
Model	1.6742×10^{14}	23	7.2793×10^{12}			
Residual	1.2126×10^{15}	10.892	1.1133×10^{11}			
Total	1.3801×10^{15}	10.915	1.2644×10^{11}			

Number of obs	10,916
F(23, 10892)	65.38
Prob > F	0.0000
R-squared	0.1213
Adj R-squared	0.1195
Root MSE	3.3×10^5

Variable	Coefficient	Std. Err.	t	P> t	95% Conf. Interval Lower	95% Conf. Interval Upper
ACT.TYPE_encoded						
Energy efficiency households	8651.62	18 758.92	0.46	0.645	-28 119.27	45 422.52
Energy efficiency industry	6923.78	21 238.46	0.33	0.744	-34 707.46	48 555.03
Energy efficiency other	388 929.30	23 657.95	16.44	0.000	342 555.40	435 303.20
Fuel/feedstock switch	343 946.50	32 795.85	10.49	0.000	279 660.60	408 232.30
Fugitive emissions	331 004.90	30 452.68	10.87	0.000	271 312.10	390 697.70
Hydro	58 980.60	15 552.39	3.79	0.000	28 495.09	89 466.11
LFG/methane capture and utilization	39 332.17	20 407.67	1.93	0.054	-670.57	79 334.91
Methane avoidance	28 415.32	18 023.37	1.58	0.115	-6913.76	63 744.40
Nature-based solutions	184 148.50	22 326.98	8.25	0.000	140 383.60	227 913.50
Renewable energy other	130 149.10	42 800.39	3.04	0.002	46 252.51	214 045.60
Solar	-15 225.16	18 656.40	-0.82	0.414	-51 795.10	21 344.79
Wind	-38 335.50	15 108.20	-2.54	0.011	-67 950.32	-8 720.67
ACT.SIZE_encoded						
SMALL	-173 497.70	7932.98	-21.87	0.000	-189 047.80	-157 947.60
ACT.REGION_encoded						
East Asia & Pacific	120 743.40	32 797.04	3.68	0.000	56 455.28	185 031.60
Europe & Central Asia	46 213.57	35 437.15	1.30	0.192	-23 249.69	115 676.80
Latin America & Caribbean	103 270.40	33 727.03	3.06	0.002	37 159.25	169 381.50
Middle East & North Africa	61 709.91	42 969.32	1.44	0.151	-22 517.76	145 937.60
South Asia	156 234.90	32 908.54	4.75	0.000	91 728.19	220 741.60
Sub-Saharan Africa	140 977.50	34 247.30	4.12	0.000	73 846.61	208 108.50
REG.YEAR_encoded						
2014-2018	-10 933.38	12 779.97	-0.86	0.392	-35 984.44	14 117.68
2019-2024	59 639.16	12 508.33	4.77	0.000	35 120.56	84 157.76
ISS.DUMMY						
ISS_Dummy	24 351.24	7084.63	3.44	0.001	10 464.08	38 238.39
VCM_dummy	8995.16	12 061.79	0.75	0.456	-14 648.15	32 638.46
_cons	23 607.64	35 859.43	0.66	0.510	-46 683.37	93 898.65

Note: R-squared = 0.1213, Adj R-squared = 0.1195, Root MSE = 3.3×10^5 , Prob > F = 0.0000.

Tabella 6

Nel seguito sarà fornita una interpretazione dei principali risultati di tale regressione, suddivisi per variabile di riferimento.

In particolare, la trattazione si soffermerà sul valore di significatività dei coefficienti, il cosiddetto p-value: un p-value inferiore a 0,05 (assumendo un livello di significatività del 5%) indica che l'effetto è statisticamente significativo.

5.7.1 Considerazioni sull'indice di bontà di adattamento R-squared

Prima di valutare gli effetti di ciascuna variabile, è opportuno fare alcune considerazioni sull'effettiva capacità predittiva del modello. Per far ciò, si osserva il valore della misura di bontà di adattamento, denominata R-squared nell'output (R-quadro): tale indice, anche detto coefficiente di determinazione o di adattamento ai dati (*goodness of fit*), misura la forza della relazione lineare tra le variabili indipendenti inserite nel modello di regressione e la variabile dipendente. Esso indica, pertanto, la proporzione di varianza totale dei valori di y intorno alla media di y che risulta spiegata dalle variabili indipendenti del modello di regressione.

Nell'output ottenuto, il coefficiente R-squared è statisticamente significativo (poiché il p-value della statistica F è minore di 0,05), ma il suo valore risulta essere piuttosto basso: infatti, un R-squared del 12,13% indica che la regressione effettuata spiega soltanto il 12,13% della variabilità totale dei dati. Questo fatto suggerisce che il modello potrebbe non catturare pienamente la relazione tra le variabili indipendenti e la variabile dipendente: ciò può essere dovuto ad eventuali fattori mancanti, ovvero l'assenza di variabili rilevanti, ad una complessità maggiore nei dati che non è catturata attualmente dalla specificazione del modello, alla natura intrinsecamente rumorosa dei dati, nonché ad eventuali problemi di collinearità non rilevati.

Tuttavia, in contesti economici o sociali altamente complessi come quello preso in esame, in cui vi sono interazioni di numerosi stakeholders e potenzialmente un numero elevato di variabili che influenzano la riduzione delle emissioni del progetto, non è raro ottenere un R-squared inferiore al 50%. Tale valore, quindi, non implica che il modello di regressione precedentemente costruito sia sbagliato, bensì che la variabile dipendente sotto analisi dipende da numerosi fattori, molti dei quali non sono stati misurati.

Il limite di avere un R-squared basso si riflette specialmente sulla capacità predittiva del modello: non sarà dunque possibile predire con molta precisione quale sarà l'impatto delle variabili indipendenti, né fornire una interpretazione causale rigorosa. Malgrado ciò, si possono utilizzare i risultati ottenuti per evidenziare alcune associazioni emerse.

5.7.2 Analisi dei coefficienti di ACT_TYPE_encoded

Per quanto riguarda la categoria "Energy efficiency households", il coefficiente di 8.651,624 non è statisticamente significativo, poiché il p-value risulta essere maggiore di 0,05; di conseguenza, non è possibile trarre conclusioni robuste relativamente all'effetto di questa

variabile rispetto al caso di riferimento. Analogamente, lo stesso accade per le categorie “Energy efficiency industry” ($p=0,744 > 0,05$) e “Methane avoidance” ($p=0,115 > 0,05$).

Le categorie “Energy efficiency other”, “Fuel/feedstock switch”, “Fugitive emissions”, “Nature-based solutions” e “Renewable energy other” hanno un effetto molto positivo (coefficienti positivi alti) e altamente significativo ($p < 0,005$). Ciò può indicare che questi progetti portano ad una riduzione delle emissioni significativamente maggiore rispetto al caso baseline. La categoria “Hydro” mostra lo stesso effetto positivo significativo, sebbene esso sia minore rispetto ai precedenti dato che il coefficiente è di un ordine di grandezza inferiore.

La categoria “LFG/methane capture and utilization”, invece, risulta marginalmente significativa ($p = 0,054$): il coefficiente è positivo, indicando un possibile effetto in tal senso, ma l’incertezza risulta essere decisamente superiore ai casi precedenti.

Infine, le categorie “Solar” e “Wind” presentano coefficienti negativi ($-15.225,16$ e $-38.335,50$ rispettivamente) ma con significatività diversa: infatti, “Wind” risulta essere significativa ($p = 0,011$), suggerendo che potrebbe ridurre in misura minore le emissioni rispetto alla baseline, mentre “Solar” non è significativa ($p = 0,414$).

5.7.3 Analisi dei coefficienti di ACT_SIZE_encoded

In questo caso l’analisi è limitata al solo valore “SMALL”, dato che la variabile in esame può assumerne soltanto due, uno dei quali appartiene al caso baseline. Il coefficiente di “SMALL” è negativo ($-173.497,7$) ed altamente significativo ($p < 0,001$): ciò suggerisce il fatto che i progetti sviluppati su piccola scala comportano una riduzione delle emissioni significativamente minore rispetto ai progetti di grande dimensione del caso baseline. Tale risultato è in accordo con le attese relative all’efficacia climatica dei progetti su scala ridotta.

5.7.4 Analisi dei coefficienti di ACT_REGION_encoded

Analizzando i risultati ottenuti in termini di distribuzione geografica, si può notare come tutte le categorie mostrino un miglioramento delle riduzioni rispetto al caso baseline: infatti, tutti i coefficienti sono positivi e ciò è probabilmente legato al fatto che la regione scelta come baseline (North America) ospita meno progetti e di minor rilevanza rispetto ad altre zone. Se per le regioni “East Asia & Pacific”, “Latin America & Caribbean”, “South Asia” e “Sub-Saharan Africa” tale miglioramento risulta essere significativo ($p < 0,05$), suggerendo un’effettiva forte riduzione delle emissioni rispetto al caso baseline, altrettanto

non può essere affermato in relazione alle regioni “Europe & Central Asia” e “Middle East & North Africa”, i cui coefficienti non sono significativi ($p = 0,192$ e $p = 0,151$ rispettivamente). Pertanto, non è possibile trarre conclusioni definitive sull’effetto di tali categorie.

5.7.5 Analisi dei coefficienti di REG_YEAR_encoded

In questa sezione sono analizzati gli effetti sulla riduzione delle emissioni legati all’anno di registrazione del progetto, ricordando che il caso baseline considera i progetti appartenenti al periodo “2009-2013”.

Il coefficiente negativo del periodo “2014-2018”, pari a $-10.933,38$, non risulta essere significativo ($p = 0,392 > 0,05$); pertanto, non vi è una chiara distinzione rispetto al caso di partenza.

Il periodo “2019-2024”, invece, mostra un effetto positivo significativo (coefficiente $59.639,16$ e $p < 0,001$): ciò suggerisce un netto miglioramento nelle riduzioni delle emissioni in questo periodo rispetto alla baseline.

5.7.6 Analisi degli effetti delle variabili dummy

Infine, è necessario analizzare l’impatto delle variabili dummy presenti nel modello. La variabile “ISS_DUMMY” mostra un coefficiente positivo e significativo ($21.351,24$ con $p = 0,001$): ciò suggerisce che le riduzioni delle emissioni risultano maggiori quando è disponibile una data di prima emissione dei crediti al momento del recupero dei dati, rispetto alla situazione in cui il progetto è registrato ma non ha ancora emesso crediti.

Questo risultato risulta in contraddizione con quanto ci si aspetterebbe: infatti, seguendo la teoria del Principale-Agente, ci si aspetterebbe che a seguito di contatti ripetuti tra gli attori economici le asimmetrie informative diminuiscano. Nel contesto dell’emissione di crediti, i progetti che presentano una data di emissione implicano un doppio contatto tra regolatore e sviluppatore del progetto (ovvero la registrazione ed in seguito l’emissione). Di conseguenza, si potrebbe argomentare che i progetti che sono passati non solo attraverso la validazione, ma anche attraverso la verifica pre-emissione dovrebbero, in media, presentare riduzioni stimate inferiori. I risultati ottenuti, sebbene non possano essere utilizzati per una interpretazione causale robusta per i motivi precedentemente elencati, evidenziano l’associazione secondo cui né il CDM né i due VCM stiano effettivamente filtrando i progetti con stime inflazionate prima dell’emissione dei crediti.

Per quanto riguarda la variabile *VCM_dummy*, invece, il coefficiente non è significativo ($p = 0,456$); di conseguenza, il suo effetto non può essere distinto rispetto alla baseline.

5.8 Conclusioni

L'obiettivo principale di questa seconda parte del lavoro è stato quello di valutare se i registri dei Voluntary Carbon Markets come VERRA e Gold Standard siano più rigorosi nell'emissione di crediti di carbonio rispetto al Clean Development Mechanism; in altre parole, attraverso l'analisi di regressione multipla si è cercato di capire se i VCM tendano a sottostimare il numero di crediti emessi rispetto al CDM in modo significativo, *ceteris paribus*.

Alla luce di quanto analizzato nei paragrafi precedenti, si può notare che i risultati della regressione non supportano tale ipotesi: infatti, il coefficiente della variabile dummy relativa ai VCM (*VCM_dummy*) non è statisticamente significativo. Questo suggerisce che non esistono differenze sostanziali tra i VCM ed il CDM in termini di rigore nella concessione di crediti di carbonio in relazione alle riduzioni stimate di emissioni.

Tale conclusione risulta essere coerente con quanto osservato da Üblackner nella sua tesi: anche quest'ultimo, infatti, conclude osservando che non vi sono prove sufficienti per affermare che i registri VCM siano più stringenti del CDM nel processo di emissione dei crediti.

In sintesi, i risultati della regressione multipla suggeriscono, tenendo conto dei limiti del modello discussi in precedenza, che le differenze nelle riduzioni stimate delle emissioni siano maggiormente influenzate da altre variabili, quali il tipo e la dimensione del progetto, la regione di implementazione ed il periodo temporale piuttosto che dal tipo di registro utilizzato.

Questi risultati, sebbene limitati dalla bassa capacità esplicativa del modello (in termini di R-squared), offrono importanti spunti di riflessione per il dibattito sulla governance del carbonio, vale a dire il quadro istituzionale e normativo che regola il funzionamento dei mercati del carbonio. In questo contesto, come analizzato nella prima parte del lavoro, una delle principali preoccupazioni riguarda l'integrità dei crediti emessi, cioè la loro rispondenza ai criteri di addizionalità, verificabilità e permanenza. I risultati ottenuti sembrano suggerire che non vi sia una effettiva differenziazione tra i vari standard di certificazione, sollevando interrogativi sulla capacità dei VCM di garantire la qualità dei crediti in modo uniforme. Tale mancanza di standardizzazione dei VCM è risultata essere

uno dei problemi principali che frenano lo sviluppo di questi strumenti: un sistema di mercato volontario con una governance debole, infatti, potrebbe permettere l'emissione di crediti per riduzioni di emissioni che non sono realmente conformi ai criteri necessari, minando la credibilità dell'intero sistema e la sua efficacia nel contribuire alla lotta al cambiamento climatico.

Infine, tornando ai risultati della regressione, considerando il basso valore di R-squared, è probabile che ulteriori ricerche potrebbero migliorare la capacità esplicativa del modello. Ad esempio, si potrebbe valutare l'inclusione di variabili aggiuntive, oppure l'utilizzo di modelli non lineari. Inoltre, un'analisi più rigorosa delle interazioni tra le singole variabili potrebbe svelare dinamiche più complesse che non sono attualmente catturate dal modello. Tali approfondimenti potrebbero fornire una comprensione più completa sul meccanismo di emissione dei crediti di carbonio.

TERZA PARTE: Valutazione tecnico-economica degli scenari di investimento per la produzione di biochar a Cuba

Quest'ultima parte del lavoro si pone in continuità con le analisi teoriche del mercato volontario del carbonio e delle caratteristiche dei crediti di compensazione del carbonio, fornendo una applicazione pratica dei concetti precedentemente esposti. In particolare, in questa sezione sarà condotta una analisi di scenari di investimento, con l'obiettivo di valutare la potenziale profittabilità per una grande azienda italiana, leader di settore nella produzione di caffè, derivante dalla creazione di bioreattori per la produzione di biochar a Cuba.

Tale azienda risulta essere fortemente impegnata nella creazione di un portfolio di progetti "green", ovvero con il chiaro intento di realizzare una strategia net-zero. In questo contesto, l'idea alla base di questo capitolo è quella di verificare se la produzione di biochar localizzata nel territorio cubano e la conseguente emissione di crediti di compensazione del carbonio per ogni tonnellata di CO_2e sequestrata possa rappresentare una strategia alternativa e più vantaggiosa in confronto all'acquisto diretto di crediti emessi sul VCM, senza alcun coinvolgimento diretto nel progetto certificato.

Per valutare questi progetti, si è deciso di far riferimento alla metodologia VM0044 dell'ente certificatore VERRA e il motivo di questa scelta è duplice: in primo luogo, tale registro ricopre un ruolo centrale tra gli standard del VCM, come ampiamente dimostrato nelle sezioni precedenti di questo lavoro. Inoltre, la scelta è ricaduta su tale metodologia poiché essa è stata appositamente creata con lo scopo di fornire un benchmark di riferimento per la regolamentazione della produzione di biochar a livello internazionale e il conseguente conteggio del volume di tonnellate di CO_2e catturate per la corrispettiva emissione di crediti.

La sezione sarà suddivisa in diverse parti, con lo scopo di approfondire i vari scenari di produzione del biochar a Cuba: infatti, ciascuno scenario presenta una scala di produzione differente, data la diversa disponibilità di materia prima e collocazione dei produttori. Per ogni scenario sarà condotta una analisi dei *discounted free cashflows* cumulati, con l'obiettivo di valutare i tempi di recupero dell'investimento (*payback period*), il valore attuale netto (*Net Present Value*, NPV) e il tasso interno di rendimento (*Internal Rate of Return*, IRR) al variare dei casi. Lo sviluppo di tale analisi seguirà il procedimento proposto da un precedente lavoro di tesi (Illich et al., 2023), che analizza gli scenari di investimento della stessa azienda ma in aree geografiche diverse, ovvero Nord Italia e Brasile.

6. Approfondimento sul biochar

Prima di procedere con le analisi di investimento, risulta indispensabile fornire una definizione di cosa sia esattamente il biochar, nonché spiegare perché rivesta un ruolo così significativo nel mercato volontario del carbonio.

Con il termine biochar si fa riferimento ad un materiale carbonioso altamente poroso, ottenuto attraverso la pirolisi di biomassa: si tratta di un processo termochimico che avviene ad alte temperature, in condizioni di scarso o nullo apporto di ossigeno, e consente la conversione di biomasse organiche in un prodotto stabile ricco di carbonio, quale appunto il biochar. Le materie prime utilizzate per la produzione di biochar possono comprendere una vasta gamma di biomasse, tra cui residui legnosi, scarti agricoli, potature arboree, vinacce, sottoprodotti agroindustriali e letame animale. Il biochar si distingue per una struttura interna caratterizzata da una rete di micro-pori, che gli conferisce una elevata superficie specifica: infatti, tale porosità, unita alla presenza di gruppi funzionali sulla superficie, rende questo materiale unico, in grado di influenzare positivamente il suolo, migliorandone la capacità di ritenzione idrica, la fertilità e la capacità di sequestro di carbonio.

L'applicazione del biochar risulta dunque coerente con i concetti moderni di sviluppo sostenibile, poiché svolge ruoli critici nel mantenimento dell'equilibrio degli ecosistemi, nel controllo dell'inquinamento del suolo e nello sviluppo sostenibile dell'ambiente agricolo. Infatti, numerose strategie per garantire la sicurezza alimentare per una popolazione mondiale in crescita includono l'aumento della produzione per unità di superficie e il miglioramento sostenibile della produttività agricola mediante l'utilizzo del biochar (Khan et al., 2024).

6.1 Metodologie di produzione del biochar

L'interesse crescente verso il biochar per diverse applicazioni ha portato ad un incremento della conversione della biomassa in tale materiale. Per far ciò, esistono diversi metodi di conversione termochimica: la pirolisi, la carbonizzazione idrotermale (*Hydrothermal Carbonization*, HTC), la gassificazione e la torrefazione. Per ottenere una resa massima di biochar, è necessario selezionare la metodologia in base al tipo di biomassa in input e alle condizioni del processo: queste ultime, infatti, risultano cruciali in quanto influiscono sugli stati fisici e chimici del biochar, nonché sulla sua morfologia (Yaashikaa et al., 2020). La seguente *Tabella 7* mostra un riepilogo di tali metodologie, che saranno approfondite nei paragrafi successivi.

Technique	Temperature (°C)	Residence time	Yield of biochar (%)	Yield of bio-oil (%)	Syngas production (%)
Pyrolysis	300–700 (slow)	< 2 s (slow)	35 (slow)	30 (slow)	35 (slow)
	500–1000 (fast)	Hour-day (fast)	12 (fast)	75 (fast)	13 (fast)
Hydrothermal carbonization	180–300	1–16 h	50–80	5–20	2–5
Gasification	750–900	10–20 s	10	5	85
Torrefaction	290	10–60 min	80	0	20

Tabella 7

(Fonte: (Yaashikaa et al., 2020))

6.1.1 Pirolisi

Si definisce pirolisi il processo di decomposizione termica dei materiali organici in un ambiente privo di ossigeno ad una temperatura compresa tra 250 – 900 °C. Durante tale processo, i componenti quali la cellulosa, l’emicellulosa e la lignina subiscono reazioni di depolimerizzazione, frammentazione e reticolazione a temperature specifiche, generando prodotti solidi, liquidi e gassosi: le prime due categorie includono il biochar e il bio-olio, mentre i gas rilasciati comprendono l’anidride carbonica, il monossido di carbonio, l’idrogeno e i syngas (gas di sintesi, corrispondenti ad una miscela di gas). Va sottolineato, inoltre, come la resa del biochar nella pirolisi sia dipendente dalla tipologia e dalle caratteristiche dei materiali usati come input. In particolare, la variabile che più influenza l’efficienza risulta essere la temperatura: ad un aumento di quest’ultima, tipicamente corrisponde una riduzione della resa del biochar.

La pirolisi, inoltre, può essere ulteriormente distinta in pirolisi veloce e lenta, a seconda della velocità di riscaldamento, della temperatura, della pressione e del tempo totale di permanenza del materiale nel reattore.

Nel caso di pirolisi veloce, si fa riferimento ad un processo progettato per massimizzare la resa di bio-olio dalla biomassa, con un elevato potenziale per applicazioni energetiche. Tale processo implica un tempo di permanenza minimo dei gas nella zona calda del reattore, al fine preservare la qualità del bio-olio, ottenuta attraverso il rapido raffreddamento dei gas. Per far ciò, è necessario utilizzare velocità di riscaldamento elevate delle particelle di biomassa a temperature considerevoli (500 – 1000 °C).

Al contrario, la pirolisi lenta prevede una bassa velocità di riscaldamento ed un tempo di permanenza prolungato, oltre a temperature minori rispetto al caso precedente (300 – 700 °C). Questo metodo garantisce una maggiore resa di biochar, con l’obiettivo di ottenere un ottimo ammendante per il suolo.

6.1.2 Carbonizzazione idrotermale

La carbonizzazione idrotermale (*Hydrothermal Carbonization*, HTC) è un processo termochimico per la conversione di biomasse ed è ritenuto un processo “conveniente” in quanto risulta eseguibile a basse temperature (180 – 250 °C) e pressioni, in presenza di acqua allo stato liquido. Durante la reazione HTC, la biomassa procede attraverso varie reazioni come disidratazione, frammentazione e isomerizzazione, per poi subire le successive trasformazioni di condensazione, polimerizzazione e disidratazione intramolecolare, fino alla creazione del prodotto finale. Quest’ultimo è denominato “hydrochar”, al fine di differenziarlo dal prodotto ottenuto dai processi a secco come l’idrolisi e la gassificazione, e presenta caratteristiche molto simili alla lignite. Infine, dato che il processo avviene in presenza di acqua, si può affermare che l’HTC sia idonea al trattamento di biomasse con un alto livello di umidità: le materie prime di partenza per tale trasformazione possono dunque essere scarti vegetali e biologici di attività agricole e industriali, nonché provenienti dal servizio di raccolta differenziata dei rifiuti urbani.

6.1.3 Gassificazione

La gassificazione è un metodo termochimico di decomposizione del materiale carbonioso in prodotti gassosi, in particolare il syngas: si tratta di un gas sintetico, ottenuto mediante una reazione di ossidazione parziale, composto da CO , CO_2 , CH_4 , H_2 e tracce di idrocarburi. Tale processo richiede una temperatura piuttosto elevata (750 – 900 °C), tendenzialmente superiore a quella della pirolisi, ed è considerato più efficiente dal punto di vista energetico e più adatto a produrre elettricità e calore: infatti, il syngas può essere utilizzato direttamente per il riscaldamento o convertito in elettricità ed altri combustibili. Inoltre, la gassificazione risulta essere in grado di gestire una gamma più vasta di materie prime da biomassa e per tale motivo può essere maggiormente scalabile per le applicazioni industriali.

Il meccanismo di gassificazione può essere suddiviso in diverse fasi: in primo luogo vi è la fase di essiccazione, in cui il contenuto di umidità presente nella biomassa viene completamente evaporato senza recupero di energia; qualora il contenuto di umidità nella biomassa raggiunga valori molto elevati, l’essiccazione viene utilizzata come processo separato durante la gassificazione. Infine, vi sono le reazioni di ossidazione e combustione degli agenti di gassificazione: si tratta delle principali fonti di energia del processo complessivo, in cui gli agenti di gassificazione reagiscono con le specie combustibili presenti nel gassificatore per produrre CO_2 , CO e acqua.

6.1.4 Torrefazione

La torrefazione è una tecnica emergente per la produzione di biochar: essa impiega una bassa velocità di riscaldamento, una temperatura limitata (290 °C circa) ed un tempo di permanenza nel bioreattore inferiore a 30 minuti. Nonostante la torrefazione sia meno efficiente della pirolisi in termini di produzione di biochar (non a caso si può definire tale trasformazione come una “pirolisi incompleta”, poiché solo una parte della biomassa in input è convertita effettivamente in carbone), essa richiede molta meno energia e non necessita di bioreattori imponenti. Per questi motivi, essa risulta essere una trasformazione più accessibile a comunità locali di agricoltori.

Il processo di torrefazione può essere scomposto in diverse fasi: in primo luogo vi è la fase di riscaldamento, in cui la biomassa è riscaldata fino a raggiungere la temperatura di essiccazione desiderata (100 °C circa) ed il contenuto di umidità presente nella biomassa evapora. Successivamente, la temperatura è ulteriormente aumentata fino a 200 °C per far evaporare completamente l’acqua nella cosiddetta fase di “post-essiccazione”; alla fine di tale trasformazione, il contenuto di massa diminuisce sensibilmente. A questo punto avviene il principale stadio dell’intero processo di torrefazione: esso si svolge tra i 200 – 300 °C e rende la biomassa più idrofoba e resistente alla decomposizione biologica. Infine, dopo la formazione del prodotto finale, la temperatura nella fase di raffreddamento è diminuita progressivamente fino al raggiungimento di quella presente nell’ambiente.

6.2 Applicazioni del biochar

Come analizzato in precedenza, il biochar possiede delle caratteristiche uniche che lo portano ad avere una vasta gamma di applicazioni, le quali saranno oggetto della trattazione di questo paragrafo.

- Agricoltura: il biochar è utilizzato principalmente quale ammendante organico del terreno, in quanto possiede proprietà capaci di migliorare le rese agricole, la ritenzione idrica del suolo, di aumentare gli elementi nutritivi nel terreno e migliorare il loro rilascio nel tempo, riducendo sensibilmente la necessità di utilizzare fertilizzanti chimici (Jeffery et al., 2011). Inoltre, il biochar può aiutare a correggere il pH del suolo, specialmente nel caso di suoli acidi, migliorando ulteriormente la disponibilità di nutrienti per le piante.
- Trattamento delle acque: grazie alla sua porosità, il biochar risulta essere capace di assorbire gli elementi contaminanti, quali i metalli pesanti, gli organismi patogeni e

contaminanti organici o inorganici potenzialmente tossici. Questa proprietà lo rende, dunque, particolarmente adatto alla filtrazione e bonifica delle acque.

- Zootecnia: il biochar può anche essere utilizzato quale additivo per l'alimentazione animale grazie alla sua capacità di aumentare le rese metaboliche favorendo la digestione e l'assorbimento dei nutrienti negli animali. Inoltre, esso trova impiego nei sistemi di gestione del letame poiché previene il deflusso dei nutrienti, mitigando così l'inquinamento ambientale¹⁸.
- Industria cementizia: il biochar trova una ulteriore applicazione in tale industria, quale additivo capace di garantire una maggiore stabilità chimica, una bassa conduttività ed una limitata infiammabilità.

6.3 Potenzialità e prospettive: il ruolo del biochar nelle Strategie Net Zero

Il biochar, grazie alla sua ampia gamma di applicazioni e al suo carattere ecologico e sostenibile, è risultato essere utile per l'implementazione di Strategie Net Zero: infatti, esso è riconosciuto come una tecnica “*carbon negative*”, ossia in grado di produrre una riduzione dei livelli di CO_2 in atmosfera, come dimostrato da diversi studi LCA (*Life Cycle Assessment*), grazie alle sue caratteristiche (Bellieni et al., 2017). Infatti, attraverso il processo di “carbonizzazione” della biomassa organica, il biochar risulta in grado di sequestrare elevate quantità di carbonio per periodi prolungati: nel caso di applicazione come ammendante del suolo è generalmente stimato uno stoccaggio per un periodo molto ampio, compreso tra 100 e 1.000 anni (Smith et al., 2024).

In ottica futura, quindi, il biochar si presenta come una soluzione strategica perfettamente inseribile nel contesto del mercato volontario del carbonio, che potrebbe svolgere un ruolo cruciale nella diffusione di questo materiale su larga scala. Infatti, il VCM, incentivato dalle crescenti esigenze ESG delle aziende, offre una piattaforma ideale per convogliare investimenti significativi verso nuovi impianti di produzione di biochar, come si vedrà nel prosieguo di questa parte del lavoro. Attraverso lo scambio di crediti di carbonio, le aziende hanno l'opportunità non solo di compensare le proprie emissioni di gas serra, ma anche di sostenere progetti innovativi di riduzione e sequestro delle emissioni, contribuendo attivamente alla lotta contro i cambiamenti climatici. Le prospettive per il biochar all'interno del VCM sono quindi promettenti, aprendo nuove possibilità per uno sviluppo sostenibile e per il raggiungimento degli obiettivi globali di riduzione delle emissioni.

¹⁸ <https://www.reteclima.it/biochar-prodotto-dai-mille-utilizzi-e-soluzione-di-carbon-removal/>

7. Metodologia di VERRA per la regolamentazione dei progetti biochar: VM0044

Nel capitolo precedente sono state analizzate le caratteristiche distintive del biochar, mettendo in luce le sue notevoli potenzialità nel contesto del mercato dei crediti di compensazione del carbonio. In questa parte, invece, l'attenzione sarà rivolta sulle modalità di certificazione ed emissione dei crediti nel VCM legate ad una progettualità di produzione di biochar tramite pirolisi di biomasse agricole di scarto, al fine di garantire un secondo afflusso monetario positivo all'impresa che propone tale progetto.

A tale scopo, sarà attuata una analisi approfondita della metodologia VM0044¹⁹ sviluppata da VERRA: si tratta di un protocollo specificamente progettato per la regolamentazione dei progetti legati al biochar (“Methodology for biochar utilization in soil and non non-soil applications”) e rappresenta uno strumento cruciale per garantire l'integrità ambientale e la trasparenza nei progetti, delineando criteri univoci per la quantificazione, il monitoraggio e la verifica dei benefici climatici associati all'utilizzo del biochar.

Questa metodologia è stata sviluppata da VERRA in collaborazione con altre organizzazioni impegnate nello sviluppo di strategie di decarbonizzazione, quali Biochar Works, Delaney Forestry Services, Forliance e South Pole, ed è basata sulle seguenti fonti normative di emanazione dell'UNFCCC:

- Clean Development Mechanism Small-Scale Methodology AMS-III.L: metodologia per evitare la produzione di metano dalla decomposizione della biomassa attraverso la pirolisi controllata (v. 2.0);
- Clean Development Mechanism Small-Scale Methodology AMS-III.E: metodologia per evitare la produzione di metano dalla decomposizione della biomassa tramite combustione controllata, gassificazione o trattamento meccanico o termico (v. 17.0);
- Clean Development Mechanism Small-Scale Methodology AMS-III.BG: metodologia per la riduzione delle emission tramite la produzione ed il consumo sostenibile di carbone vegetale (v. 3.0);
- Clean Development Mechanism EB23 (Annex 18): definizione di biomassa rinnovabile.

¹⁹ <https://verra.org/methodologies/vm0044-methodology-for-biochar-utilization-in-soil-and-non-soil-applications/>

Inoltre, lo sviluppo della metodologia è stato influenzato dai seguenti documenti:

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019, Appendice 4): metodo per stimare il cambiamento delle riserve di carbonio organico nei suoli minerali dovuto all'utilizzo di biochar;
- International Biochar Initiative (IBI): definizione standardizzata del prodotto e linee guida per il test del biochar utilizzato nel suolo (v. 2.1);
- European Biochar Certificate (EBC): linee guida per una produzione sostenibile di biochar (v. 10.1).

La metodologia VM0044 prevede inoltre che l'attività del progetto debba installare e far funzionare una nuova struttura di produzione di biochar, in cui il proponente del progetto deve obbligatoriamente approvvigionare la biomassa di scarto, produrre il biochar e assicurarsi che quest'ultimo sia utilizzato in applicazioni nel suolo o al di fuori di esso. Il documento del VM0044 specifica, infine, che i benefici in termini di riduzione di GHG sono accreditati solo per il biochar utilizzato nelle applicazioni idonee, le quali saranno oggetto della descrizione dei prossimi paragrafi.

7.1 VM0044: ambito tecnologico

Analizzando il documento relativo alla metodologia VM0044, si evince che esistono dei criteri di applicabilità di tale protocollo:

- il biochar deve essere ottenuto da biomassa di scarto idonea tramite alcuni processi termochimici: pirolisi, gassificazione o caldaie a biomassa; si precisa, inoltre, che la torrefazione e la carbonizzazione idrotermale non sono considerati;
- i progetti utilizzano impianti di produzione di biochar sia a bassa che ad alta tecnologia, secondo le linee guida presenti nella Sezione 3 del documento;
- i produttori di biochar devono disporre di un programma di protezione della salute e della sicurezza dei lavoratori contro inquinanti atmosferici e altri pericoli.

7.2 VM0044: Biomassa elegibile

Il materiale di origine utilizzato per la produzione del biochar deve soddisfare tutti i seguenti requisiti per essere ritenuto idoneo:

- deve essere esclusivamente biomassa di scarto biogenica e non coltivata appositamente;

- in assenza del progetto, esso sarebbe stato destinato alla decomposizione o alla combustione per scopi diversi dalla produzione di energia;
- non deve essere stato importato da altri paesi;
- non deve contenere contaminanti dannosi per la salute.

7.3 VM0044: Criteri di applicazione

Il protocollo, inoltre, stabilisce le circostanze in cui il biochar risulta essere idoneo per un progetto:

- il biochar deve essere utilizzato entro un anno dalla sua produzione, per prevenire un eventuale decadimento prima dell'applicazione;
- il biochar è idoneo per essere utilizzato come ammendante del suolo su terreni diversi dalle zone umide: in particolare, i terreni idonei risultano essere i terreni coltivati, le praterie, suoli urbani vegetati e foreste. Il biochar può essere applicato sia in superficie che nel sottosuolo: nel primo caso esso deve essere miscelato con altri con altri substrati; per l'applicazione nel sottosuolo, invece, può essere utilizzato come unico ammendante;
- il biochar deve rispettare standard qualitativi che evitano il rischio di trasferimento di metalli pesanti e contaminanti organici indesiderati nel suolo;
- il biochar prodotto in impianti di produzione ad alta tecnologia è altresì idoneo all'applicazione fuori dal suolo: ad esempio, nel cemento o nell'asfalto.

Tale documento, inoltre, precisa le condizioni in cui la metodologia non è applicabile: in particolare, essa non può ritenersi applicabile qualora il biochar sia utilizzato per scopi energetici come, ad esempio, in qualità di combustibile.

7.4 VM0044: Baseline e addizionalità

Lo scenario di riferimento (baseline) risulta essere quello in cui, in assenza del progetto, la biomassa di scarto è lasciata a decomporsi o bruciata per scopi diversi dalla produzione di energia, come evidenziato in precedenza. Il proponente del progetto deve fornire prove credibili dello scenario di riferimento per la biomassa di scarto e deve dimostrare l'addizionalità del suo progetto in conformità con i requisiti stabiliti dal VCS Standard. Nei seguenti paragrafi sarà analizzato il metodo di conteggio delle rimozioni di GHG, strettamente legato al concetto di addizionalità del progetto.

7.5 VM0044: Quantificazione delle riduzioni e rimozioni di emissioni di GHG

La metodologia offre un approccio completo, solido e credibile per quantificare le rimozioni nette di gas serra derivanti dalla gestione del biochar. Le emissioni di riferimento considerano il flusso di CH_4 , N_2O e CO_2 e sono definite e quantificate in termini di tonnellate di CO_2 equivalente per anno.

In particolare, la quantificazione dei GHG è organizzata all'interno di un quadro che consente un approccio ampio per stimare gli impatti climatici della catena del valore del biochar. Tale quadro include diverse fasi:

- fase di approvvigionamento, in cui la biomassa di scarto viene reperita e trasportata all'impianto di produzione;
- fase di produzione, nella quale la biomassa di scarto viene convertita in biochar attraverso una trasformazione termochimica;
- fase di applicazione, in cui il biochar viene applicato ad un utilizzo finale di lungo termine.

Tale metodologia propone una distinzione, nella fase di produzione, tra impianti di produzione ad alta e a bassa tecnologia. Per lo scopo del presente lavoro, si considererà soltanto l'opzione relativa all'impianto ad alta tecnologia, in quanto il progetto che sarà oggetto delle analisi successive utilizza un impianto di pirolisi di una azienda cinese leader internazionale nel settore, definibile quindi come altamente tecnologico.

Il modello adottato dalla metodologia VM0044 per quantificare le emissioni di GHG sequestrate utilizza la seguente formula:

$$ER_y = (ER_{SS,y} - ER_{PS,y} - ER_{AS,y}) - LE_y$$

dove:

- ER_y : riduzioni nette delle emissioni di GHG nell'anno y [tCO_2e]. A tutti gli effetti, tale valore indica il numero di crediti (VCU) che verranno emessi da VERRA. Ai fini della valutazione economica del progetto per l'azienda produttrice di caffè in questione, il valore di tali VCU sarà conteggiato alla stregua di una entrata positiva.
- $ER_{SS,y}$: riduzione delle emissioni di GHG nella fase di approvvigionamento (sourcing) nell'anno y [tCO_2e].

- $ER_{PS,y}$: rimozioni delle emissioni di GHG nella fase di produzione nell'anno y [tCO_2e].
- $ER_{AS,y}$: emissioni di gas serra nella fase di applicazione del progetto nell'anno y [tCO_2e].
- LE_y : rilocalizzazione delle emissioni di carbonio totali nell'anno y [tCO_2e]. Si tratta di un fenomeno che si verifica quando, a seguito della riduzione delle emissioni da parte di una attività, si osserva un aumento complessivo delle emissioni di gas serra. Questo fenomeno, noto come *leakage*, rappresenta una sorta di “fuga” delle emissioni: infatti, le riduzioni ottenute in un'area vengono compensate dall'incremento in un'altra. Un esempio di rilocalizzazione nel contesto del progetto in esame può verificarsi quando vi sono emissioni aggiuntive e non pianificate, come quelle derivanti dal trasporto della biomassa in input e del biochar in output.

Nei seguenti paragrafi saranno analizzate nel dettaglio le varie voci, scomponendo la formula totale nelle varie fasi del progetto.

7.5.1 Emissioni nella fase di approvvigionamento

In questa fase, la metodologia si basa sulla raccolta di biomassa di scarto: pertanto, le emissioni sono assunte pari a zero. Formalmente, il contributo di questa fase sarebbe:

$$ER_{SS,y} = \sum_y (BE_{SS,y} + PE_{SS,y})$$

- $BE_{SS,y}$: emissioni di riferimento nella fase di approvvigionamento nell'anno y [tCO_2e]. In questo caso, appunto, il valore predefinito è pari a zero.
- $PE_{SS,y}$: emissioni del progetto nella fase di approvvigionamento nell'anno y [tCO_2e].
Come detto in precedenza, anche tale valore è pari a zero.

7.5.2 Emissioni nella fase di produzione

Nel contesto del progetto, il bilancio netto dei gas serra dipende dal contenuto di carbonio organico nella fase di produzione del biochar. Infatti, si esegue un bilancio del carbonio confrontando la differenza tra il contenuto di carbonio stabilizzato nel biochar e le emissioni risultanti del progetto legate al pretrattamento delle materie prime e alla conversione della biomassa di scarto in biochar. Le rimozioni delle emissioni del progetto durante la produzione seguono la seguente formula:

$$ER_{PS,y} = \sum_t [(\sum_k CC_{t,k,y} \times \frac{44}{12}) - (\sum_p PE_{PS,t,p,y})]$$

- $CC_{t,k,y}$: contenuto di carbonio organico sulla base del peso a secco del biochar di tipo t , utilizzato per il tipo di applicazione k , nell'anno y [t]. Si tratta di un valore che è alla base del calcolo delle emissioni di GHG ed è derivato dalla massa del biochar, dal rispettivo contenuto di carbonio organico e dal tasso di decadimento di quest'ultimo su un periodo di 100 anni. Il contenuto totale di carbonio organico è stimato come segue:

$$CC_{t,k,y} = \sum_p (M_{t,k,p,y} \times F_{Cp,t,p} \times PR_{de,k})$$

dove:

- $M_{t,k,p,y}$: massa a secco di biochar di tipo t per il tipo di applicazione k prodotto presso l'impianto di produzione p nell'anno y [t].
 - $F_{Cp,t,p}$: contenuto di carbonio organico del tipo di biochar t prodotto nell'impianto di produzione p per tonnellata di biochar, sulla base del peso secco [%]. Per impianti altamente tecnologici, tale parametro è definito tramite analisi di laboratorio del biochar stesso. Nel contesto del progetto in esame, dal momento che la biomassa in input è costituita dagli scarti del caffè, si è assunto un valore pari al 65%, in accordo con uno studio delle proprietà del biochar derivanti dalla biomassa in origine (Domingues et al., 2017).
 - $PR_{de,k}$: fattore di aggiustamento della permanenza dovuto al decadimento del biochar per il tipo di applicazione k . In questo caso, tale valore è stato assunto pari a zero.
- $\frac{44}{12}$: coefficiente per convertire il carbonio organico da [t] a [tCO_2e].
 - $PE_{PS,t,p,y}$: emissioni del progetto relative alla produzione del tipo di biochar t per l'impianto di produzione p nell'anno y [tCO_2e]. Queste emissioni sono determinate utilizzando la seguente equazione:

$$PE_{PS,p,y} = (PE_{D,p,y} + PE_{P,p,y} + PE_{C,p,y}) \times \frac{\sum_t \sum_k M_{t,k,p,y}}{M_{p,y}}$$

dove:

- $P_{ED,p,y}$: emissioni associate al pretrattamento della biomassa di scarto presso l'impianto di produzione p nell'anno y [tCO_2e].
- $P_{EP,p,y}$: emissioni associate alla conversione della biomassa in biochar presso l'impianto di produzione p nell'anno y [tCO_2e]. Nel contesto di un impianto altamente tecnologico come quello in esame, tali emissioni possono essere considerate nulle ai fini del calcolo in quanto l'elevata efficienza termica dell'impianto limita le emissioni di metano in atmosfera.
- $P_{EC,p,y}$: emissioni dovute all'utilizzo di energia ausiliaria per la pirolisi presso l'impianto di produzione p nell'anno y [tCO_2e].

Inoltre, risulta necessario scendere più nel dettaglio nel calcolo delle emissioni associate al pretrattamento della biomassa, $P_{ED,p,y}$:

$$P_{ED,p,y} = P_{EDE,p,y} + P_{EDF,p,y}$$

- $P_{EDE,p,y}$: emissioni associate all'uso di elettricità per il pretrattamento della biomassa di scarto presso l'impianto di produzione p nell'anno y [tCO_2e]. Tale valore deve essere calcolato secondo le disposizioni del CDM Tool 05: “Baseline, project and/or leakage emissions from electricity consumption and monitoring of electricity generation”. Nel contesto del progetto in esame, tale valore è pari a zero: l'impianto, infatti, acquista energia prodotta da fonti rinnovabili direttamente sul mercato libero.
- $P_{EDF,p,y}$: emissioni associate alla combustione di combustibili fossili utilizzati per il pretrattamento della biomassa di scarto presso l'impianto di produzione p nell'anno y [tCO_2e]. Anch'esso deve essere calcolato in accordo con le disposizioni del CDM, in particolare il Tool 03: “Tool to calculate project or leakage CO₂ emissions from fossil fuel combustion.” Il coefficiente di conversione $[\frac{tCO_2}{L}]$ adottato per il consumo di benzina da imputare al biotrituratore a scoppio dell'impianto utilizzato è $2,34 \frac{kgCO_2}{L}$ ²⁰.

²⁰ <https://www.tcs.ch/mam/Digital-Media/PDF/Booklets/FAQ-diossido-di-carbonio-CO2.pdf>

Infine, per la fase di produzione risulta necessario approfondire ulteriormente il valore delle emissioni associate all'utilizzo di energia ausiliaria per la pirolisi, $P_{EC,p,y}$:

$$P_{EC,p,y} = P_{ECE,p,y} + P_{ECF,p,y}$$

- $P_{ECE,p,y}$: emissioni associate all'uso di elettricità per l'avvio del reattore presso l'impianto p nell'anno y [tCO_2e]. Esse devono essere calcolate secondo le disposizioni del CDM Tool 05: “*Baseline, project and/or leakage emissions from electricity consumption and monitoring of electricity generation.*” Come nel caso precedente, tale valore è stato assunto a zero grazie all'acquisto di energia rinnovabile sul mercato libero.
- $P_{ECF,p,y}$: emissioni associate alla combustione di combustibili fossili utilizzati per l'avvio del reattore presso l'impianto p nell'anno y [tCO_2e]. Per il calcolo, si fa riferimento alle disposizioni del CDM Tool 03: “*Tool to calculate project or leakage CO₂ emissions from fossil fuel combustion.*” Il coefficiente di conversione [$\frac{tCO_2}{m^3}$] adottato per il consumo di gas naturale per l'avviamento del processo di combustione è pari a $1,96 \frac{kgCO_2}{m^3}$ ²¹.

7.5.3 Emissioni nella fase di applicazione

Nel contesto del progetto, le emissioni associate alla lavorazione e all'utilizzo del biochar dopo la produzione possono avere un impatto sul potenziale complessivo di rimozione delle emissioni. La seguente equazione determina le emissioni di GHG in questa fase:

$$ER_{AS,y} = \sum_k \sum_t [(-1) \times (E_{p,t,k,y} + E_{ap,t,k,y})]$$

- $E_{p,t,k,y}$: emissioni derivanti dalla lavorazione del biochar di tipo t per l'applicazione k nell'anno y [tCO_2e]. Nel contesto in esame si è assunto un valore pari a zero in quanto non sono state previste lavorazioni prima dell'applicazione nel suolo.
- $E_{ap,t,k,y}$: emissioni derivanti dall'utilizzo del biochar di tipo t per l'applicazione k nell'anno y [tCO_2e]. Dal momento che le emissioni di GHG derivanti dalla

²¹https://www.mite.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/emission_trading/tabella_coefficienti_standard_nazionali_2011_2013_v1.pdf

miscelazione di biochar con prodotti fertilizzanti possono essere considerate come trascurabili, anche tale valore risulta essere nullo.

7.5.4 Rilocalizzazione delle emissioni (leakage)

Nel caso dell'utilizzo del biochar, la rilocalizzazione delle emissioni è principalmente attribuita alle emissioni di trasporto nelle diverse fasi del suo ciclo di vita. La quantificazione di tali emissioni è la seguente:

$$LE_y = LE_{as,y} + LE_{bd,y} + LE_{ts,y} + LE_{tap,y}$$

- $LE_{as,y}$: rilocalizzazione delle emissioni dovuta al cambiamento di attività nell'anno y [tCO_2e]. Dal momento che l'utilizzo di biomassa appositamente coltivata per la produzione di biochar non è attualmente consentito, tale valore può essere considerato nullo.
- $LE_{bd,y}$: rilocalizzazione delle emissioni dovuta ad altro utilizzo della biomassa rispetto a quello originario nell'anno y [tCO_2e]. Anche questo valore è trascurabile, in quanto la metodologia consente di utilizzare soltanto biomassa che sarebbe stata altrimenti incenerita o destinata alla decomposizione.
- $LE_{ts,y}$: rilocalizzazione delle emissioni dovuta al trasporto della biomassa di scarto dalla fonte all'impianto di produzione nell'anno y [tCO_2e]. Secondo le disposizioni del CDM, tale valore deve essere calcolato soltanto nel caso in cui la distanza di trasporto è superiore ai 200km e, seguendo il Tool 12 (*“Project and leakage emissions from transportation of freight”*):

$$LE_{ts,y} = \frac{[\sum_i (km^{x_i-plant} * n_{trucks}^{x_i-plants}) * \frac{kgCO_2e}{km}]}{1000}$$

- $LE_{tap,y}$: rilocalizzazione delle emissioni dovuta al trasporto di biochar dall'impianto di produzione al sito di applicazione finale nell'anno y [tCO_2e]. Anche in questo caso risulta rilevante solo se la distanza è superiore ai 200km e il proponente del progetto deve utilizzare il CDM Tool 12 *“Project and leakage emissions from transportation of freight”* per calcolare tale valore come segue:

$$LE_{tap,y} = \frac{[\sum_i (km^{plant-x_i} * n_{trucks}^{plants-x_i}) * \frac{kgCO_2e}{km}]}{1000}$$

8. Caso di studio: descrizione degli impianti scelti per la produzione di biochar

Il caso di studio oggetto di questa parte del lavoro prevede di effettuare delle analisi di scenari di investimento per la produzione di biochar in impianti di produzione da costruire nel territorio di Cuba per conto di una nota azienda italiana appartenente al settore del caffè, che ha espresso interesse per soluzioni sostenibili in ambito produttivo. Per il progetto in esame, basandosi sulla metodologia VM0044 precedentemente analizzata, si è scelto di adottare impianti di produzione appartenenti alla categoria CHAB system: si tratta di un tipo di tecnologia avanzata che integra la cogenerazione di calore, energia e biochar e, per questo motivo, è classificabile come “high technology production facility”.

Dopo una accurata valutazione delle condizioni e dei requisiti del progetto, si è deciso di optare per gli impianti CHAB prodotti da Beston Group Co., Ltd.²²: si tratta di una azienda cinese, fondata nel 2013, appartenente alla Divisione per la protezione ambientale di Henan Golee Holding Group, promotrice di soluzioni per la rigenerazione delle risorse attraverso la produzione di attrezzature e l’implementazione di progetti nel mercato globale, con sede legale situata nella città di Zhengzhou, provincia di Henan (Cina).

L’azienda è impegnata a diventare un leader globale nella rigenerazione delle risorse: a tal fine, ha stabilito basi di ricerca e sviluppo con molte università cinesi e ha istituito filiali e uffici all’estero in Romania, Brasile, Pakistan, Uzbekistan, Filippine, Indonesia e Sri Lanka, esportando attrezzature in più di 100 paesi nel mondo, riuscendo a guadagnare mercati stabili in più di 30 di questi. Attualmente, i progetti promossi da Beston Group nel mondo hanno ottenuto l’approvazione dei clienti e dei governi locali, confermando dunque la qualità delle soluzioni proposte dall’azienda per soddisfare continuamente le diverse esigenze dei clienti: infatti, l’azienda possiede più di 15 brevetti per invenzioni tecnologiche sviluppate dal team di ricerca e sviluppo e presenta numerose certificazioni ISO, tra cui la ISO9001 per il sistema di gestione della qualità e la ISO14001 per la sostenibilità ambientale.

La seguente *Figura 22* mostra schematicamente la presenza di Beston Group nel mercato globale.

²² <https://www.bestongroup.net/>



Figura 22

(Fonte: <https://www.bestongroup.com/wp-content/uploads/2022/09/CATALOG-Charcoal-making-machine.pdf>)

Beston Group produce diverse tipologie di macchinari per la produzione di biochar: in primo luogo, impianti cosiddetti “*skid-mounted type*”, che offrono un design modulare ed una struttura esterna simile ad un esoscheletro che ne facilita lo spostamento, qualora il cliente richieda un impianto che possa affrontare viaggi; in secondo luogo, vi sono gli impianti “*batch type*”, che producono un lotto al giorno; infine, gli impianti “*fully continuous type*”, che possiedono una capacità produttiva su larga scala e permettono un processo continuo durante il giorno. Per il progetto in esame, si è deciso di far riferimento all’ultima tipologia di impianti e, in base ai diversi scenari di produzione, saranno scelti i tre diversi modelli esistenti: BST-10, BST-30 e BST-50. Nei successivi paragrafi saranno analizzati i parametri specifici di ciascun modello, mentre l’attenzione di questo paragrafo sarà rivolta alle caratteristiche generali della tipologia *fully continuous*.

In *Figura 23* è mostrato il modello 3D degli impianti di produzione *fully continuous* e delle loro componenti principali, mentre la successiva *Figura 24* presenta il disegno tecnico del layout degli stessi.

- Gas esausti (linea verde): tali gas sono esalati dalla combustione di gas naturale durante la seconda fase pirolitica. Essi sono convogliati in primo luogo verso i *dedusting system* per la depurazione e successivamente sono fatti confluire verso il *dryer* per alimentare l'essiccamento della biomassa in input. Al termine del processo, i gas esausti terminano all'interno di una *spray tower*, in grado di assorbire gli inquinanti in essi presenti per abbattere dell'80% circa l'inquinamento che deriverebbe da un loro rilascio incontrollato in atmosfera: tale rilascio, infatti, renderebbe negativo il bilancio di carbon footprint relativo alla produzione del biochar stesso.
- Biochar (linea nera): al termine del processo di pirolisi della biomassa in input, il biochar risultante è raffreddato e trasportato verso la fine del processo da uno *screw conveyor*.

La seguente *Figura 26* pone l'attenzione sul processo di pirolisi che avviene nel reattore degli impianti BST-10/30/50. Tale processo, come descritto nei capitoli precedenti, prevede il riscaldamento della biomassa di scarto in un ambiente ad ossigeno limitato, che consente la decomposizione termica in biochar ed altri sottoprodotti. Il reattore vanta un controllo molto accurato della temperatura, che permette una carbonizzazione ottimale dei vari materiali in input, garantendo prodotti finali di alta qualità. Inoltre, tali attrezzature utilizzano meccanismi di riscaldamento avanzati e sistemi di flusso d'aria ottimizzati, i quali permettono di ridurre drasticamente i tempi del ciclo di carbonizzazione ed un maggiore output finale.



Figura 26

(Fonte: <https://www.bestongroup.net/charcoal-making-machine-for-sale/>)

8.1 BST-10

Il primo impianto oggetto di analisi approfondita è il BST-10. Si tratta di un impianto che possiede una capacità produttiva di medio livello rispetto all'intera gamma di reattori offerta dall'azienda Beston Group: infatti, tale reattore è capace di pirolizzare $1 \frac{t}{hr}$ di biomassa in input, per un totale di $6.240 \frac{t}{anno}$ considerando che l'impianto funziona 24 ore su 24 per 5 giorni a settimana (queste ultime sono le ipotesi di lavoro considerate nel quadro del progetto in esame), a fronte di una produzione media di biochar pari al 30%.

8.2 BST-30

Per quanto concerne il BST-30, si tratta di un impianto che permette una scala produttiva medio-grande, riuscendo a pirolizzare fino a $3 \frac{t}{hr}$ di biomassa in input, per un totale di $18.720 \frac{t}{anno}$ sulla base delle ipotesi di lavoro considerate.

8.3 BST-50

Si tratta del bioreattore di tipo *fully continuous* con la capacità produttiva più elevata di tutta la gamma di prodotti offerti dall'azienda cinese. Infatti, tale impianto è utilizzato per produzioni su larga scala, laddove sia disponibile una elevata quantità di biomassa disponibile, riuscendo a pirolizzare fino a $5 \frac{t}{hr}$, per un totale di $31.200 \frac{t}{anno}$ nelle ipotesi di lavoro sopra definite.

8.4 Confronto dei parametri tecnici degli impianti BST-10/30/50

Come anticipato in precedenza, i tre modelli lavorano eseguendo lo stesso flow chart operativo e quindi lo stesso processo produttivo. Ciò che differisce tra i tre modelli, dunque, è la diversa scala di produzione raggiungibile: ciò è attribuibile alle diverse dimensioni dell'impianto, le quali si ripercuotono sulla diversa capacità di biomassa in input e, di conseguenza, sul consumo energetico totale richiesto per la pirolisi.

La seguente *Tabella 8* offre una panoramica di confronto tra i diversi parametri tecnici dei tre modelli di impianto considerati; questi ultimi, successivamente, saranno accuratamente selezionati in base allo scenario di produzione da analizzare.

Model	BST-10	BST-30	BST-50
Land	L25m*W15m*H7m	L30m*W15m*H7m	L35m*W15m*H8m
Total	34,7kw	61,5kw	116kw
Input capacity	2-4m ³ /h (1000kg/h)	7-9m ³ /h (3000kg/h)	10-15m ³ /h (5000kg/h)
Reactor diameter	Ø1300	Ø1700	Ø2000
Reactor material	Q245R + 310S		
Structure	Double barrel double hearth		
Pressure	Micro negative pressure		
Speed	1-9RPM		
Fuel	Diesel/natural gas/heavy oil		
Noise	≤80dB		
Condenser	Circulating water cooling		
Rotation method	External gear rotation		
Heat method	Direct heating		
Working method	Continuous		
Control	Automatic control		
Feed requirement	Size ≤20mm; moisture ≤15%; strong liquidity		

Tabella 8

(Fonte: <https://www.bestongroup.com/wp-content/uploads/2022/09/CATALOG-Charcoal-making-machine.pdf>)

9. Caso di studio: descrizione preliminare degli scenari

In questa parte del lavoro sono presentati i tre distinti scenari di produzione di biochar nel territorio cubano. Tali scenari si differenziano per numero di produttori coinvolti, distanze dai centri di raccolta e lavorazione e volumi di biomassa di scarto disponibili. Per tutti questi scenari, il centro di gravità della produzione sorgerebbe nel comune di Contramaestre, situato nella provincia di Santiago di Cuba: in questo territorio, infatti, esiste già uno spazio, di proprietà dell'azienda italiana produttrice di caffè, in cui installare l'impianto di produzione del biochar. La biomassa da utilizzare come input del processo è, per la maggior parte degli scenari, di proprietà di BioCubaCafè²³: si tratta di una impresa creata per supportare i produttori di caffè, con l'obiettivo di valorizzare la produzione di caffè con una filiera corta, efficace, equa e garantita, per promuovere uno sviluppo locale integrato.

Gli scenari oggetto di analisi comprendono: la Comunità Bio, caratterizzata da una produzione concentrata e controllata entro un raggio di 200 km; la Comunità Bio e Convenzionale entro 100 km, con una maggiore dispersione dei produttori e biomassa in parte già contrattualizzata; infine, la Comunità Bio e Convenzionale entro 200 km, che include un numero ancora maggiore di produttori e distanze più estese. Le successive analisi si concentreranno sulle implicazioni logistiche ed economiche di ciascuno di questi scenari.

9.1 Scenario 1: Comunità Bio

Il primo scenario è caratterizzato dalla presenza di 270 produttori concentrati nel raggio di 200 km, con una disponibilità di biomassa in input pari a $3.050 \frac{t}{anno}$ così suddivisa:

- $100 \frac{t}{anno}$ di pergamino: si tratta della membrana gelatinosa che avvolge il seme del caffè all'interno della ciliegia del caffè. Dopo che quest'ultima è raccolta, il frutto esterno viene rimosso, lasciando il chicco di caffè avvolto da questo strato sottile, composto principalmente da cellulosa, che viene rimosso nel processo di molitura prima della tostatura del caffè.
- $2.750 \frac{t}{anno}$ di cascara: si tratta della buccia essiccata della ciliegia di caffè, ovvero il frutto che avvolge il chicco vero e proprio. Durante il processo di lavorazione, dopo che i chicchi sono separati dal frutto, la cascara rimane come un sottoprodotto di scarto.

²³ <https://www.biocubacafe.com/>

- $200 \frac{t}{anno}$ di sfalci di caffè: si tratta dei residui vegetali ottenuti dal processo di potatura delle piante di caffè, necessario per controllare la crescita e stimolare la produzione di queste ultime. Questi sfalci possono includere rami, foglie ed altri materiali vegetali, solitamente considerati come scarti del processo produttivo.

Per le successive analisi di questo scenario si farà riferimento all'impiego di un impianto di produzione BST-10, dal momento che la capacità produttiva di quest'ultimo è ampiamente superiore alla disponibilità di biomassa annuale.

Come detto in precedenza, i centri di produzione in questo scenario sono concentrati nel raggio di 200 km. Ipotizzando che il reattore sia collocato al centro di questa regione, è necessario calcolare la distanza media dei produttori (considerati come dei punti casuali all'interno di tale raggio) dal centro, considerando i viaggi di andata e ritorno che ciascun camion dovrà effettuare per trasportare la biomassa dal sito di produzione al reattore stesso. Tale valore, inoltre, sarà moltiplicato per un fattore 1,5 che tiene conto del fatto che i viaggi di trasporto su strada non sono effettuati in linea d'aria.

Questo procedimento risulta essere necessario per le successive analisi riguardanti il Life Cycle Assessment della produzione del biochar: infatti, bisogna considerare la carbon footprint dell'intero processo produttivo per assicurarsi che il bilancio complessivo di riduzione delle emissioni sia positivo e tale analisi sarà ripetuta per ciascuno scenario.

Per ottenere una stima di questa distanza media percorsa, si è fatto ricorso ad una simulazione effettuata attraverso un programma scritto nel linguaggio di programmazione Python²⁴: in particolare, tale programma permette di generare 270 punti casuali all'interno di un cerchio di raggio 200 km e di calcolarne la distanza media dal centro considerando il viaggio di andata e ritorno.

Per quanto riguarda il presente scenario, si è ottenuta una distanza media pari a circa 400 km. La seguente *Figura 27* mostra l'output grafico ottenuto attraverso la simulazione eseguita: ciascun punto blu corrisponde ad un produttore, situato per l'appunto in un cerchio di raggio 200 km.

²⁴ Cfr. Annex I per il codice del programma

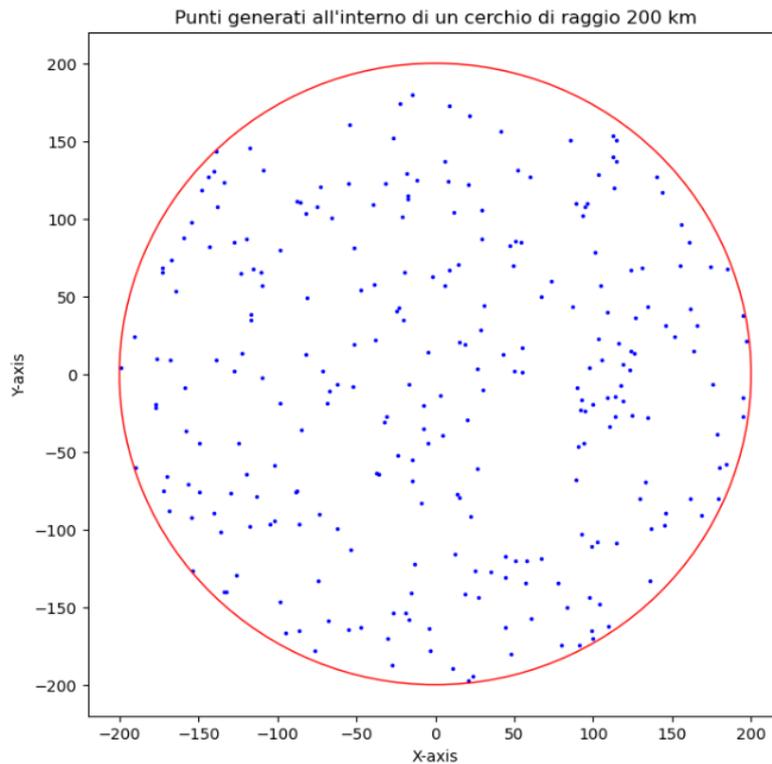


Figura 27

9.2 Scenario 2: Produzione Bio e Convenzionale a 100 km

In questo scenario, i produttori sono concentrati nel raggio di 100 km e la biomassa disponibile annualmente ammonta a $10.300 \frac{t}{anno}$, così suddivisa:

- $300 \frac{t}{anno}$ di pergamino;
- $9.000 \frac{t}{anno}$ di cascara;
- $1.000 \frac{t}{anno}$ di sfalci.

Tuttavia, data la maggior disponibilità di biomassa di scarto in un raggio limitato rispetto al caso precedente, si è ritenuto di dover tener conto di un maggior numero di produttori: quest'ultimo, infatti, è stato calcolato in proporzione al numero di produttori presenti nello scenario precedente, in relazione alla disponibilità annuale di biomassa. Eseguendo tale operazione, si è ottenuto un numero di produttori pari a 912.

Il calcolo della distanza media tra i 912 produttori ed il centro del cerchio di raggio 100 km è stato eseguito in maniera analoga al procedimento esaminato nel paragrafo precedente. Di conseguenza, ripetendo la simulazione previa modifica del numero di produttori e del raggio, si ottiene una distanza media pari a circa 200 km.

Infine, è necessario soffermarsi sulla capacità dei diversi modelli della Beston Group per determinare la quantità di impianti necessari a smaltire la quantità di biomassa disponibile annualmente. In questo caso, infatti, si giunge alla conclusione che un solo impianto BST-10 non sia sufficiente per l'elaborazione di $10.300 \frac{t}{anno}$ di biomassa. Di conseguenza, saranno analizzati due sotto-scenari: lo scenario 2.a, in cui saranno utilizzati 2 impianti di produzione BST-10 e lo scenario 2.b, che utilizzerà un solo impianto BST-30. Le seguenti *Table 9.a e 9.b* mostrano il numero di impianti di ciascun modello necessari a soddisfare le ipotesi di lavoro.

BST-10: ipotesi di lavoro	
Capacità [t/h]	1
Ore di lavoro al giorno [h/d]	24
Giorni di lavoro a settimana [d/w]	5
Settimane all'anno [w/y]	52
Giorni all'anno [d/y]	260
Ore all'anno [h/y]	6240
Capacità [t/anno]	6240
#impianti necessari	1,65064

BST-30: ipotesi di lavoro	
Capacità [t/h]	3
Ore di lavoro al giorno [h/d]	24
Giorni di lavoro a settimana [d/w]	5
Settimane all'anno [w/y]	52
Giorni all'anno [d/y]	260
Ore all'anno [h/y]	6240
Capacità [t/anno]	18720
#impianti necessari	0,55021

Table 9.a e 9.b

9.3 Scenario 3: Produzione Bio e Convenzionale a 200 km

Nell'ultimo scenario in considerazione, invece, i produttori sono concentrati in un raggio di 200 km e la disponibilità di biomassa da utilizzare come input del processo cresce ulteriormente, arrivando a $20.600 \frac{t}{anno}$ da suddividere come segue:

- $600 \frac{t}{anno}$ di pergamino;
- $18.000 \frac{t}{anno}$ di cascara;
- $2.000 \frac{t}{anno}$ di sfalci.

Anche in questo caso è stato necessario calcolare il numero di produttori in proporzione rispetto allo scenario 1, ottenendo così 1.824 produttori. La distanza media tra questi ultimi ed il centro della regione è stata calcolata analogamente ai casi precedenti attraverso la simulazione con il programma scritto nel linguaggio Phyton, ottenendo come risultato una distanza media di circa 404 km.

Infine, anche in questo caso è opportuno effettuare alcune riflessioni in merito alla capacità produttiva dei diversi modelli: in particolare, dalle analisi di questo scenario emerge che la biomassa disponibile annualmente sfiora lievemente la capacità del modello BST-30; di

conseguenza, nel prosieguo del lavoro si è deciso di analizzare due ulteriori sotto-scenari: lo scenario 3.a, in cui si utilizza un solo impianto BST-30 e si tiene in conto di perdere un modesto contenuto di biomassa, e lo scenario 3.b che vede l'adozione di un impianto di produzione su larga scala BST-50. Le seguenti *Tablelle 10.a* e *10.b* schematizzano il calcolo del numero di impianti necessari in relazione al modello considerato.

BST-30: ipotesi di lavoro		BST-50: ipotesi di lavoro	
Capacità [t/h]	3	Capacità [t/h]	5
Ore di lavoro al giorno [h/d]	24	Ore di lavoro al giorno [h/d]	24
Giorni di lavoro a settimana [d/w]	5	Giorni di lavoro a settimana [d/w]	5
Settimane all'anno [w/y]	52	Settimane all'anno [w/y]	52
Giorni all'anno [d/y]	260	Giorni all'anno [d/y]	260
Ore all'anno [h/y]	6240	Ore all'anno [h/y]	6240
Capacità [t/anno]	18720	Capacità [t/anno]	31200
#impianti necessari	1,10043	#impianti necessari	0,66026
Perdita Input [t/anno]	1880		

Tablelle 10.a e 10.b

10. Condizioni di diversificazione del caso di studio: livelli dell'investimento iniziale, WACC e crescita dei prezzi dei crediti

Come detto in precedenza, il presente studio si propone di analizzare la redditività della produzione e commercializzazione del biochar nel contesto del Voluntary Carbon Market di VERRA, attraverso l'emissione di crediti di compensazione del carbonio. Per raggiungere tale scopo, è stata adottata una metodologia basata su scenari alternativi, al fine di fornire una valutazione completa e robusta delle variabili chiave che influenzano i risultati economici del progetto, tenendo conto delle incertezze legate ai costi e all'andamento del VCM.

Questa metodologia è basata su una combinazione lineare di scenari *Best Case* (BC) e *Worst Case* (WC): in particolare, si è deciso di stimare due diversi livelli possibili per i costi iniziali di investimento e avviamento dell'attività, per il tasso di sconto dei flussi di cassa futuri (*Weighted Average Cost of Capital*, WACC) e per il tasso di crescita medio del valore dei crediti emessi (VCU), determinato dai meccanismi di domanda e offerta del VCM.

Il risultato di questo procedimento è un intervallo di valori, da un limite inferiore (*lower bound* pessimistico) ad un limite superiore (*upper bound* ottimistico): ciò, dunque, permette di migliorare la robustezza dell'analisi e consente di valutare la sensibilità delle oscillazioni

del Valore Attuale Netto (*Net Present Value*, NPV), del Tasso Interno di Rendimento (*Internal Rate of Return*, IRR) e dell'Indice di Redditività del Capitale (*Return On Investment*, ROI) rispetto alle variabili citate. Nello specifico, sono stati generati cinque sotto-scenari per ogni scenario principale (ovvero quelli descritti in precedenza), schematizzati nella seguente *Tabella 11*:

Refers to Investment, WACC, VCU price growth Scenarios			
Biochar only	Investment	WACC	VCU price growth
a	BC	BC	BC
b	WC	WC	BC
c	BC	WC	WC
d	WC	BC	WC
e	WC	WC	WC

Tabella 11

Questo prospetto mostra le sigle degli scenari in base ai valori BC-WC assunti dall'investimento iniziale, dal WACC e dalla tendenza di crescita del prezzo associato ai crediti emessi. Il valore dell'investimento iniziale sarà determinato nelle analisi successive, mentre i valori del WACC sono tratti dai Report 2020²⁵ e 2021²⁶ fornito dall'azienda italiana produttrice di caffè oggetto del presente studio e ammontano a 6,5% nel BC e 8,5% nel WC. Per quanto riguarda il tasso di crescita annuale per i VCU, si è fatto riferimento ad una indagine condotta congiuntamente da Trove Research e dall'University College of London, che ha portato alla creazione di un modello di simulazione dedicato ai mercati VCM (Turner and Maslin, 2020). In particolare, tale studio evidenzia la presenza di due scenari di prezzo possibili: il primo, in cui non vi è alcun tipo di regolamentazione (NDCs no adjustments), che porta ad un equilibrio di mercato tra $20 - 50 \frac{\$}{tCO_2e}$ e il secondo che prevede una regolamentazione del sistema per evitare il fenomeno del doppio conteggio (NDCs full

²⁵ https://www.lavazzagroup.com/content/dam/lavazza/lavazza-corporate/chi-siamo/il-gruppo-lavazza/risultati/Lavazza_RelazioniBilanci2020_Mono.pdf

²⁶ https://www.lavazzagroup.com/content/dam/lavazza-corporate/chi_siamo/risultati/module/LavazzaGroup2021_Bilanci2021_ENG.pdf

adjustments), con un prezzo di equilibrio più alto, tra $30 - 100 \frac{\$}{tCO_2e}$. Per determinare, dunque, i tassi di crescita annuali WC e BC, si è scelto di dividere rispettivamente i due valori medi dei range per la vita utile del progetto (14 anni), ottenendo $2,18 \frac{\$}{tCO_2e}/anno$ per il WC e $5,04 \frac{\$}{tCO_2e}/anno$ per il BC.

11. Caso di studio: analisi dei costi capitali (CAPEX)

I costi capitali o CAPEX (*Capital Expenditure*) rappresentano le spese che l'impresa sostiene per acquisire e mantenere i beni fisici e altre risorse di lunga durata. Essendo una componente essenziale nella crescita e nella scalabilità del progetto in esame, è necessario prestare molta attenzione nella loro gestione per evitare problemi di liquidità e assicurare un ritorno positivo sugli investimenti.

Il modello di analisi dei CAPEX è stato adottato per tutti gli scenari, con lo scopo di determinare la cifra totale da sostenere per l'avvio del progetto I_{inv}^{SC} ; l'apice SC indica lo scenario di riferimento (BC o WC), in riferimento a quanto visto nel paragrafo precedente. Tale valore è stato ottenuto tramite la seguente formula:

$$I_{Inv}^{SC} = I_{Plant} + A_{Exp}^{SC} + C_{Transp}^{CHN^{SC}} + L_{Costs}^{SC} + M_{Inst}^{SC} + I_{Verra} + C_{Permitting}^{SC} + C_{Other}^{SC}$$

dove:

- I_{Plant} : investimento iniziale necessario per l'acquisto del reattore;
- A_{Exp}^{SC} : spese aggiuntive relative all'acquisto di eventuali componenti aggiuntivi, all'affitto di macchinari per l'installazione dell'impianto e allo stoccaggio della biomassa;
- $C_{Transp}^{CHN^{SC}}$: costo di trasporto dell'impianto dal sito di produzione al sito di installazione finale;
- L_{Costs}^{SC} : costi del lavoro relativi alle prestazioni lavorative di terze parti necessarie per l'installazione dell'impianto. Tale voce di costo risulta essere definita come segue:

$$L_{Costs}^{SC} = L_{Beston}^{SC} + L_{Welders}^{SC} + L_{Plumbers}^{SC} + L_{Constr}^{SC}$$

dove:

- L_{Beston}^{SC} : costo dei tecnici Beston relativo alla trasferta necessaria all'installazione del reattore. Tale costo è stimato moltiplicando il numero n di tecnici necessari per la somma del costo dei biglietti aerei (considerando i

viaggi A/R) e della cifra totale da corrispondere all'azienda per la consulenza (ottenuta moltiplicando il compenso giornaliero w_B per il numero di giorni di trasferta). Riassumendo:

$$L_{Beston}^{SC} = n \times [(w_B \times days) + c_{tickets}^{SC}]$$

- $L_{Welders}^{SC}, L_{Plumbers}^{SC}, L_{Constr}^{SC}$: costo associato alla manodopera di esterni, ottenuto moltiplicando il compenso giornaliero di ciascuna figura professionale per il numero di giorni impiegati.
- M_{Inst}^{SC} : costo associato all'acquisto di materiali di costruzione e simili;
- I_{Verra} : investimento iniziale necessario per iscrivere il progetto nel registro VERRA seguendo la metodologia VM0044. Questo costo risulta essere così ottenuto:

$$I_{Verra} = Reg. Acc. fee + Reg. fee + Proj. Cert. fee + other$$

dove:

- $Reg. Acc. fee$: costo fisso pari a \$500 necessario per l'apertura di un account presso VERRA;
- $Reg. fee$: commissione relativa alla richiesta di registrazione, da calcolare moltiplicando il quantitativo ER_y (cfr. paragrafo 7.5) per 0,1 \$/tCO₂e;
- $Proj. Cert. fee$: costo fisso pari a \$2.500;
- $other$: costo associato alla verifica dei VVB e al monitoraggio, pari a \$15.375.
- $C_{Permitting}^{SC}$: costo relativo alle procedure di verifica della sicurezza (antincendio, ecc.);
- C_{Other}^{SC} : costi aggiuntivi da considerare per eventuali spese impreviste.

Dal momento che le spese CAPEX non sono deducibili interamente nell'anno in cui sono sostenute, si è deciso di proporre un piano di ammortamento lineare sulla vita utile degli impianti (14 anni), ottenendo il seguente valore di ammortamento annuale:

$$Depr_{lin} = \frac{I_{Inv}}{Useful Life}$$

11.1 CAPEX: Scenario 1

Lo scenario 1 prevede l'acquisto di un impianto di produzione BST-10. La seguente *Tabella 12* offre un riepilogo dei costi capitali associati a tale scenario.

CAPEX Scenario 1: 1xBST-10			
		BC	WC
	Price	\$ 200.000,00	\$ 200.000,00
	Additional expenditures (including WASTE STORAGE)	\$ 63.500,00	\$ 113.500,00
	Transportation Cost from China	\$ 40.000,00	\$ 60.000,00
Labour expenditures	Beston technician's salary [day]	\$ 350,00	\$ 350,00
	Time to install the system [day]	40	40
	Beston technician's salary	\$ 14.000,00	\$ 14.000,00
	Round -trip airtickets	\$ 4.000,00	\$ 8.000,00
	TOT Beston Technician labour cost	\$ 18.000,00	\$ 22.000,00
	Local welder salary [day]	\$ 25,43	\$ 35,00
	Number of local welder needed	1	1
	Time [day]	25	25
	TOT local welder cost	\$ 635,71	\$ 875,00
	Local plumber salary [day]	\$ 25,43	\$ 35,00
	Number of local plumber needed	1	1
	Time [day]	15	15
	TOT local plumber cost	\$ 381,43	\$ 525,00
	Local labor salary [day]	\$ 25,43	\$ 35,00
Number of local worker needed	3	3	
Time [day]	8	8	
TOT local labor cost	\$ 610,29	\$ 840,00	
Other	Other (forklift, equipment ...)	\$ 5.000,00	\$ 10.000,00
	Installation materials ready (foundation, ..)	\$ 20.000,00	\$ 30.000,00
	Permitting (environmental, firefighting, etc.)	\$ 10.000,00	\$ 20.000,00
TOTAL CAPITAL COSTS	\$ 416.718,33	\$ 516.330,90	
	Annual Depreciation	18.571,43	19.285,71

CAPEX Scenario 1: 1xBST-10 - VERRA CAPITAL COSTS		
Account Registration	\$	500,00
Registration Fee for 1 tCO2eq	\$	0,10
Registration Fee	\$	215,90
Project Certification Fee	\$	2.500,00
Other (Verification and Monitoring)	\$	15.375,00
TOT Initial investment (Capital Cost)	\$	18.590,90

Tabella 12

11.2 CAPEX: Scenario 2.a

Lo scenario 2.a prevede l'installazione di due impianti BST-10, dal momento che un solo impianto non è sufficiente per l'elaborazione della biomassa disponibile. Di seguito, la *Tabella 13* riassume i costi relativi allo scenario in esame.

CAPEX Scenario 2.a: 2xBST-10			
		BC	WC
	Price	\$ 400.000,00	\$ 400.000,00
	Additional expenditures (including WASTE STORAGE)	\$ 145.590,16	\$ 245.590,16
	Transportation Cost from China	\$ 80.000,00	\$ 120.000,00
Labour expenditures	Beston technician's salary [day]	\$ 700,00	\$ 700,00
	Time to install the system [day]	40	40
	Beston technician's salary	\$ 28.000,00	\$ 28.000,00
	Round -trip airtickets	\$ 4.000,00	\$ 8.000,00
	TOT Beston Technician labour cost	\$ 32.000,00	\$ 36.000,00
	Local welder salary [day]	\$ 25,43	\$ 35,00
	Number of local welder needed	2	2
	Time [day]	25	25
	TOT local welder cost	\$ 1.271,43	\$ 1.750,00
	Local plumber salary [day]	\$ 25,43	\$ 35,00
	Number of local plumber needed	2	2
	Time [day]	15	15
	TOT local plumber cost	\$ 762,86	\$ 1.050,00
	Local labor salary [day]	\$ 25,43	\$ 35,00
Number of local worker needed	6	6	
Time [day]	8	8	
TOT local labor cost	\$ 1.220,57	\$ 1.680,00	
Other	Other (forklift, equipment ...)	\$ 10.000,00	\$ 20.000,00
	Installation materials ready (foundation, ...)	\$ 40.000,00	\$ 60.000,00
	Permitting (environmental, firefighting, etc.)	\$ 20.000,00	\$ 40.000,00
	TOTAL CAPITAL COSTS	\$ 869.646,85	\$ 1.064.871,99
	Annual Depreciation	\$ 68.571,43	\$ 70.000,00

CAPEX Scenario 2.a: 2xBST-10 - VERRA CAPITAL COSTS	
Account Registration	\$ 500,00
Registration Fee for 1 tCO2eq	\$ 0,10
Registration Fee	\$ 426,82
Project Certification Fee	\$ 2.500,00
Other (Verification and Monitoring)	\$ 15.375,00
TOT Initial investment (Capital Cost)	\$ 18.801,82

Tabella 13

11.3 CAPEX: Scenario 2.b

In alternativa, come visto in precedenza, per lo scenario 2 (Produzione Bio e Convenzionale a 100 km) è possibile considerare l'installazione di un solo impianto di media-larga scala, ovvero il BST-30. Questo scenario alternativo serve a verificare quale tra le due possibili configurazioni risulta essere la più conveniente a livello di ritorno economico del progetto. La seguente *Tabella 14* riassume i costi da sostenere per tale investimento.

CAPEX Scenario 2.b: 1xBST-30			
		BC	WC
	Price	\$ 300.000,00	\$ 350.000,00
	Transportation Cost from China	\$ 40.000,00	\$ 60.000,00
	Waste storage	\$ 45.590,16	\$ 68.385,25
Labour expenditures	Beston technician's salary [day]	\$ 350,00	\$ 350,00
	Time to install the system [day]	40	40
	Beston technician's salary	\$ 14.000,00	\$ 14.000,00
	Round -trip airtickets	\$ 4.000,00	\$ 8.000,00
	TOT Beston Technician labour cost	\$ 18.000,00	\$ 22.000,00
	Local welder salary [day]	\$ 25,43	\$ 35,00
	Number of local welder needed	1	1
	Time [day]	25	25
	TOT local welder cost	\$ 635,71	\$ 875,00
	Local plumber salary [day]	\$ 25,43	\$ 35,00
	Number of local plumber needed	1	1
	Time [day]	15	15
	TOT local plumber cost	\$ 381,43	\$ 525,00
	Local labor salary [day]	\$ 25,43	\$ 35,00
Number of local worker needed	3	3	
Time [day]	8	8	
TOT local labor cost	\$ 610,29	\$ 840,00	
Other	Other (forklift, equipment ...)	\$ 5.000,00	\$ 10.000,00
	Installation materials ready (foundation, ..)	\$ 20.000,00	\$ 30.000,00
	Permitting (environmental, firefighting, etc.)	\$ 10.000,00	\$ 20.000,00
TOTAL CAPITAL COSTS		\$ 579.326,87	\$ 701.734,52
Annual Depreciation		\$ 31.428,57	\$ 35.714,29

CAPEX Scenario 2.b: 1xBST-30 - VERRA CAPITAL COSTS	
Account Registration	\$ 500,00
Registration Fee for 1 tCO2eq	\$ 0,10
Registration Fee	\$ 734,27
Project Certification Fee	\$ 2.500,00
Other (Verification and Monitoring)	\$ 15.375,00
TOT Initial investment (Capital Cost)	\$ 19.109,27

Tabella 14

11.4 CAPEX: Scenario 3.a

Lo scenario 3, così come il precedente, si articola in due sotto-scenari: in particolare, lo scenario 3.a preso in esame prevede l'installazione di un impianto BST-30, nonostante questo non sia sufficiente per la trasformazione di tutta la biomassa disponibile nel caso di Produzione Bio e Convenzionale a 200 km. Di conseguenza, in questo scenario si avrà una quantità di biomassa in input che non sarà possibile utilizzare, stimata pari a $1.880 \frac{t}{anno}$. La seguente Tabella 15 offre un riepilogo dei costi associati all'installazione di un reattore BST-30 che, in questo caso, dovrà processare $18.720 \frac{t}{anno}$ di biomassa.

CAPEX Scenario 3.a: 1xBST-30 (input loss)			
		BC	WC
	Price	\$ 300.000,00	\$ 350.000,00
	Transportation Cost from China	\$ 40.000,00	\$ 60.000,00
	Waste storage	\$ 91.180,33	\$ 136.770,49
Labour expenditures	Beston technician's salary [day]	\$ 700,00	\$ 700,00
	Time to install the system [day]	40	40
	Beston technician's salary	\$ 28.000,00	\$ 28.000,00
	Round -trip airtickets	\$ 4.000,00	\$ 8.000,00
	TOT Beston Technician labour cost	\$ 32.000,00	\$ 36.000,00
	Local welder salary [day]	\$ 25,43	\$ 35,00
	Number of local welder needed	1	1
	Time [day]	25	25
	TOT local welder cost	\$ 635,71	\$ 875,00
	Local plumber salary [day]	\$ 25,43	\$ 35,00
	Number of local plumber needed	1	1
	Time [day]	15	15
	TOT local plumber cost	\$ 381,43	\$ 525,00
	Local labor salary [day]	\$ 25,43	\$ 35,00
Number of local worker needed	3	3	
Time [day]	8	8	
TOT local labor cost	\$ 610,29	\$ 840,00	
Other	Other (forklift, equipment ...)	\$ 5.000,00	\$ 10.000,00
	Installation materials ready (foundation, ..)	\$ 20.000,00	\$ 30.000,00
	Permitting (environmental, firefighting, etc.)	\$ 10.000,00	\$ 20.000,00
TOTAL CAPITAL COSTS		\$ 719.519,06	\$ 864.721,80
	Annual Depreciation	\$ 37.142,86	\$ 41.428,57

CAPEX Scenario 3.a: 1xBST-30 (input loss) - VERRA CAPITAL COSTS	
Account Registration	\$ 500,00
Registration Fee for 1 tCO2eq	\$ 0,10
Registration Fee	\$ 1.336,30
Project Certification Fee	\$ 2.500,00
Other (Verification and Monitoring)	\$ 15.375,00
TOT Initial investment (Capital Cost)	\$ 19.711,30

Tabella 15

11.5 CAPEX: Scenario 3.b

L'ultimo scenario in esame, invece, prevede l'installazione di un reattore con una capacità produttiva di larga scala, ovvero il modello BST-50. In questo caso, dunque, sarà possibile processare tutta la biomassa disponibile annualmente in input, senza alcuna perdita (come avveniva invece nello scenario 3.a). La successiva *Tabella 16* riepiloga i costi capitali necessari per il presente scenario.

CAPEX Scenario 3.b: 1xBST-50			
		BC	WC
Price		\$ 400.000,00	\$ 400.000,00
Transportation Cost from China		\$ 90.000,00	\$ 135.000,00
Waste storage		\$ 91.180,33	\$ 136.770,49
Labour expenditures	Beston technician's salary [day]	\$ 350,00	\$ 350,00
	Time to install the system [day]	50	50
	Beston technician's salary	\$ 17.500,00	\$ 17.500,00
	Round -trip airtickets	\$ 4.000,00	\$ 8.000,00
	TOT Beston Technician labour cost	\$ 21.500,00	\$ 25.500,00
	Local welder salary [day]	\$ 65,00	\$ 65,00
	Number of local welder needed	2	2
	Time [day]	25	25
	TOT local welder cost	\$ 3.250,00	\$ 3.250,00
	Local plumber salary [day]	\$ 65,00	\$ 65,00
	Number of local plumber needed	1	1
	Time [day]	15	15
	TOT local plumber cost	\$ 975,00	\$ 975,00
	Local labor salary [day]	\$ 65,00	\$ 65,00
Number of local worker needed	3	3	
Time [day]	8	8	
TOT local labor cost	\$ 1.560,00	\$ 1.560,00	
Other	Other (forklift, equipment ...)	\$ 5.000,00	\$ 10.000,00
	Installation materials ready (foundation, ...)	\$ 20.000,00	\$ 30.000,00
	Permitting (environmental, firefighting, etc.)	\$ 10.000,00	\$ 20.000,00
TOTAL CAPITAL COSTS		\$ 903.311,05	\$ 1.022.901,22
Annual Depreciation		\$ 47.142,86	\$ 47.857,14

CAPEX Scenario 3.b: 1xBST-50 - VERRA CAPITAL COSTS	
Account Registration	\$ 500,00
Registration Fee for 1 tCO2eq	\$ 0,10
Registration Fee	\$ 1.470,72
Project Certification Fee	\$ 2.500,00
Other (Verification and Monitoring)	\$ 15.375,00
TOT Initial investment (Capital Cost)	\$ 19.845,72

Tabella 16

11.6 CAPEX: confronto tra scenari

La prima osservazione da fare per effettuare un confronto tra i costi capitali dei diversi scenari riguarda i CAPEX riconducibili alle spese di registrazione di VERRA: infatti, tra i diversi scenari non vi è una differenza significativa in termini economici, dato che si tratta perlopiù di costi fissi.

Per quanto riguarda i restanti CAPEX, è evidente che lo scenario 1 sia il più economico, dal momento che ha una capacità installata inferiore rispetto agli altri casi ed è inserito in un contesto di produzione di biochar limitato alla sola Comunità Bio.

Confrontando invece le coppie degli altri scenari, si nota subito che lo scenario 2.a, cioè quello che prevede una installazione di due impianti BST-10 contigui, presenta dei CAPEX decisamente superiori allo scenario 2.b, sia nel WC che nel BC, nonostante quest'ultimo offra una capacità di trattamento della biomassa complessivamente superiore grazie alla capacità del modello BST-30. Di conseguenza, limitando l'analisi ai soli costi capitali, si

evinces che sia più conveniente l'installazione di un BST-30 rispetto alla doppia installazione di BST-10 per lo scenario sotto esame.

Infine, è necessario confrontare i costi dei due diversi sotto-scenari della Produzione Bio e Convenzionale a 200 km: in questo caso, l'installazione di un solo BST-30 risulta economicamente vantaggiosa rispetto all'acquisto di un impianto di produzione su larga scala. Sebbene lo scenario 3.b risulti essere il più costoso, esso offre una maggior capacità di trattamento della biomassa: ciò, dunque, potrebbe giustificare l'investimento a lungo termine, ma tale analisi sarà rimandata allo studio dei *discounted cash flow* cumulati.

12. Caso di studio: analisi dei costi operativi (OPEX e COGS)

Questa sezione analizzerà i costi operativi sostenuti dall'impresa per la realizzazione del progetto: in particolare, l'analisi si soffermerà sui costi necessari per la produzione del bene venduto (*Cost Of Good Sold*, COGS). Tale voce di costo è stata calcolata come segue:

$$COGS_y^{TOT} = (C_y^{En} + C_y^{H_2O}) \times (1 + r^{infl})^{(y-y_0)}$$

Prima di proseguire nella spiegazione delle singole voci, è necessario specificare che l'impresa non sostiene alcun costo per l'approvvigionamento della biomassa da utilizzare come input. La precedente formula, invece, è così composta:

- C_y^{En} : costi dell'energia, inclusi il trasporto della biomassa dai produttori al reattore, il carburante per alimentare quest'ultimo e le spese associate al consumo di energia elettrica rinnovabile. Riassumendo:

$$C_y^{En} = C_y^{trasp} + C_y^{fuel} + C_y^{elettr}$$

dove:

- C_y^{trasp} : il costo di trasporto della biomassa prevede un calcolo di diverse componenti. In primo luogo, è necessario moltiplicare la distanza media tra il produttore e il reattore (cfr. paragrafo 9.1 per la relativa spiegazione) per il numero di viaggi che ciascun camion deve effettuare: quest'ultimo numero deve essere calcolato tenendo conto che i camion hanno una capacità di riempimento del 60%²⁷. Una volta ottenuta la distanza totale da percorrere, si moltiplica tale numero per una voce che stima il costo di trasporto medio

²⁷ Percentuale ottenuta da un report dei dati logistici dell'impresa in esame

per ogni 1000 km percorsi; infine, bisogna sommare il prodotto tra il costo del carburante per litro per il consumo medio dei camion (ovvero quanti km percorrono con un litro di carburante). Si precisa che il costo del carburante del camion è stato assunto pari a 1,30 \$/litro²⁸. La seguente *Tabella 17* mostra un esempio di calcolo del costo annuale di trasporto in riferimento allo scenario 1 (il calcolo è analogo per tutti gli scenari e ciò che varia sarà soltanto la distanza totale da percorrere dato che il numero di viaggi necessari crescerà all'aumentare delle tonnellate di biomassa disponibili in input).

Transport Cost for Case CUBA 270 Farmer	
Modello	Truck
Load Capacity per Truck [t]	25
% Load Capacity per Truck [t]	60%
Effective Load Capacity per Truck [t]	15
Input [t]	3050
#trips required	203
average distance (scenario 1) [km]	400
Km	81.333
Transport Cost per 1000 km	\$ 957,00
# Truck Needed	1,0
truck cost	\$ 40.000,00
fuel cost per liter	\$ 1,30
km per liter	2,685148515
Total Annual Transport Cost	\$ 117.213,09

Tabella 17

- C_y^{fuel} : costo associato al consumo di carburante necessario per alimentare il reattore durante il processo di pirolisi della biomassa. Tale voce di costo è calcolata moltiplicando il numero di ore necessarie per la combustione della biomassa per il consumo di carburante orario e per il prezzo del carburante al litro (cfr. nota 28). A scopo esemplificativo, la seguente *Tabella 18* mostra un riepilogo del calcolo del costo del carburante riferito allo scenario 1: anche in questo caso il calcolo è analogo per tutti gli altri scenari e ciò che varia è soltanto la capacità del reattore e la biomassa disponibile in input.

Fuel Cost Scenario 1: 1xBST-10		
Fuel Crusher		
	Plant 1	Plant 2
Cost		
Capacity [t/hr]		1
Fuel Consumption [L/hr]	0,2	
Biomass to be crushed [t/yr]	3.050	
Hours needed to crush biomass [hrs]	3050,0	
Working days per bioreactor	127,08	
Fuel consumption [L]	610,0	
Total Fuel Consumption	610,0	
Gasoline cost - CUBA [\$/L]	1,3	
Annual Fuel Cost [\$/yr]	\$	793,00

Tabella 18

²⁸ <https://english.elpais.com/economy-and-business/2024-01-10/cuba-increases-price-of-gasoline-by-over-500-in-the-midst-of-the-crisis.html#>

- C_y^{elettr} : costo associato al consumo di energia elettrica rinnovabile, calcolato moltiplicando il fabbisogno dell'impianto installato per il costo associato al consumo di un chilowattora a Cuba.
- $C_y^{H_2O}$: costo relativo al consumo idrico, ottenuto moltiplicando il costo idrico al metro cubo per il fabbisogno dell'impianto.
- $(1 + r^{infl})^{(y-y_0)}$: termine che permette di aggiustare i prezzi all'inflazione, secondo un tasso YoY medio pari al 4,50%.

Nei seguenti paragrafi saranno mostrate le tabelle di riepilogo dei COGS per ciascuno scenario considerato.

Inoltre, per ciascuno scenario è necessario tener conto del costo annuale operativo (OPEX) per l'emissione dei crediti nel registro VERRA: nel riepilogo di ciascuno scenario sarà presente una tabella che calcola i diversi OPEX secondo la seguente formula:

$$C_{VCU,y}^E = c_{VCU}^e \times (-ER_y) + V_{fee,y}$$

dove c_{VCU}^e indica la tariffa variabile in $\frac{\$}{tCO_2e}$ da sostenere per il numero di crediti emessi (tenendo conto che $1 VCU = 1 tCO_2e \text{ rimossa} = ER_y$), mentre $V_{fee,y}$ è la tariffa fissa (2.500 \$/anno) da corrispondere a VERRA per il processo di validazione e verifica.

12.1 OPEX e COGS: Scenario 1

OPEX Scenario 1: 1xBST-10			
		DAILY COGS	ANNUAL COGS
Transportation cost		\$	117.213,09
Energy cost	Energy cost [KWh]	\$ 0,25	
	Needed [KWh]	694	208200
	TOT Energy cost	\$ 173,50	\$ 170.056,09
Water Cost	Water cost [m^3]	\$ 1,00	
	Needed [m^3]	2	600
	TOT Water cost	\$ 2,00	\$ 1.322,78
TOTAL ANNUAL COGS		\$	179.090,92

Scenario 1: 1xBST-10 - VERRA OPERATING COSTS		
	tCO2eq	\$/tCO2eq
Cumulative Fee	1-10k	\$ 0,05
	10k-1M	\$ 0,14
	1M-2M	\$ 0,12
	2M-4M	\$ 0,11
	4M-6M	\$ 0,09
	6M-8M	\$ 0,06
	8M-10	\$ 0,04
	>10M	\$ 0,03
TOT tCO2eq Annual Removals		-2159
VCU in tCO2eq		1
#VCUs emitted annually		2159
Verification body fee		\$ 2.500,00
Annual Emission Fee		\$ 2.607,95

Tabella 19

12.2 OPEX e COGS: Scenario 2.a

OPEX Scenario 2.a: 2xBST-10			
		DAILY COGS	ANNUAL COGS
Transportation cost		\$	197.917,18
Energy cost	Energy cost [KWh]	\$ 0,25	
	Needed [KWh]	694	416400
	TOT Energy cost	\$ 173,50	\$ 302.017,18
Water Cost	Water cost [m³]	\$ 1,00	
	Needed [m³]	2	600
	TOT Water cost	\$ 2,00	\$ 1.322,78
TOTAL ANNUAL COGS		\$	316.990,26

Scenario 2.a: 2xBST-10 - VERRA OPERATING COSTS		
	tCO2eq	\$/tCO2eq
Cumulative Fee	1-10k	\$ 0,05
	10k-1M	\$ 0,14
	1M-2M	\$ 0,12
	2M-4M	\$ 0,11
	4M-6M	\$ 0,09
	6M-8M	\$ 0,06
	8M-10	\$ 0,04
	>10M	\$ 0,03
TOT tCO2eq Annual Removals		-4268
VCU in tCO2eq		1
#VCUs emitted annually		4268
Verification body fee		\$ 2.500,00
Annual Emission Fee		\$ 2.713,41

Tabella 20

12.3 OPEX e COGS: Scenario 2.b

OPEX Scenario 2.b: 1xBST-30			
		DAILY COGS	ANNUAL COGS
Transportation cost		\$	197.917,18
Energy cost	Energy cost [KWh]	\$ 0,25	
	Needed [KWh]	694	208200
	TOT Energy cost	\$ 173,50	\$ 280.317,85
Water Cost	Water cost [m^3]	\$ 1,00	
	Needed [m^3]	2	600
	TOT Water cost	\$ 2,00	\$ 1.322,78
TOTAL ANNUAL COGS		\$	\$ 294.314,46

Scenario 2.b: 1xBST-30 - VERRA OPERATING COSTS		
	tCO2eq	\$/tCO2eq
Cumulative Fee	1-10k	\$ 0,05
	10k-1M	\$ 0,14
	1M-2M	\$ 0,12
	2M-4M	\$ 0,11
	4M-6M	\$ 0,09
	6M-8M	\$ 0,06
	8M-10	\$ 0,04
	>10M	\$ 0,03
TOT tCO2eq Annual Removals		-7343
VCU in tCO2eq		1
#VCUs emitted annually		7343
Verification body fee		\$ 2.500,00
Annual Emission Fee		\$ 2.867,14

Tabella 21

12.4 OPEX e COGS: Scenario 3.a

OPEX Scenario 3.a: 1xBST-30 (Input loss)			
		DAILY COGS	ANNUAL COGS
Transportation cost		\$	726.613,55
Energy cost	Energy cost [KWh]	\$ 0,25	
	Needed [KWh]	694	208200
	TOT Energy cost	\$ 173,50	\$ 833.825,15
Water Cost	Water cost [m^3]	\$ 1,00	
	Needed [m^3]	2	600
	TOT Water cost	\$ 2,00	\$ 1.322,78
TOTAL ANNUAL COGS		\$	\$ 872.729,59

Scenario 3.a: 1xBST-30 (Input loss) - VERRA OPERATING COSTS		
	tCO2eq	\$/tCO2eq
Cumulative Fee	1-10k	\$ 0,05
	10k-1M	\$ 0,14
	1M-2M	\$ 0,12
	2M-4M	\$ 0,11
	4M-6M	\$ 0,09
	6M-8M	\$ 0,06
	8M-10	\$ 0,04
	>10M	\$ 0,03
TOT tCO2eq Annual Removals		-13363
VCU in tCO2eq		1
#VCUs emitted annually		13363
Verification body fee		\$ 2.500,00
Annual Emission Fee		\$ 3.470,83

Tabella 22

12.5 OPEX e COGS: Scenario 3.b

OPEX Scenario 3.b: 1xBST-50			
		DAILY COGS	ANNUAL COGS
Transportation cost		\$	799.585,42
Energy cost	Energy cost [KWh]	\$ 0,25	
	Needed [KWh]	694	208200
	TOT Energy cost	\$ 173,50	\$ 888.056,22
Water Cost	Water cost [m^3]	\$ 1,00	
	Needed [m^3]	2	600
	TOT Water cost	\$ 2,00	\$ 1.322,78
TOTAL ANNUAL COGS		\$	929.401,06

Scenario 3.b: 1xBST-50 - VERRA OPERATING COSTS		
	tCO2eq	\$/tCO2eq
Cumulative Fee	1-10k	\$ 0,05
	10k-1M	\$ 0,14
	1M-2M	\$ 0,12
	2M-4M	\$ 0,11
	4M-6M	\$ 0,09
	6M-8M	\$ 0,06
	8M-10	\$ 0,04
	>10M	\$ 0,03
TOT tCO2eq Annual Removals		-14707
VCU in tCO2eq		1
#VCUs emitted annually		14707
Verification body fee		\$ 2.500,00
Annual Emission Fee		\$ 3.659,01

Tabella 23

13. Caso di studio: analisi dei ricavi

Il progetto sotto esame basa i propri ricavi sulla valorizzazione economica dei crediti di carbonio generati grazie alla rimozione di tCO_2e , ovvero la variabile ER_y ($ER_y = Annual\ Net\ GHG\ Emission\ Removals\ tCO_2eq$), nonché alla riduzione delle emissioni derivanti da un ridotto utilizzo di fertilizzanti (ER_y^{fert}). La valorizzazione economica dei VCU è basata sulla seguente formula:

$$VCU_{VCU,Y}^{SC} = (ER_y + ER_y^{fert}) \times [v_0 \times (1 + v_g^{SC})^{(y-y_0)}]$$

dove:

- ER_y : rimozioni annuali nette di GHG [tCO_2eq]. Tale valore è stato calcolato seguendo la metodologia VM0044 descritta nel paragrafo 7.5;
- ER_y^{fert} : riduzioni annuali nette di GHG grazie ad un ridotto uso di fertilizzanti [tCO_2eq]. Questo valore è stato calcolato sulla base del fatto che il biochar prodotto comporta (a partire dal 2026) un incremento del rendimento del terreno pari a $0,5\ kg/pianta$ (Sanchez-Reinoso et al., 2022): ciò, quindi, implica una riduzione della Carbon Footprint tra i due scenari (pre-trattamento e post-trattamento del terreno con il biochar). La seguente *Tabella 24* mostra il calcolo del termine ER_y^{fert} per lo scenario 1 (Comunità Bio) a scopo esemplificativo; il calcolo per i restanti scenari è del tutto analogo, cambierà soltanto il valore di biomassa in input e la corrispettiva quantità di biochar prodotto.

Descrizione	Numero	Unità di misura
Input Biomassa	3.050	t
Biochar prodotto	915	t
Ettari trattabili	114	ha
Incremento yield legato al BioChar	0,5	kg/pianta
#piante per ettaro	1.500	piante/ha
Incremento yield legato al BioChar	750	kg/ha
Incremento produzione post trattamento	85.781	kg
Produzione pre trattamento	1.200.000	kg
Produzione post trattamento	1.285.781	kg
Emissioni di CO2 per kg di caffè PRE	3,07	kgCO2/kg
emissioni fisse	2,79	kgCO2/kg
emissioni variabili	0,28	kgCO2/kg
Emissioni Totali post trattamento	3.707.701	kgCO2
Emissioni di CO2 per kg di caffè POST	2,88	kgCO2/kg
Riduzione Carbon Footprint	239.647	kgCO2
Riduzione Carbon Footprint in tonnellate	239,647	tCO2

Tabella 24

- v_0 : valore base di partenza medio dei VCU;
- v_g^{SC} : valore della crescita stimata dei VCU nei casi BC ($5,04 \frac{\$}{tCO_2e}/anno$) e WC ($2,18 \frac{\$}{tCO_2e}/anno$) (cfr. capitolo 10).

14. Caso di studio: Discounted Free Cash Flow Analysis

La seguente sezione analizzerà i risultati economici del progetto. Per determinare la profittabilità dei diversi scenari è stato utilizzato il metodo del *Discounted Free Cash Flow* (DCF), il più popolare ed affidabile in ambito finanziario. Questo metodo consiste nel calcolare il valore attuale dei flussi di cassa futuri generati dal progetto, scontati ad un tasso che ne riflette il rischio, e permette di valutare la sostenibilità economica a lungo termine. Nel contesto di tale analisi sono stati stimati alcuni indicatori economici chiave per fornire una visione completa della redditività e della performance finanziaria, ovvero:

- NPV_{caso} : Valore attuale netto dello scenario in esame;
- IRR_{caso} : Tasso interno di rendimento calcolato per lo scenario in esame;
- ROI_{caso}^{Avg} : Ritorno sull'investimento medio, calcolato come:

$$ROI_{caso}^{Avg} = \frac{\sum_{y=2024}^{2037} ROI_{caso,y}}{n_{y-y_0}}$$

Inoltre, è importante sottolineare che si è preso come riferimento un'aliquota di tassazione standard pari a $T_C = 20\%$ da detrarre all' $EBIT_{Case}$ qualora quest'ultimo sia positivo. Tale tassazione, tuttavia, non prende in considerazione, per il principio di prudenza, alcun vantaggio fiscale che deriva dalla natura innovativa del progetto (ad esempio le detrazioni fiscali su Irpef e Ires spettanti alle start-up innovative).

Le seguenti formule riassumono il procedimento utilizzato nel corso di queste analisi.

$$EBITDA_{Case_y} = VCU_{VCU,Y}^{SC} - Total\ Costs$$

$$EBIT_{Case_y} = EBITDA_{Case_y} + Depr.lin$$

$$NOPAT_{Case_y} = EBIT_{Case_y} * (1 - T_C)$$

$$FCF_{Case_y} = NOPAT_{Case_y}$$

$$DF_{Case_y} = \left[\frac{1}{(1 + WACC^{SC})} \right]^{y-y_0}$$

$$DFCF_{Case_y} = FCF_{Case_y} \times DF_{Case_y}$$

$$NPV_{Case} = CUM.DFCF_{Case} = \sum_{y=2024}^{Y=2037} DFCF_{Case_y}$$

$$IRR_{Case} = TIR: COST(DFCF_{2023}; DFCF_{2037})$$

$$ROI_{caso}^{Avg} = \frac{\sum_{y=2024}^{2037} ROI_{caso,y}}{n_{y-y_0}}$$

14.1 DFCF: Scenario 1

Scenario 1: 1xBST-10						
Case	Investment	WACC	VCU price growth	NPV	IRR	Avg. ROI
a	BC	BC	BC	\$ -130.207,32	-4,71%	3%
b	WC	WC	BC	\$ -261.699,46	-8,68%	2%
c	BC	WC	WC	\$ -452.003,47	N/A	-2,3981%
d	WC	BC	WC	\$ -561.332,03	N/A	-2%
e	WC	WC	WC	\$ -546.617,55	N/A	-2%
AVERAGE				\$ -390.371,97	-6,70%	-0,36%

Tabella 25

Lo Scenario 1 mostra un NPV medio negativo: ciò indica che il progetto, nella sua configurazione base che vede l'utilizzo di un solo impianto di produzione BST-10, non risulta essere economicamente sostenibile nel lungo periodo. Questo risultato suggerisce che, senza espansioni o miglioramenti dell'efficienza nel processo di produzione di biochar, i flussi di cassa generati non sono sufficienti a coprire i costi e a garantire una redditività positiva. Infatti, l'IRR di questo scenario risulta essere minore del costo del capitale (WACC), rendendo tale scenario poco attraente a livello finanziario. La seguente *Figura 28* mostra l'andamento dei flussi di cassa cumulati nel tempo, evidenziando i risultati appena commentati.

Scenario 1: Cumulated DFCF

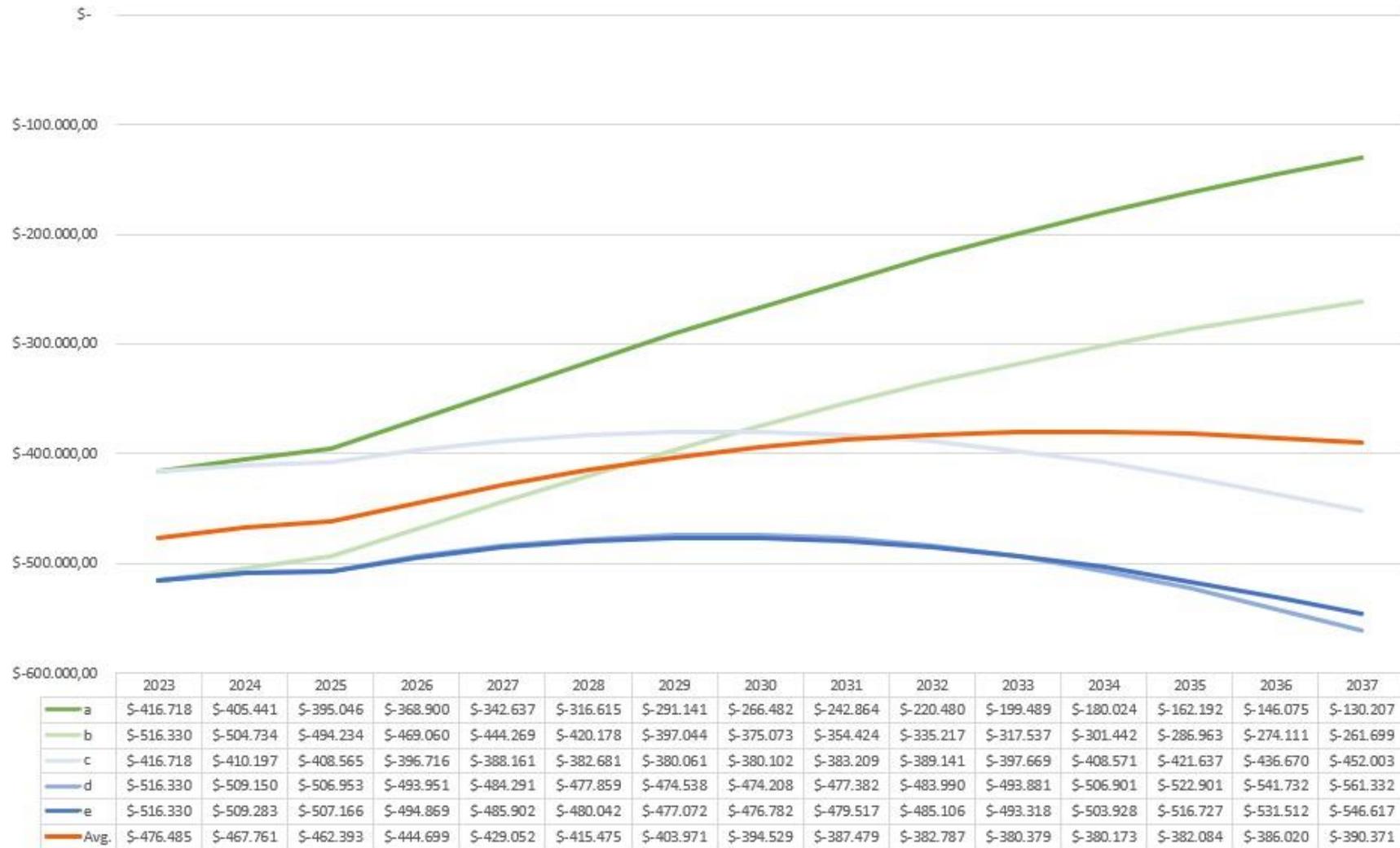


Figura 28

14.2 DFCF: Scenario 2.a

Scenario 2.a: 2xBST-10						
Case	Investment	WACC	VCU price growth	NPV	IRR	Avg. ROI
a	BC	BC	BC	\$ 2.480.929,15	28,96%	23,46%
b	WC	WC	BC	\$ 1.889.303,40	20,55%	20,58%
c	BC	WC	WC	\$ 1.241.511,27	19,94%	13,73%
d	WC	BC	WC	\$ 1.314.182,74	16,45%	12,57%
e	WC	WC	WC	\$ 1.055.440,52	14,30%	11,21%
AVERAGE				\$ 1.596.273,42	20,04%	16,31%

Tabella 26

Lo Scenario 2.a prevede l'utilizzo di due impianti di produzione BST-10: tale incremento della capacità produttiva, seppur moderato, è mirato al miglioramento dell'efficienza e comporta un lieve aumento delle spese operative e degli investimenti rispetto al caso iniziale. Tuttavia, in questa situazione, l'NPV medio risulta essere positivo e anche l'IRR dimostra un rendimento sufficiente. Di conseguenza, tale scenario rappresenta una alternativa valida in termini finanziari ed è adatto ad investitori che vogliono ottenere un buon livello di redditività, mitigando il rischio del progetto mantenendo un aumento controllato della capacità produttiva. La seguente *Figura 29* mostra l'andamento dei flussi di cassa del progetto nello Scenario 2.a in esame.

Scenario 2.a: Cumulated DFCF



Figura 29

14.3 DFCF: Scenario 2.b

Scenario 2.b: 1xBST-30						
Case	Investment	WACC	VCU price growth	NPV	IRR	Avg. ROI
a	BC	BC	BC	\$ 3.277.428,95	47,96%	44,76%
b	WC	WC	BC	\$ 2.701.902,35	37,37%	39,14%
c	BC	WC	WC	\$ 1.875.958,09	37,77%	27,79%
d	WC	BC	WC	\$ 2.100.926,73	32,94%	25,91%
e	WC	WC	WC	\$ 1.781.013,63	30,49%	22,94%
AVERAGE				\$ 2.347.445,95	37,30%	32,11%

Tabella 27

Lo Scenario 2.b comporta un significativo aumento della capacità produttiva e di conseguenza dell'investimento iniziale richiesto: la necessità di un capitale iniziale più consistente, dunque, potrebbe dilatare il periodo di rientro dell'investimento. Tuttavia, i risultati ottenuti evidenziano come questo scenario sia il più profittevole in termini di NPV: in termini assoluti, dunque, è lo scenario che genera il maggior valore netto per il progetto. Lo Scenario 2.b, dunque, sembra offrire un bilanciamento ottimale tra l'incremento della capacità produttiva e i ritorni economici: di conseguenza, tale opzione risulta essere interessante qualora ci fosse la disponibilità ad effettuare un investimento iniziale maggiore. La seguente *Figura 30* mostra l'andamento dei flussi di cassa cumulati generati dallo scenario in esame, evidenziando come, in media, il periodo di recupero dell'investimento sia di circa 3 anni.

Scenario 2.b: Cumulated DFCF

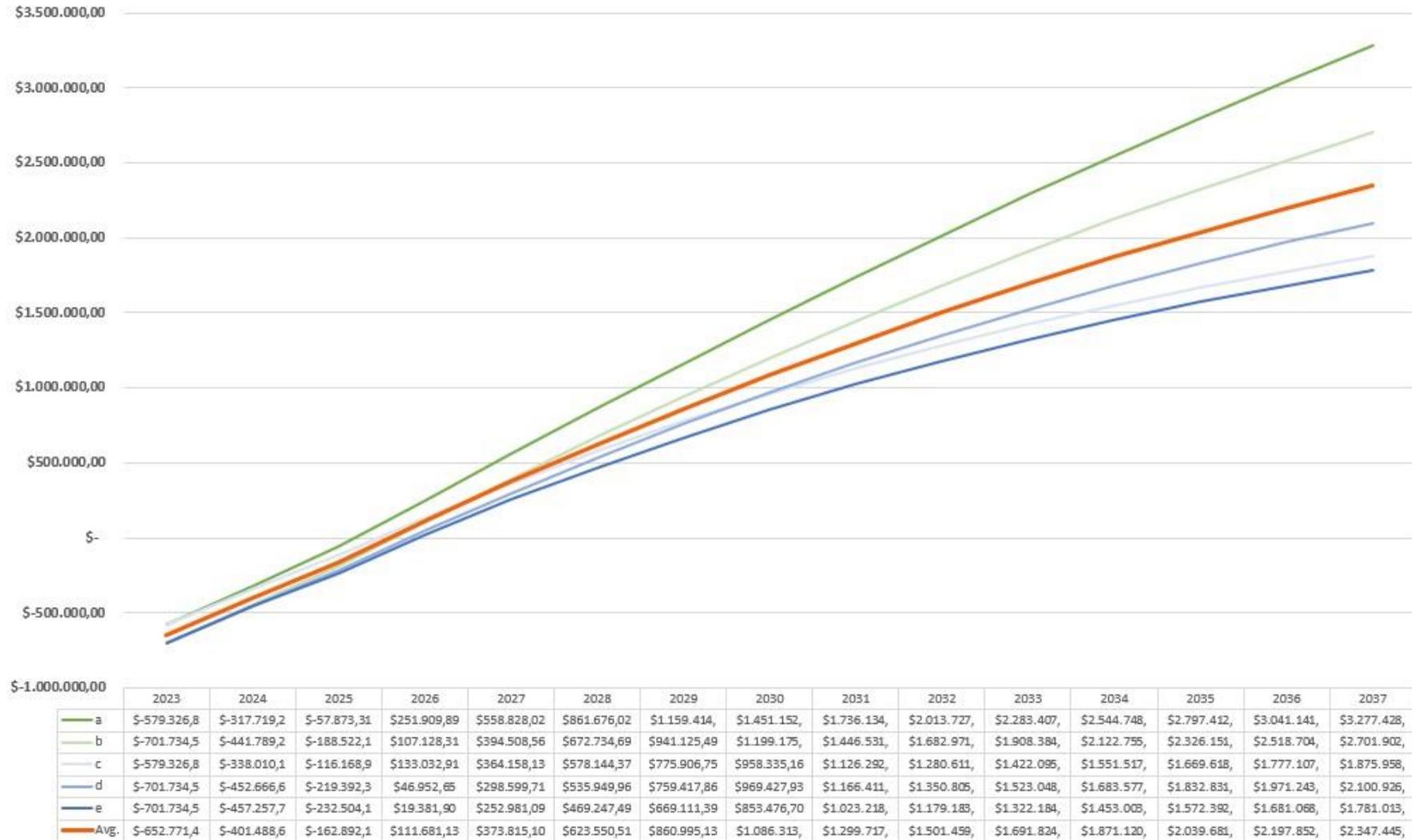


Figura 30

14.4 DFCF: Scenario 3.a

Scenario 3.a: 1xBST-30 (Input loss)						
Case	Investment	WACC	VCU price growth	NPV	IRR	Avg. ROI
a	BC	BC	BC	\$ 2.882.622,88	33,79%	33,10%
b	WC	WC	BC	\$ 2.308.189,99	25,98%	28,86%
c	BC	WC	WC	\$ 750.216,61	16,57%	12,23%
d	WC	BC	WC	\$ 793.986,65	14,11%	11,23%
e	WC	WC	WC	\$ 632.477,06	12,00%	10,17%
AVERAGE				\$ 1.473.498,64	20,49%	19,12%

Tabella 28

Nello Scenario 3.a, come nello Scenario 2.b, è previsto l'utilizzo di un unico impianto BST-30, con la differenza che nel primo caso la disponibilità di materia prima risulta superiore. Tuttavia, l'impossibilità di processare interamente tale materia prima, unita all'aumento delle distanze e dei viaggi necessari per il suo reperimento, con conseguente incremento significativo dei costi, rende l'efficacia complessiva del progetto in questo scenario inferiore rispetto allo Scenario 2.b. La seguente *Figura 31* offre una panoramica dell'andamento dei flussi di cassa cumulati generati dallo scenario in esame.

Scenario 3.a: Cumulated DCF

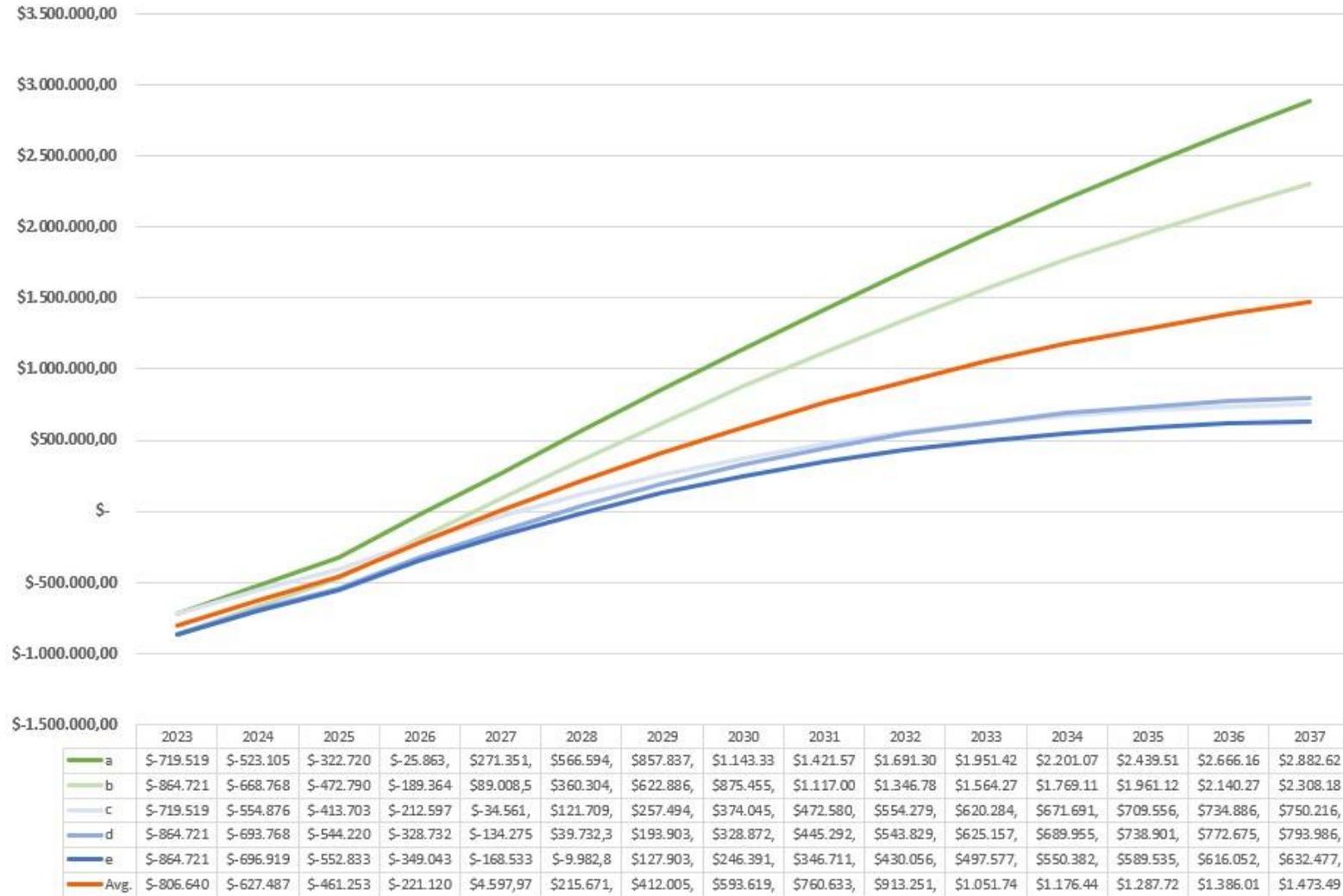


Figura 31

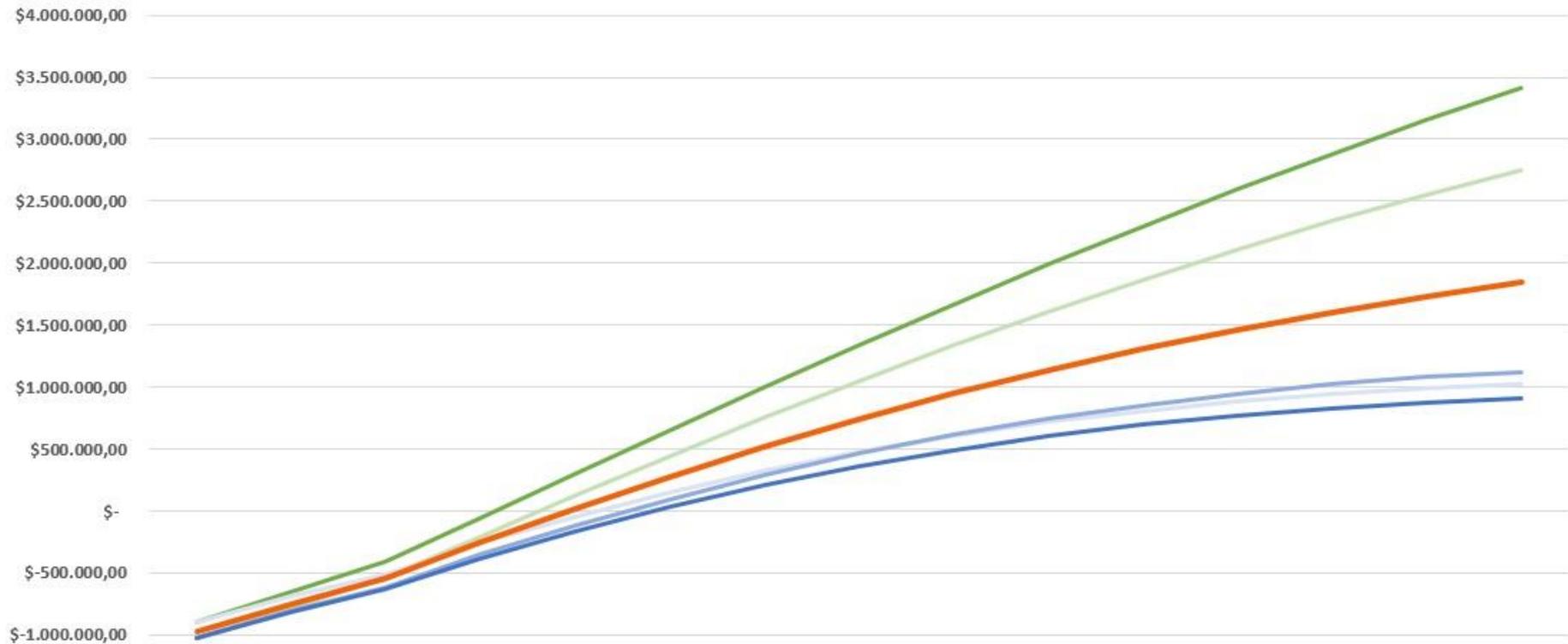
14.5 DFCF: Scenario 3.b

Scenario 3.b: 1xBST-50						
Case	Investment	WACC	VCU price growth	NPV	IRR	Avg. ROI
a	BC	BC	BC	\$ 3.410.667,06	32,59%	31,42%
b	WC	WC	BC	\$ 2.750.621,23	26,35%	24,21%
c	BC	WC	WC	\$ 1.021.385,70	17,12%	12,83%
d	WC	BC	WC	\$ 1.123.319,82	15,88%	12,58%
e	WC	WC	WC	\$ 906.372,73	13,75%	11,33%
AVERAGE				\$ 1.842.473,31	21,14%	18,47%

Tabella 29

Infine, lo Scenario 3.b prevede l'espansione massima della capacità produttiva, grazie all'investimento in un impianto BST-50. Anche in questo caso i risultati ottenuti, se confrontati con quelli dello Scenario 2.b, dimostrano come una scalabilità eccessiva dei progetti porti ad un aumento quadratico dei costi logistici, riducendo dunque l'efficacia del progetto in termini di redditività complessiva. La seguente *Figura 32* mostra l'andamento dei flussi di cassa del progetto nello scenario in esame.

Scenario 3.b: Cumulated DFCF



	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
a	\$-903.311	\$-658.008	\$-408.962	\$-54.477,	\$299.705,	\$651.043,	\$997.330,	\$1.336.66	\$1.667.40	\$1.988.18	\$2.297.83	\$2.595.38	\$2.880.07	\$3.151.28	\$3.410.66
b	\$-1.022.9	\$-781.593	\$-541.159	\$-205.470	\$123.723,	\$444.232,	\$754.292,	\$1.052.50	\$1.337.81	\$1.609.40	\$1.866.73	\$2.109.45	\$2.337.39	\$2.550.53	\$2.750.62
c	\$-903.311	\$-693.512	\$-510.675	\$-263.079	\$-42.004,	\$154.039,	\$326.513,	\$476.841,	\$606.410,	\$716.564,	\$808.599,	\$883.762,	\$943.249,	\$988.208,	\$1.021.38
d	\$-1.022.9	\$-808.626	\$-618.353	\$-356.072	\$-117.472	\$98.101,2	\$291.335,	\$462.941,	\$613.650,	\$744.207,	\$855.366,	\$947.885,	\$1.022.52	\$1.080.03	\$1.123.31
e	\$-1.022.9	\$-812.576	\$-629.253	\$-381.210	\$-159.722	\$36.701,5	\$209.524,	\$360.175,	\$490.043,	\$600.471,	\$692.758,	\$768.154,	\$827.856,	\$873.012,	\$906.372,
Avg.	\$-975.065	\$-750.863	\$-541.681	\$-252.062	\$20.845,8	\$276.823,	\$515.799,	\$737.825,	\$943.064,	\$1.131.76	\$1.304.25	\$1.460.92	\$1.602.22	\$1.728.61	\$1.842.47

Figura 32

14.6 DFCF: Conclusioni e raccomandazioni

L'analisi condotta evidenzia che il primo passo necessario, preliminare all'attuazione del progetto e all'investimento associato, consiste nell'identificazione della dimensione ottimale del progetto. I risultati dimostrano, infatti, l'esistenza di un livello ideale di espansione per i progetti di produzione di biochar, oltre il quale i costi logistici tendono a superare i benefici derivanti dai flussi di cassa aggiuntivi. Tale evidenza sottolinea la necessità di stabilire un limite all'espansione geografica del progetto, al fine di massimizzare la redditività e contenere l'aumento insostenibile dei costi logistici.

In questo contesto, gli scenari 2.a e 2.b rappresentano in modo ottimale la dimensione sostenibile del progetto, mentre gli scenari 3.a e 3.b illustrano come un'espansione eccessiva possa comportare complessità operative e costi logistici crescenti. Ne consegue che sia consigliabile mantenere il progetto entro una scala gestibile, a meno che non intervengano ragioni strategiche che giustificano un incremento della capacità produttiva e dell'estensione geografica oltre il punto ottimale.

Inoltre, l'analisi economica suggerisce lo Scenario 2.b come opzione raccomandabile per gli investitori, poiché consente di massimizzare il valore economico netto (NPV) e il rendimento percentuale, bilanciando efficacemente l'espansione della capacità con i costi e la complessità associati. I dati mostrano che, con l'aumento della scala dei progetti di biochar, si espande il raggio d'azione per la raccolta della biomassa, comportando un aumento più che proporzionale dei costi di trasporto (sia per numero di viaggi che per distanza). Lo Scenario 2.b evita questa problematica, mantenendo una dimensione produttiva che non richiede un'espansione insostenibile del raggio di raccolta. Inoltre, a differenza di scenari basati su tecnologie avanzate (come lo Scenario 3.b con il BST-50), lo Scenario 2.b contiene il rischio, assicurando sostenibilità economica e profittabilità.

In conclusione, l'analisi supporta la selezione dello Scenario 2.b come principale linea di sviluppo per il progetto di produzione di biochar in esame, in virtù della sua superiorità in termini di redditività e gestione del rischio. Tuttavia, data la variabilità dei mercati delle biomasse e delle energie rinnovabili, si raccomanda una revisione periodica dei risultati finanziari per verificare che i margini rimangano allineati con le aspettative.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha esplorato le dinamiche dei mercati di compensazione del carbonio, con particolare attenzione al Voluntary Carbon Market (VCM) e alla produzione di biochar come strumento di mitigazione delle emissioni. Attraverso un'analisi strutturata in tre parti principali, è stato possibile fornire un quadro completo delle opportunità e delle sfide legate alla compensazione delle emissioni, con l'obiettivo di identificare i meccanismi economici, normativi e tecnici che favoriscono l'adozione di pratiche sostenibili e, infine, valutare la convenienza di investimenti in progetti specifici. Di seguito, vengono sintetizzati i principali risultati e conclusioni emersi dall'analisi svolta.

La prima parte ha fornito una panoramica esaustiva sui crediti di compensazione del carbonio, distinguendo fra i mercati regolamentati, come l'*Emission Trading Scheme* (ETS), e il *Voluntary Carbon Market* (VCM). Sono stati esaminati i fattori che hanno contribuito alla crescita del VCM, tra cui la spinta normativa per la riduzione delle emissioni e l'adozione di strategie *Net Zero* da parte di imprese e istituzioni. Questa sezione ha evidenziato come i mercati di compensazione volontari, pur operando in parallelo ai mercati regolamentati, siano caratterizzati da una maggiore flessibilità e dalla partecipazione di attori privati, quali aziende, ONG e individui, che scelgono di investire in crediti per compensare le proprie emissioni di gas serra. In questo contesto, una delle questioni centrali emerse riguarda la qualità dei crediti di carbonio, garantita da standard internazionali (es. Verified Carbon Standard, Gold Standard). Tali standard sono essenziali per assicurare che i crediti generati da progetti di compensazione rispondano a criteri rigorosi, tra cui addizionalità, permanenza e accuratezza nella stima delle emissioni. In questa parte del lavoro è stato evidenziato come l'affidabilità dei crediti e la trasparenza siano fattori cruciali per la credibilità del VCM e per la fiducia degli investitori.

La seconda parte ha approfondito, mediante un modello di regressione, il rigore dei meccanismi di compensazione del VCM rispetto a quelli regolamentati dai *Clean Development Mechanisms* (CDM). Utilizzando un dataset contenente dati relativi a progetti certificati VCS, GS e CDM, l'analisi ha permesso di individuare le variabili che maggiormente influenzano il valore e la qualità dei crediti di compensazione, quali la tipologia di progetto, l'area geografica, e l'anno di registrazione. I risultati hanno mostrato che, sebbene i progetti VCM presentino standard di certificazione elevati, vi sono variabili strutturali che ne influenzano l'efficacia, in particolare la variabilità regionale e il tipo di attività. In termini di qualità, l'analisi ha evidenziato che i progetti basati su tecnologie

avanzate tendono a offrire migliori garanzie di riduzione effettiva delle emissioni rispetto a quelli nature-based, che, pur efficaci nel sequestro del carbonio, possono risentire di inversioni o rischi di leakage. Questa sezione ha quindi confermato l'importanza di criteri di selezione rigorosi e l'uso di metodologie statistiche per comprendere i fattori determinanti la qualità dei crediti.

La terza parte si è concentrata sulla valutazione di specifici scenari di investimento, per conto di una nota azienda italiana leader nel settore della produzione di caffè, per la produzione di biochar a Cuba, tecnologia che si è dimostrata promettente per il sequestro di carbonio e la riduzione delle emissioni. In questa fase, sono stati definiti diversi parametri tecnici e finanziari relativi agli impianti di produzione di biochar e sono stati analizzati vari scenari operativi per determinare l'opzione ottimale in termini di sostenibilità economica e impatto ambientale. L'analisi dei flussi di cassa scontati (DCF) ha evidenziato che il miglior scenario in termini di valore economico netto (NPV) è stato lo Scenario 2.b, che massimizza il valore assoluto dell'investimento, risultando particolarmente adatto per chi desidera ottenere il massimo rendimento economico nel lungo termine. Gli Scenari 3.a e 3.b, invece, evidenziano i limiti della scalabilità del progetto: infatti, il risultato fondamentale emerso da questa analisi è l'esistenza di una dimensione ottimale per i progetti di biochar. Oltre un certo punto, l'incremento della scala comporta una crescita quadratica dei costi logistici, rendendo l'espansione economicamente meno vantaggiosa. Questo risultato è cruciale poiché introduce un limite di redditività nei progetti di compensazione e suggerisce la necessità di bilanciare l'estensione del progetto con la sostenibilità operativa.

In sintesi, il presente elaborato ha messo in luce i principali meccanismi e le sfide legate alla compensazione volontaria delle emissioni di carbonio, fornendo al contempo un'analisi economica approfondita di progetti specifici nel settore del biochar. I risultati ottenuti offrono indicazioni preziose per i decisori, evidenziando la necessità di una selezione ponderata dei progetti e l'importanza di adottare standard rigorosi per garantire la qualità dei crediti. Inoltre, l'analisi degli scenari di investimento ha confermato che la produzione di biochar rappresenta una soluzione economicamente valida e sostenibile per il sequestro di carbonio, a patto che il progetto sia dimensionato adeguatamente per mantenere l'efficienza operativa e contenere i costi logistici. L'elaborato, quindi, contribuisce a fornire linee guida sia per gli investitori che per i policymaker interessati a promuovere pratiche di compensazione del carbonio sostenibili, e pone le basi per ulteriori ricerche future volte a migliorare l'efficacia e la scalabilità dei progetti di mitigazione delle emissioni.

Annex I

```
import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

from sklearn.cluster import KMeans

# Step 1: Genera punti casuali all'interno di un cerchio

radius = 200 # raggio del cerchio in chilometri

num_points = 270 # numero di punti

random_angles = np.random.rand(num_points) * 2 * np.pi

random_radii = np.sqrt(np.random.rand(num_points)) * radius

random_points_x = random_radii * np.cos(random_angles)

random_points_y = random_radii * np.sin(random_angles)

points = np.column_stack((random_points_x, random_points_y))

# Plot dei punti generati all'interno del cerchio

plt.figure(figsize=(8, 8))

plt.scatter(points[:, 0], points[:, 1], marker='.', color='blue', s=10)

circle = plt.Circle((0, 0), radius, color='r', fill=False)

plt.gca().add_patch(circle)

plt.xlabel('X-axis')

plt.ylabel('Y-axis')

plt.title('Punti generati all'interno di un cerchio di raggio 200 km')

plt.show()
```

```

# Step 2: Esegui il clustering con un singolo cluster

num_clusters = 1

kmeans = KMeans(n_clusters=num_clusters, random_state=0).fit(points)

cluster_labels = kmeans.labels_

# Plot dei punti colorati dal cluster

plt.figure(figsize=(8, 8))

plt.scatter(points[:, 0], points[:, 1], marker='.', c=cluster_labels, cmap='viridis', s=10)

circle = plt.Circle((0, 0), radius, color='r', fill=False)

plt.gca().add_patch(circle)

plt.xlabel('X-axis')

plt.ylabel('Y-axis')

plt.title('Punti colorati dal cluster all\'interno di un cerchio di raggio 200 km')

plt.show()

# Step 3: Calcola il centroide del cluster

#centroid = kmeans.cluster_centers_[0]

# Step 4: Calcola la distanza media dei punti dal centro considerando viaggio di andata e
ritorno

center = np.array([0, 0])

distances = np.linalg.norm(points - center, axis=1)

average_distance = np.mean(distances) * 2 * 1.5

print(f"\nDistanza media dei punti dal centro (andata e ritorno, moltiplicata per 1.5):
{average_distance} chilometri")

```

BIBLIOGRAFIA

- Amadeo, K., Anderson, S.G., 2022. Pigouvian Taxes, Their Pros and Cons, and Examples.
- Ashford Graham, 2014. The Application of Partial Crediting Policies to Carbon Offset Projects under the Kyoto Protocol's Clean Development Mechanism.
- Bakhtary, H., Streck, C., 2023. Carbon Market Opportunities in livestock production, and cocoa and coffee agroforestry systems: An analysis of opportunities in Latin America and the Caribbean (Climate Focus, VCMI, IICA).
- Battocletti, V., Enriquez, L., Romano, A., 2023. The Voluntary Carbon Market: Market Failures and Policy Implications Law Working Paper N° 688/2023.
- Bayon, R., Hawn, A., Hamilton, K., 2012. Voluntary carbon market: An international Business guide to what they are and how they work, 2nd ed. Earthscan, London.
- Bellieni, M., Brenna, S., Caserini, S., Acutis, M., Perego, A., Schillaci, C., Farina, R., Miglietta, F., Vitullo, M., 2017. Il contributo dello stoccaggio di carbonio nei suoli agricoli alla mitigazione del cambiamento climatico. Ing. Dell'Ambiente Vol. 4.
- Broekhoff, D., Gillenwater, M., Colbert-Sangree, T., Cage, P., 2019. Securing Climate Benefit: A guide to Using Carbon Offsets.
- Buckley, N.J., Mestelman, S., Muller, R.A., 2004. Cap-and-Trade versus Baseline-and-Credit Emission Trading Plans: Experimental Evidence Under Variable Output Capacity.
- Chen, S., Marbough, D., Moore, S., Stern, K., 2021. Voluntary Carbon Offsets: An Empirical Market Study.
- Chenost, C., Gardette, Y.-M., Demenois, J., Grondard, N., Perrier, M., Wemaëre, M., 2010. Bringing forest carbon projects to the market (Guide).
- Church, J., Ware, R., 2000. Industrial Organization: A Strategic Approach. McGraw-Hill.
- Climate, Energy and Environment Ministers' Meeting Communiqué, 2024.
- Domingues, R.R., Trugilho, P.F., Silva, C.A., N.A. de Melo, I.C., Melo, L.C.A., Magriotis, Z.M., Sanchez-Monedero, M.A., 2017. Properties of biochar derived

from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. *J. Plos One*.

- Illich, M., Cambini, C., Pino, F., 2023. Il Mercato della CO2 e Verified Carbon Standard (VCS) Industrial Offsetting: analisi tecnico-economica per la pirolisi di biomassa agricola di scarto per la produzione di Biochar.
- Jeffery, S., Verheijen, F.G.A., Van der Velde, M., Bastos, A.C., 2011. A Quantitative Review of the Effects of Biochar Application to Soils on Crop Productivity Using Meta-Analysis.
- Jensen, M.C., Meckling, W.H., 1976. Theory of the Firm: Managerial Behavior, Agency Costs and Ownership Structure. *J. Financ. Econ*.
- Khan, S., Irshad, S., Mehmood, K., Hasnain, Z., Nawaz, M., Rais, A., Gul, S., Wahid, M.A., Hashem, A., Abdallah, E.F., Ibrar, D., 2024. Biochar Production and Characteristics, Its Impacts on Soil Health, Crop Production, and Yield Enhancement: A Review.
- Kollmuss, A., Zink, H., Polycarp, C., 2008. Making Sense of the Voluntary Carbon Market: A comparison of Carbon Offset Standards.
- Lee, D.-H., Kim, D., Kim, S., 2018. Characteristics of forest carbon credit transactions in the voluntary carbon market.
- Olander, J., Ebeling, J., 2011. Building forest carbon projects: Step-by-step overview and guide.
- Pigou, A.C., 1932. *The Economic of Welfare*. Macmillan.
- Ravetti, C., 2021. Azioni verso il raggiungimento della neutralità di carbonio.
- Sanchez-Reinoso, A.D., Lombardini, L., Restrepo-Diaz, H., 2022. Physiological behaviour and nutritional status of coffee (*Coffea arabica* L. var. Castillo) trees in response to biochar application. *The Journal of Agricultural Science*.
- Schneider, L., La Hoz Theuer, S., 2019. Environmental integrity of international carbon market mechanisms under the Paris Agreement Climate Policy, 19:3, 386-400.
- Smith, S.M., Geden, O., Gidden, M.J., Lamb, W.F., Nemet, G.F., Minx, J.C., Buck, H., Burke, J., Cox, E., Edwards, M.R., Fuss, S., Johnstone, I., Muller-Hansen, F., Pongratz, J., Probst, B.S., Roe, S., Schenuit, F., Schulte, I., Vaughan, N.E., 2024. *The State of Carbon Dioxide Removal 2024 - 2nd Edition*.
- Stock, J.H., Watson, M.W., 2012. *Introduzione all'econometria*. Pearson Italia.

- Tirole, J., 2008. Phanish Puranam on flatness; and Jean Tirole on multi-sided markets., in: Business Strategy Review.
- Turner, G., Maslin, 2020. Future carbon credit demand, supply and prices - Trove Research.
- Üblackner, T., 2023. Are Voluntary Carbon Markets More Stringent in Crediting than the Clean Development Mechanism? - School of Transnational Governance of the European University Institute.
- Vickers, B., Trines, E., Pohnan, E., 2012. Community guidelines for accessing forestry voluntary carbon markets.
- Wang, M., McCarl, B., Wei, H., Shiva, L., 2021. Unintended Consequences of Agricultural Participation in Voluntary Carbon Markets: Their Nature and Avoidance.
- Wei, H., 2016. Voluntary Carbon Market participation and unintended consequences: an economic analysis.
- West, T.A.P., Börner, J., Sills, E.O., Kontoleon, A., 2020. Overstated carbon emission reductions from voluntary REDD+ projects in the Brazilian Amazon. Proc. Natl. Acad. Sci. PNAS 117.
- Yaashikaa, P.R., Senthil Kumar, P., Varjani, S., Saravanan, A., 2020. A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy.
- Zupi Marco, 2023. Aggiornamento sulle sfide climatiche a seguito della COP27. Approfondimento Oss. Polit. Internazionale.

SITOGRAFIA

- <https://www.reuters.com/breakingviews/guest-view-offsets-reach-moment-maturity-2021-09-24/>
- <https://www.senken.io/blog/what-are-the-types-and-categories-of-projects-in-vcn>
- <https://www.mase.gov.it/comunicati/g7-approvata-la-carta-di-venaria-da-stop-carbone-sostegno-rinnovabili-e-africa>
- <https://www.offsetguide.org/high-quality-offsets/>
- https://www.iif.com/Portals/1/Files/TSVCM_Public_Consultation.pdf
- <https://verra.org/programs/verified-carbon-standard/>

- <https://www.goldstandard.org/gold-standard-for-the-global-goals/our-standard>
- <https://acrcarbon.org/our-markets/voluntary-carbon-market/>
- <https://www.climateactionreserve.org/how/voluntary-offset-program/>
- <https://www.planvivo.org/history>
- <https://puro.earth/about>
- <https://www.nasdaq.com/solutions/carbon-removal-platform>
- <https://www.shell.com/shellenergy/othersolutions/carbonmarketreports.html>
- <https://www.carbon-direct.com/insights/assessing-the-state-of-the-voluntary-carbon-market-in-2022>
- <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/sg/pdf/2024/01/how-can-we-scale-a-trusted-voluntary-carbon-market.pdf>
- <https://www.theclimatewarehouse.org/tools/simulation-3>
- <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099605009212233328/pdf/IDU09ef226cf0a663041d60869f07078d1af9fd3.pdf>
- <https://drive.google.com/drive/folders/1FHX5mYEa5ckMX3AYQXgG39eCXfG2M-L5?usp=sharing>
- <https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>
- <https://registry.verra.org/app/search/VCS/All%20Projects>
- <https://registry.goldstandard.org/projects?q=&page=1>
- <https://registry.goldstandard.org/credit-blocks?q=&page=1>
- <https://paolapozzolo.it/coefficiente-determinazione-r-quadro/#:~:text=Se%20il%20p%2Dvalue%20relativo,R%20quadro%20%C3%A8%20stasticamente%20significativo.>
- <https://www.reteclima.it/biochar-prodotto-dai-mille-utilizzi-e-soluzione-di-carbon-removal/>
- <https://verra.org/methodologies/vm0044-methodology-for-biochar-utilization-in-soil-and-non-soil-applications/>
- <https://www.tcs.ch/mam/Digital-Media/PDF/Booklets/FAQ-diossido-di-carbonio-CO2.pdf>
- https://www.mite.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/emission_trading/tabella_coefficienti_standard_nazionali_2011_2013_v1.pdf
- <https://www.bestongroup.net/>

- <https://www.bestongroup.com/wp-content/uploads/2022/09/CATALOG-Charcoal-making-machine.pdf>
- <https://www.bestongroup.net/charcoal-making-machine-for-sale/>
- <https://www.biocubacafe.com/>
- https://www.lavazzagroup.com/content/dam/lavazza/lavazza-corporate/chi-siamo/il-gruppo-lavazza/risultati/Lavazza_RelazioniBilanci2020_Mono.pdf
- https://www.lavazzagroup.com/content/dam/lavazza-corporate/chi_siamo/risultati/module/LavazzaGroup2021_Bilanci2021_ENG.pdf
- <https://english.elpais.com/economy-and-business/2024-01-10/cuba-increases-price-of-gasoline-by-over-500-in-the-midst-of-the-crisis.html#>