POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in

Ingegneria Gestionale
Gestione dell'Innovazione e Imprenditorialità

Tesi di Laurea Magistrale

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

Relatore

Prof. Carlo Cambini

Correlatore

Ing. Flavio Pino

Candidato

Marco Illich

Matricola: 290477

Anno accademico 2022-2023

INDICE

ABSTRACT **8**

1. Che cosa si intende per Biochar **10**

2. Metodologie di produzione, dalla biomassa di scarto al prodotto finito **11**

2.1. Classificazione dei processi di pirolisi **12**

2.1.1. Slow Pyrolysis 13

2.1.2. Fast Pyrolysis 14

2.1.3. I nuovi paradigmi tecnologici della pirolisi 15

3. Composizione chimico-fisica ed interazione con il suolo **18**

4. Analisi generale del mercato Biochar e delle potenziali applicazioni **24**

4.1. Diffusione tecnologica e stato dell'arte della ricerca **25**

4.2. Ecosistema produttivo e supply chain **29**

4.3. Market Barriers **31**

4.4. Analisi dei prezzi di mercato e della customers' willingness to pay **33**

5. Verra e i programmi di Carbon Crediting **36**

5.1. VM0044: methodology for biochar utilization in soil and non-soil applications **36**

5.1.1. Ambito tecnologico 37

5.1.2. Biomassa elegibile e termini di produzione 38

5.1.3. Biochar e criteri di applicazione 38

5.1.4. Addizionalità 38

5.1.5. GHG emission removals accounting 39

5.1.6. Monitoring e risk assessment 40

6. La compravendita di CCC tramite Corporate offsetting practices **42**

6.1. Critiche **43**

7. Voluntary Carbon Market (VCM) **44**

7.1. Contesto politico e normativo **47**

7.2. COP26 e COP27, gli obbiettivi del futuro **48**

8. Descrizione del modello di analisi adottato e degli scenari esaminati **50**

8.1. Locazione geografica progettuale e tipologia di impianto scelto **50**

8.2. Scenari di prezzo analizzati **52**

8.2.1. Best Price, Middle Price, Worst Price scenarios per il mercato B2B e B2C italiano 52

8.2.2. Surveys analysis: studio sperimentale della willingness to pay tramite Van Westendorp price sensitivity meter 53

8.2.3. Analisi campionaria dei prezzi B2C reali per il mercato italiano 56

8.2.4. Best Price, Middle Price, Worst Price scenarios per il mercato B2B e B2C brasiliano 57

8.3. Diversificazione del modello di revenues e dei livelli Best Case - Worst Case dell'investimento iniziale, del WACC e del trend di crescita dei prezzi dei VCU 58
8.4. Riepilogo degli scenari analizzati per locazione geografica 61
9. Descrizione degli impianti selezionati per la produzione di biochar 63
9.1. Investimento iniziale, design, struttura e trasporto 64
9.1.1. BST-05 Pro Skid-mounted 64
9.1.2. BST-10 e BST-30 69
9.1.3. Dryer e biotrituratori 71
9.2. Carbonization Line: il reattore 76
9.3. Energy saving effect e gestione dei gas esausti 78
9.4. Security system & monitoring 81
10. Analisi del modello d'analisi adottato 82
10.1. Casi ITALIA: Analisi sulla biomassa in input al reattore 82
10.1.1. ITA 1. BST-05 Pro 82
10.1.2. ITA 2. BST-10 83
10.1.3. La ricerca di nuova biomassa da poter pirolizzare: l'intervista all'Ente Nazionale Risi 84
10.2. Casi BRASILE: Analisi sulla biomassa in input al reattore 86
10.2.1. BRA 3. 2xBST-10 86
10.2.2. BRA 4. BST-30 87
10.3. Analisi dei costi capitali di start up 89
10.3.1. ITA 1. BST-05 Pro: riepilogo costi capitali 91
10.3.2. ITA 2. BST-10: riepilogo costi capitali 92
10.3.3. BRA 3. 2xBST-10: riepilogo costi capitali 93
10.3.4. BRA 4. BST-30: riepilogo costi capitali 94
10.3.5. Confronto dei costi capitali 95
10.4. Analisi dell'Annual Cost of Good Sold (COGS) 96
10.4.1. ITA 1. BST-05 Pro: riepilogo COGS annuali 100
10.4.2. Caso ITA 2. BST-10: riepilogo COGS annuali 101
10.4.3. BRA 3. 2xBST-10: riepilogo COGS annuali 102
10.4.4. BRA 4. BST-30: riepilogo COGS annuali 103
10.4.5. Confronto dei COGS annuali 104
10.5. Analisi dei Costi Operativi annuali d'esercizio 105
10.5.1. ITA 1. BST-05 Pro: riepilogo dei Costi Operativi annuali 107
10.5.2. ITA 2. BST-10: riepilogo dei Costi Operativi annuali 108
10.5.3. BRA 3. 2xBST-10: riepilogo dei Costi Operativi annuali 109
10.5.4. BRA 4. BST-30: : riepilogo dei Costi Operativi annuali 110
10.5.5. Confronto dei Costi Operativi annuali 111

10.6. Analisi dei Costi Totali annuali d'esercizio 112
10.7. Analisi del modello di ricavi 112
10.7.1. Modello di ricavi basato sulla vendita di solo biochar 112
10.7.2. Modello di ricavi basato sulla vendita di biochar e wood vinegar in bundling 113
10.7.3. ITA 1. BST-05 Pro: riepilogo dei Ricavi Totali vs. Costi totali 114
10.7.4. ITA 2. BST-10: riepilogo dei Ricavi Totali vs. Costi totali 115
10.7.5. BRA 3. 2xBST-10: riepilogo dei Ricavi Totali vs. Costi totali 116
10.7.6. BRA 4. BST-30: riepilogo dei Ricavi Totali vs. Costi totali 117
10.7.7. Confronto dei Ricavi Totali vs. Costi totali 118
10.8. Stima delle tonnellate di GHG emissions sequestrate tramite l'utilizzo del modello di Verra .. 120
10.9. Stima della valorizzazione economica dei VCU generati 124
10.10. Discounted Free Cash Flow Analysis 126
11. Analisi dei risultati ottenuti 128
11.1. ITA 1. BST-05 Pro 128
11.2. ITA 2. BST-10 132
11.3. Analisi conclusiva dei risultati ottenuti per i casi italiani 137
11.4. BRA 3. 2xBST-10 139
11.5. BRA 4. BST-30 144
11.6. Analisi conclusiva dei risultati ottenuti per i casi brasiliani 149
CONCLUSIONE 150
INDICE DELLE FIGURE 154
INDICE DELLE TABELE 156
Bibliografia 158

L’uso del biochar può rappresentare

l'iniziativa più importante per

il futuro ambientale dell'umanità ...

Tim Flannery (2008)

ABSTRACT

Lo scopo di questo studio è determinare il livello di diversificazione ottimo di un portafoglio di progetti inerenti alla realizzazione di una strategia net-zero. A questo fine, prendendo come riferimento il caso di una grande azienda italiana leader di settore nella produzione di caffè tostato, si è cercato di dare una valutazione economica complessiva agli investimenti necessari per raggiungere l'obiettivo di neutralizzare (in parte) le proprie emissioni annue entro il 2030 tramite la realizzazione di biochar. La ricerca ha tentato di far luce sulla potenziale profittabilità derivante dalla messa a punto di un impianto Combined Heat and Biochar pyrolyzer per verificare se l'investimento nella produzione di biochar e la conseguente emissione di Crediti di Compensazione al Carbonio per ogni tonnellata di CO2e sequestrata possa essere una valida alternativa alla normale prassi che prevede il solo acquisto di CCC emessi sul Voluntary Carbon Market senza essere coinvolti direttamente nel progetto certificato. In quest'ottica, si è scelto di far riferimento alla metodologia VM0044 pubblicata dall'ente certificatore Verra il 12/08/2022, redatta appositamente per divenire benchmark internazionale di riferimento per la regolamentazione della produzione di biochar con l'obiettivo ulteriore di standardizzare il conteggio del volume di tCO2e sequestrate in sede progettuale e determinare l'emissione corrispettiva di Verified Carbon Units. A tal proposito, per massimizzare il quantitativo di tradable VCUs, si sono selezionati degli impianti di pirolisi altamente tecnologici dell'azienda cinese Beston Group Ltd., leader internazionale del settore. Al fine di proporre un'analisi coerente ed esaustiva, sono stati simulati e valutati 210 scenari a seconda della locazione geografica d'installazione del reattore (Nord Italia, Torino, Brasile, regione del Minas Gerais), della scala produttiva adottata (BST-05 Pro per la piccola scala, BST-10 per la media, BST-30 per la medio-grande), dello scenario di prezzo B2C/B2B di vendita del biochar ipotizzato (Best Price, Middle Price, Worst Price scenarios), del modello di Revenues assunto (biochar only, by products supportato dalle vendite in bundling di biochar e wood vinegar), in un contesto di certificazione o meno e a seconda della stima di valore dell'investimento iniziale, del WACC e della crescita del prezzo di emissione dei CCC (Worst Case WC – Best Case BC). Lo studio, inoltre, raccoglie oltre 50 papers accademici e, attraverso interviste con esperti del settore e la pubblicazione di un questionario, ha approfondito gli effetti agronomici dell'utilizzo del biochar come ammendante agricolo e a quali condizioni questo possa divenire un reale prodotto sostituto all'interno delle prassi maggiormente diffuse per fertilizzare il suolo in Italia. A questo proposito sono state condotte analisi sulla willingness to pay dei consumatori finali italiani per verificare il mismatch di quest'ultima con il prezzo minimo di vendita del biochar che riesca a garantire performances finanziare progettuali adeguate. Per i casi brasiliani questo non è stato possibile a causa della mancanza di dati reperibili in letteratura sul mercato B2B/B2C di riferimento; pertanto, data la grande disponibilità di materia prima e la considerevole dimensione del terreno arabile di proprietà dei due potenziali fornitori di biomassa indicati dall'azienda italiana, si è assunto che le vendite di biochar avvengano grazie a canali privilegiati tra fornitori e produttore in un contesto di partnership *do ut des* concordate e regolate a priori. In ogni caso, è utile ricordare che, data l'impossibilità di stimare il tasso di penetrazione delle vendite di biochar nei mercati di riferimento B2B e B2C, si è assunto che la quantità di biochar prodotto durante l'anno rimasta invenduta sia nulla (nonostante siano state stanziate ingenti risorse per il marketing al fine di bilanciare la non realisticità di tale assunzione). Questo ha comportato una cospicua contrazione temporale del payback time influenzando positivamente i risultati in tutti gli scenari e, pertanto, si sono selezionati come "finanziariamente accettabili" tutti quegli scenari con IRRs maggiori del 45-50%. Gli effetti di scala diventano, quindi, essenziali, preferendo per entrambe le locazioni geografiche in esame, impianti con throughput produttivo maggiore.

1. Che cosa si intende per Biochar

Per biochar si intende un materiale di carbonio solido e stabilizzato ottenuto per degradazione termica di biomassa di origine vegetale (o animale), comunemente indicate come *biogenic matter*. Per migliaia di anni, il carbone è stato uno dei principali materiali utilizzati dalla civiltà umana, dall'utilizzo agronomico diffuso in Amazzonia tra le civiltà precolombiane [1] [2] o tra gli antichi agricoltori giapponesi che lo sfruttavano come ammendante pre-semina ("haigoe") [3], fino al suo sfruttamento come principale fonte energetica per alimentare le rivoluzioni industriali, oltre ad essere ampiamento sfruttato per cucinare e riscaldare gli ambienti domestici o di lavoro [4]. Tuttavia, divenendo protagonista del roboante progresso tecnico-industriale antropico, l'utilizzo alternativo del carbone nella prassi agricola ha subito una contrazione a tal punto da cadere in disuso. Le principali cause sono da annoverarsi nella generale propensione del settore agro-alimentare a sviluppare ed inseguire pratiche agricole focalizzate maggiormente sull'incremento della produttività piuttosto che sulla salute del terreno sfruttato. Solo all'esordire del XXI secolo, a causa della necessità di ripensare le tecniche agricole intensive altamente inquinanti, l'attenzione dei ricercatori e dei centri R&D privati è nuovamente ricaduta su quelle tecniche di risanamento ambientale (*precision farming*, *regenerative agricolture*, *Agricultural Land Management (ALM)*, …) in modo da limitare fenomeni quali acidificazione e demineralizzazione del suolo, desertificazione e uso di fertilizzanti chimici.

Il biochar viene prodotto mediante la pirolisi di biomassa, ovvero la combustione parziale di biomassa in un ambiente controllato a pressione negativa, in quasi totale assenza di ossigeno. La pirolisi rappresenta il più antico metodo noto di elaborazione termica della biomassa. L'uso della pirolisi risale almeno all'antico Egitto [5]. I biorifiuti provenienti dall'agricoltura, dall'industria alimentare e forestale sono le principali fonti di materia prima [3]. I substrati più popolari includono trucioli e residui della lavorazione del legno, potature arboree e/o agricole, bagassa, vinacce, scarti pressati delle lavorazioni agroalimentari dell'industria dell'olio e del succo, residui di colture e di primi trattamenti della materia prima agricola [6]. Inoltre, la biomassa selezionata in input può essere arricchita anche con biomasse diverse dalla materia lignocellulosica, come fanghi di depurazione, liquame o letame, ossa ed altri [7].

Nei prossimi sottoparagrafi si approfondiranno meglio le tipologie di produzione ad oggi maggiormente diffuse e come queste influenzino le caratteristiche fisico-chimiche del carbone vegetale così prodotto, in modo da poter meglio comprendere come quest'ultime determinino l'interazione del biochar con il suolo e i potenziali effetti che ne derivano.

2. Metodologie di produzione, dalla biomassa di scarto al prodotto finito

Come schematizzato in Fig. 1. a diverse metodologie di produzione corrispondono differenti biomasse organiche in input, poiché, a seconda della composizione chimica della biomassa di partenza o del prodotto finito desiderato muta il processo di conversione da adottare. La conversione termochimica può essere applicata a uno o più tipi di scarti:

- Forestali: materiale legnoso di scarto (residui del taglio), che possono essere cippati (macinati) sul posto o esboscati per essere venduti a centri di utilizzazione delle biomasse a fini energetici;
- Agricoli: residui delle lavorazioni agricole (potatura arborea, scarti di raccolto (paglia, foglie, steli, bucce, noccioli, …);
- Alimentari;
- Animali;
- Urbani (Municipal Solid Waste, MSW)

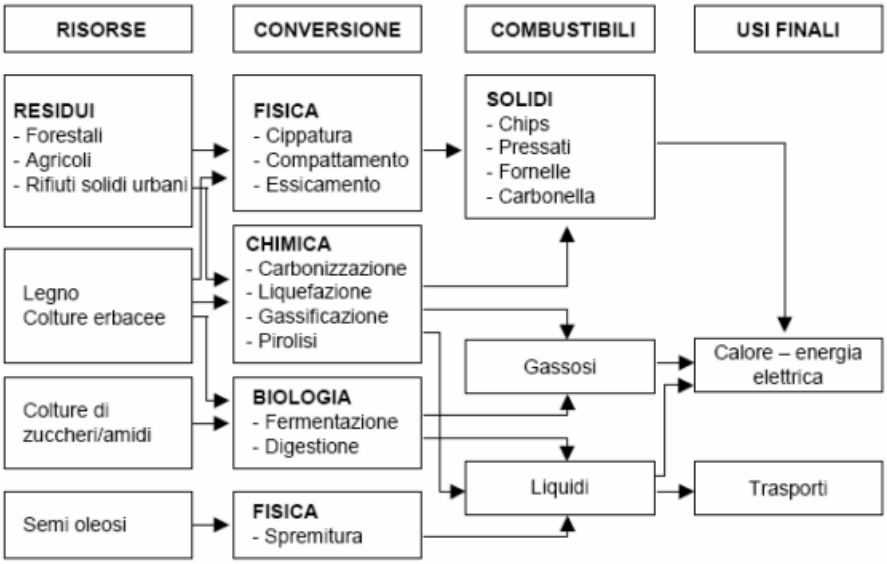


Figura 1. Schema di sintesi dei possibili percorsi di trasformazione della biomassa nelle filiere agroenergetiche [8].

Come ampiamente verificato e riportato in letteratura, variando calore, pressione dell'aria, tempi di permanenza della materia in input all'interno del reattore e i livelli di ossigeno presenti nel processo di reazione, l'output può essere composto da composti liquidi e/o gassosi e/o solidi con nuove proprietà [9]. Ogni processo termochimico si traduce in un diverso prodotto quando applicato a una diversa materia prima. L'output può essere costituito da una combinazione di tre categorie fondamentali a seconda della combinazione di materie prime e metodologie: gas, liquidi e prodotti solidi.

- Prodotti gassosi: il trattamento della biomassa di scarto genera prodotti in fase gassosa generalmente riconosciuti come gas di sintesi (o *syngas*[1]). Questi possono essere utilizzati direttamente per la produzione di calore per la cogenerazione di energia elettrica, oltre ad essere una potenziale fonte da cui ottenere idrogeno puro. Nel caso della pirolisi, se il reattore appartiene alla categoria dei *Combined Heat and Biochar (CHAB) system,* i syngas esalati possono essere catturati e veicolati nuovamente all'interno della camera di combustione al fine di sfruttare il loro potere calorifero per la degradazione termica della biomassa in input, così da limitare l'uso di combustibili fossili per alimentare la combustione stessa.
- Prodotti liquidi: i prodotti liquidi possono essere realizzati anche mediante conversione termochimica. Sia per la gassificazione, sia per la pirolisi, il conseguente l'upgrading catalitico dello scarto liquido permette di sintetizzare bio-olio (altresì chiamato *wood vinegar*) o bio-diesel. Allo stesso modo, si può effettuare l'upgrading del *syngas* per ottenere idrogeno puro.
- Prodotti solidi: questi sono composti principalmente da ceneri (se avviene combustione) e *char-coal.*

2.1. Classificazione dei processi di pirolisi

In questo elaborato verrà preso in esame il solo processo pirolitico e, allo stato dell'arte attuale, i reattori che permettono di raggiungere un volume produttivo tale da abbattere gli alti costi di installazione, gestione e manutenzione garantendone una sostenibilità economica adeguata risultano essere i pirolizzatori di media e grande scala ad alta tecnologia, in grado di:

- recuperare i gas di pirolisi (syngas) per alimentare il processo di combustione e mantenere la temperatura di pirolisi all'interno del reattore, limitando le emissioni di gas naturale in atmosfera e decurtare i costi di approvvigionamento dalla rete urbana;
- raggiungere un'efficienza termica pari almeno il 70%, al fine di riutilizzare il calore prodotto durante la produzione di biochar per creare vapore utile ad altri componenti atti alla sintetizzazione del bio-olio;
- depurare i gas esausti di produzione e monitorare il livello di emissioni prodotte. In tal senso, è necessaria la rimozione di SO2, NOx e CO2;
- registrare il carico di biomassa in input, lo stato del processo, la velocità e la temperatura di reazione e l'output generato attraverso un *IoT-based monitoring system*.

In un reattore completo e definibile CHAB, come si è detto in precedenza, i prodotti ottenuti tramite pirolisi sono sia gassosi, sia liquidi e sia solidi, in proporzioni che dipendono dai metodi di pirolisi (pirolisi veloce e pirolisi convenzionale) e dai parametri di reazione. Un pirolizzatore si differenzia da un gassificatore in quanto, lavorando in assenza di ossigeno (spesso si sfrutta un flusso caldo di un

[1] Il gas di sintesi, detto anche syngas (neologismo sincretico dall'inglese synthetic gas) indica una miscela di gas, essenzialmente monossido di carbonio (CO) e idrogeno (H2), con la presenza in quantità variabile anche di metano (CH4) e anidride carbonica (CO2).

gas inerte quale l'azoto), attua la pirolisi propriamente detta, mentre un gassificatore realizza anche una parziale ossidazione, lavorando in presenza di piccole quantità di ossigeno. La gassificazione, infatti, è un processo che può essere rappresentato come una via di mezzo tra la combustione (che avviene all'interno di un inceneritore o *kiln*) e la pirolisi.

Il processo di decomposizione termica per pirolisi di materiali organici in un ambiente privo di ossigeno avviene normalmente nell'intervallo di temperatura di 250 - 900 °C. Durante il processo, i componenti lignocellulosici come la cellulosa, l'emicellulosa e la lignina subiscono processi di reazione come la depolimerizzazione, la frammentazione e la reticolazione che portano a un diverso stato dei prodotti in output (syngas, bio-oli, biochar). La resa del biochar durante il processo di pirolisi dipende dal tipo e dalla natura della biomassa utilizzata e dalla temperatura di reazione, dove quest'ultima è il principale parametro del processo operativo che determina la resa ingegneristica dei vari sottoprodotti realizzati. Generalmente, all'aumento della temperatura di processo, la resa di biochar (in termini quantitativi) diminuisce mentre la produzione di syngas e bio-oil aumenta. La pirolisi può essere classificata come processo di pirolisi veloce e lento (metodi tradizionali) a seconda della velocità di riscaldamento, della temperatura, del tempo di permanenza della biomassa all'interno del reattore [10] [11] [12].

	Slow Pyrolysis	Fast Pyrolysis	Gasification
Pyrolysis temperature (°C)	250–750	550–1000	≥500
Heating rate (°C/s)	0.1–1	10–200	5–100
Feedstock particle size (mm)	5–50	≤1	0.2–10
Solid residence time	450–550 s up to days	0.5–10 s	≥1 h
Vapor residence time	5–30 min	~1 s	10–20 s
Biochar yield (%)	45–20	5–30	~5
Bio-oil yield (%)	40–50	50–75	~10
Syngas yield (%)	10–25	5–35	~85

Figura 2.Riepilogo delle caratteristiche di processo e dei prodotti generati [12].

2.1.1. Slow Pyrolysis

Come indica il nome, la pirolisi lenta richiede diverse ore per completare il processo anche se, grazie all'innovazione tecnologica dei reattori adottati, si è gradualmente incrementata la resa di biochar in contrasto con altre metodologie di pirolisi e carbonizzazione. Infatti, la pirolisi "convenzionale" produce biochar come prodotto principale (35-45%) e per questo è il processo designato come ottimale per intraprendere una produzione di biochar su medio-grande scala. Insieme al prodotto solido, il quantitativo di bio-olio raccolto può variare dal 25% al 35%, mentre il volume di syngas recuperabile si attesta dal 20% al 30% [13]. Il costo di tale impianto (Fig. 3) è di norma inferiore ai 500'000 $.

Le condizioni di pirolisi lenta sono descritte da:

i. Velocità di riscaldamento lenta (5-7 °C/min);
ii. Tempi di permanenza delle particelle di biomassa elevati (1-3 h);
iii. Temperatura di trattamento medie (300 - 600 °C).

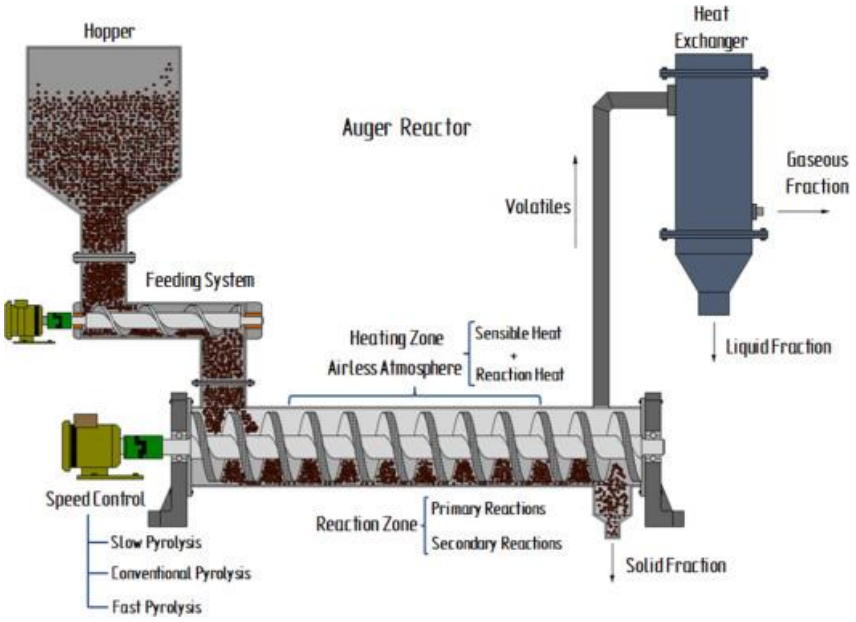


Figura 3. Rappresentazione grafica di un pirolizzatore meccanico a coclea continua [14].

2.1.2. Fast Pyrolysis

È considerata come la procedura termochimica ottimale per la produzione di bio-fuel poiché, date le alte temperature di combustione, è in grado di liquefare la biomassa solida in bio-olio liquido con un alto potenziale energetico. La resa del prodotto della pirolisi rapida è composta in media dal 60% di bio-olio, 20% di biochar e 20% di syngas. In generale, anche se questa metodologia

sembrerebbe maggiormente adatta alla produzione di bio-fuel, bisogna considerare che a maggiori temperature di processo aumenta proporzionalmente la "purezza" del biochar ottenuto e, pertanto, viene anche utilizzata per la produzione di biochar su larga scala [13]. Il costo di tale impianto è di norma superiore ai 500'000 $.

Le condizioni di pirolisi rapida sono descritte da:

i. ritmi di riscaldamento rapido delle particelle di biomassa (> 100-300 ° C / min);
ii. tempi brevi di permanenza delle particelle di biomassa e dei fumi di pirolisi (0,5-2 s);
iii. alte temperature di trattamento elevate (500-900 °C).

Per entrambi i processi di pirolisi, il reattore che viene generalmente utilizzato è il pirolizzatore a coclea continua o a vite (Fig. 3), dove quest'ultima è in grado di garantire un processo di combustione omogeneo per tutta la biomassa in input.

In generale i pirolizzatori di piccola scala (1-2 t/day di biomassa in input) possono costare da $150.000 fino a circa $300'000. Il prezzo di acquisto è fortemente legato alla scala produttiva che si vuole ottenere, partendo da $500'000 per impianti che riescono a processare 3-5 t/day di biomassa

in input fino a 5-10 mln$ per impianti di larga e larghissima scala (50-70 kt/day di biomassa in input) [15]. Ovviamente, i costi fissi e i costi di manutenzione (stimati in generale al 3-5% del costo iniziale di capitale) e gestione degli impianti sono inferiori e più gestibili rispetto alle unità di grandi dimensioni. Esistono in USA e Cina impianti che offrono alcuni vantaggi legati all'economia di scala che, però, vedono tali riduzioni di costo equiparate dai maggiori costi sostenuti sia per il trasporto dal fornitore all'impianto della biomassa da pirolizzare, sia per il trasporto del biochar al cliente finale. Ecco che la forte dipendenza dalla componente "regionale" dei costi di trasporto limita la profittabilità degli impianti di medio-grande scala i quali, invece, necessitano di aggredire un mercato con estensione geografica maggiore [16].

2.1.3. I nuovi paradigmi tecnologici della pirolisi

Durante gli ultimi anni sono emersi nuovi paradigmi tecnologici che hanno indotto a diverse modifiche e cambiamenti nei metodi di produzione del biochar. Si parla, infatti, di pirolisi moderna (flash pyrolysis), pirolisi sottovuoto, pirolisi a microonde, gassificazione, torrefazione, ecc. (come mostrato in Fig. 4). In generale, tutte le tecnologie di produzione di biochar hanno vantaggi e svantaggi in termini di efficienza, costo, scala e impatto ambientale. La scelta della tecnologia dipende dalle esigenze specifiche del produttore e dell'utilizzatore finale.

Sr. No.	Biochar production techniques	Biochar production conditions	Applications
Traditional approaches			
1	Early approach	Burning of biomass in a pit covered by soil to prevent oxygen supply. Burning of biomass in open space and covering half-burned biomass immediately with soil. Handmade reactors such as firebrick pits, clay burners, brick kilns, and iron retorts.	Soil amendment, Liquid product as preservation for dead bodies and meat, house painting, caulking of sealing wood barrels, ship-building and to attach arrowheads to spear shaft, etc.
2	Slow pyrolysis	Temperature: 300-600 °C; heating rate: 5 to 7 °C min^{-1}	Soil amendment, Bio-oil, Syngas as an energy fuel
3	Fast pyrolysis	Temperature: > 500 °C; heating rate: 300 °C min^{-1},	Adsorbent, Soil amendment, Bio-Oil, Syngas
Modern approaches			
4	Gasification	Temperature: > 700 °C with gasifying agents (steam)	Dye Removal, Adsorbent, Carbon Sequestration Soil Amendments, Syngas
5	Torrefaction	Temperature: 230-300 °C	Regarded as a pre-treatment step to improve the physical, chemical, and biochemical characteristics of raw biomass
6	Flash pyrolysis	Temperature: 900-1200 °C; heating rate: 800-1000 °C sec^{-1}	Soil amendment, Bio-Oil, Syngas
7	Vacuum pyrolysis	Pressure: 0.05-0.20 MPa; temperature: 450-600 °C; heating rate: 300 min^{-1}	High porosity biochar, Adsorption of mineral, Soil amendment
8	Hydrothermal carbonization	Pressure: 2 to 10 MPa and temperature: 220 to 240 °C	Retention of nutrients High calorific value, Better grindability, Improved hydrophobicity
9	Microwave pyrolysis	Temperature: 450-800 °C; microwave power: 400-600 W and microwave frequency: 2450 MHz	Soil amendment, Bio-Oil, Syngas
10	Electro-modified biochar	Current supply: 0-100 V and 0-12 A for 5 min; pyrolysis temperature: 400- 500 °C; heating rate: 5 °C min^{-1} in the absence of oxygen	Adsorbent of pollutant, Adsorption of nutrient
11	Magnetic biochar	Temperature: 450- 1000 °C; material soaked with a solution of Fe_2O_3, $FeSO_4.7H_2O$, or $FeCl_3.6H_2O$ before pyrolysis	Adsorbent of pollutant, Adsorption of nutrient

Figura 4. Sintesi dei processi di pirolisi attualmente in fase di studio. Table 3 Biochar production using different traditional and modern approache [13].

- Combustione in forni (farm *kilns*)

  La kiln technology rappresenta tutte quelle tecniche di produzione che non sono progredite in modo significativo per secoli, tranne che per l'uso di forni invece di cumuli di terra. I forni per produrre il carbone sono costruiti con terra, mattoni e, in alcuni casi, con l'aggiunta di acciaio. Questa pratica è maggiormente diffusa in paesi in via di sviluppo e per produzioni locali dato il basso costo di realizzazione dell'impianto stesso (<$5000), dove la necessità di smaltire piccole quantità di biomassa è maggiormente rilevante rispetto alla reale produzione di biochar. I c.d. *kiln* non possiedono alcun sistema IoT centralizzato né di controllo dei fumi esalati dal processo di combustione e, pertanto, emettono grand quantità di particolato e gas nocivi [17].

- Pyrolysis/Gasification System (PGS)

  Il sistema PGS combina la pirolisi e la gassificazione in un unico processo. Il sistema è composto da due parti: un reattore di pirolisi e un reattore di gassificazione. La biomassa viene immessa nel reattore di pirolisi dove viene riscaldata a una temperatura tra 300°C e 600°C in un ambiente privo (o quasi) di ossigeno dove avviene il processo di pirolisi e la materia organica si carbonizza. Il biochar così realizzato viene poi trasferito al reattore di gassificazione, dove viene convertito in gas sintetico. Il sistema PGS ha il vantaggio di utilizzare meno energia rispetto ad altre tecnologie di pirolisi, in quanto il gas sintetico prodotto può essere utilizzato per generare energia. Inoltre, il sistema PGS può essere utilizzato per produrre sia biochar, sia gas sintetico, il che lo rende flessibile dal punto di vista produttivo. Tuttavia, il sistema è ancora in fase di sviluppo e alcun prototipo è ancora stato ampiamente utilizzato su scala industriale.

- Torrefazione

  La torrefazione è un processo in cui la biomassa viene riscaldata a pressione negativa fino a delle temperature comprese tra i 200 e i 300 °C. In questo processo, la biomassa subisce una trasformazione chimica che la rende più idrofoba e resistente alla decomposizione biologica. Anche se con temperature più basse e un tasso di carbonizzazione inferiore, la composizione chimico-fisica del biochar prodotto è simile a quello della pirolisi. La torrefazione è meno efficiente della pirolisi in termini di produzione di biochar, poiché solo una parte della biomassa viene convertita in carbone. Tuttavia, questo processo ha un vantaggio non trascurabile: richiede meno energia e non necessita di impianti grandi e complessi per essere portato a termine, il che la rende più accessibile a comunità locali e agricoltori.

- Gassificazione

  La gassificazione è un processo termochimico in cui la biomassa viene convertita in un gas sintetico (syngas) mediante una reazione di ossidazione parziale. Il gas sintetico può essere utilizzato per la produzione di energia termica, elettrica o di carburanti, ma può anche essere riutilizzato come fonte combustibile per alimentare la combustione di pirolisi. Il processo di gassificazione richiede una temperatura di 700-900 °C, che è superiore a quella richiesta per la pirolisi. Inoltre, richiede un'atmosfera controllata, in cui la quantità di aria o ossigeno è limitata, ma non completamente assente come nella pirolisi. La gassificazione ha il vantaggio

di produrre sia biochar che energia, ma richiede investimenti significativi per la costruzione di grandi impianti e la messa a punto della tecnologia.

- Idrotermia

  L'idrotermia è una tecnologia emergente per la produzione di biochar che utilizza acqua e pressione in un reattore a temperatura elevata per convertire la biomassa in carbone. Il processo avviene a temperature comprese tra 200-300 °C e pressioni tra 10-30 MPa. L'idrotermia ha il vantaggio di produrre biochar a elevata purezza e con un alto contenuto di carbonio, oltre a una soluzione liquida di acidi organici che può essere utilizzata come fertilizzante. Tuttavia, il processo è ancora in fase di sviluppo e non è ancora stato ampiamente testato su scala commerciale

3. Composizione chimico-fisica ed interazione con il suolo

Comunemente riconosciuto come metodologia *C-sink* per sequestrare e stoccare il carbonio all'interno di una struttura stabile e duratura nel tempo, il biochar (o agro-char) può considerarsi un prodotto dotato da un insieme unico di caratteristiche fisico-strutturali e chimiche, le quali dipendono fortemente dalla diversità delle biomasse d'origine e dalle tecnologie di trattamento.

Considerando il solo processo di pirolisi lenta, quest'ultimo si svolge in tre fasi [18] come sintetizzato in Fig. 5:

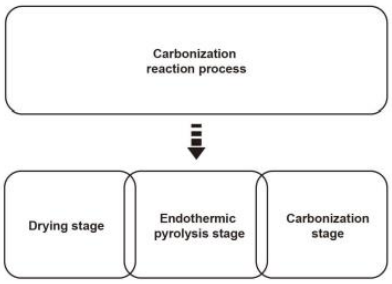


Figura 5. Concettualizzazione delle tre fasi caratterizzanti il processi di pirolisi.
Fonte: Beston Group Ltd.

1. Pre-pirolisi: è la prima fase che porta la biomassa organica in input dalla temperatura ambiente a 200 °C grazie ad un essiccatore (*dryer*), processo a cui è attribuito l'evaporazione dell'umidità e dei volatili leggeri. L'essicazione causa la rottura dei legami e la formazione di idroperossido, gruppi –COOH e –CO [3] [19].
2. Pirolisi principale: grazie alla seconda fase, la biomassa si porta alla temperatura desiderata di processo (450-600 °C) dove si ha una volatilizzazione e decomposizione dell'emicellulosa e della cellulosa [3].
3. Formazione del prodotto carbonioso, ovvero, la degradazione della lignina e di altre sostanze organiche a temperature di oltre 500 °C [19]. La temperatura di pirolisi è fortemente correlata ai cambiamenti nella struttura e nelle proprietà fisico-chimiche del biochar [20] [21] [22] [23], nonché ha una forte influenza sulle proprietà fisico-chimiche come pH (il quale può variare da 6.5 a 10.8), superficie e gruppi funzionali, dal momento che una temperatura di pirolisi più elevata comporta un aumento dell'area superficiale, delle frazioni carbonizzate, del pH e della sostanza volatile presente a processo terminato. Questo determina direttamente gli effetti che il biochar induce nel terreno quando applicato come ammendante agricolo [23].

È stato scoperto che l'aumento della temperatura di pirolisi causa cambiamenti nella porosità superficiale del biochar aumentandone progressivamente l'area [24] [25] [26] [27]. Ciò è probabilmente dovuto alla decomposizione della materia organica che viene rilasciata sottoforma di materia volatile, creando più pori [28] [29]. Ghani et al. (2013) hanno dimostrato che a temperature più basse (inferiori a 500 °C), la lignina non viene convertita in un idrofobo idrocarburo policiclico

aromatico (PAH) e il biochar diventa più idrofilico, mentre a temperature superiori i 650 °C, il biochar è termicamente stabile e diventa idrofobo [27].

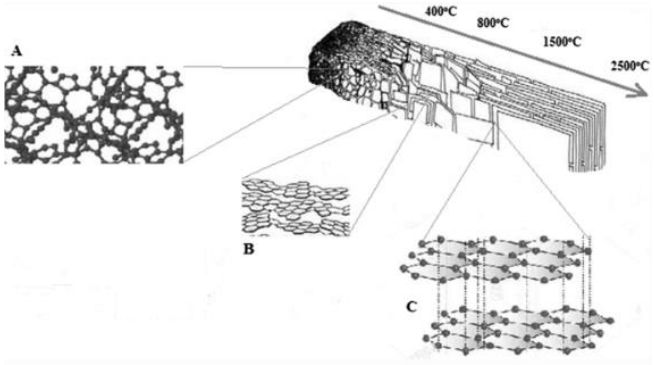


Figura 6. Effetto della temperatura di pirolisi sul biochar: A. carbonio amorfo; B. carbonio turbostatico; C. grafite [3].

L'effetto della temperatura sulla struttura e sui gruppi funzionali del biochar è mostrato nella Fig. 6. Il biochar prodotto a temperature elevate (600-700 °C) presenta una natura altamente idrofobica con strati di C ben organizzati simil-grafene [30]. Tuttavia, è caratterizzato da contenuti inferiori di gruppi funzionali contenenti H e O a causa della disidratazione e della deossigenazione della biomassa [30] [31]. Rafiq et al. (2016) hanno verificato che l'aumento della temperatura di pirolisi ha causato un aumento del 5,7-18,7% del contenuto di cenere causato probabilmente dalla progressiva concentrazione di costituenti inorganici e di residui di combustione di materia organica [32] [33] [34].

Le proprietà fisico-chimiche del biochar sono fondamentali nella determinazione degli effetti che esso induce nel suolo; generalmente, quando usato come ammendante dei suoli, il biochar ne migliora la qualità agendo sulla struttura del terreno e modificandone la densità, agendo al tempo stesso come equilibratore del pH e come facilitatore dello scambio cationico. La composizione finale del biochar risulta in una frazione in forma di pulviscolo inorganico (viene persa in poche settimane), un'altra in forma labile (lentamente mineralizzata nel corso degli anni) mentre la restante in forma stabile la quale permane nel suolo per centinaia di anni; nella stragrande maggioranza dei casi, il 90% del carbonio presente nel biochar prodotto da biomassa vegetale è in forma stabile [35]. Shariff et al. (2016) e molti altri ricercatori hanno osservato che le variazioni del componente lignocellulosico nella materia prima influenzano la formazione di carbone [36] [37]. Ciò indica che la presenza di carbonio in forma stabile aumenterà con l'aumento del contenuto di lignina nella materia prima [36] [38] spiegando, infatti, il perché il biochar prodotto da biomassa legnosa spesso ha un contenuto più elevato di carbonio stabile rispetto a quello prodotto da biomassa di specie erbacee o a prato [39] [40].

In altre parole, la produzione di biochar è riconosciuta come una *carbon sequestration* methodology proprio perché dilata considerevolmente il lasso temporale necessario al carbonio pirolizzato per riconvertirsi in stato gassoso. Se da una parte il tempo medio di conversione totale del carbonio contenuto all'interno della biomassa originale è di un paio di anni circa, quello del carbonio fissato tramite pirolisi è di migliaia di anni. Come illustrato in Fig. 7, la linea spessa rappresenta la velocità di decadimento del carbonio per la biomassa non lavorata (la quale contiene fino al 90% di C labile), mentre le linee sottili rappresentano differenti ritmi di decadimento del carbonio contenuto in biomassa pirolizzata a seconda della presenza di C labile (10%-50% di C labile). Le perdite di carbonio

per pirolisi sono in media di circa il 68% ad alta temperatura e il 30% a bassa temperatura, a seconda della materia prima e delle condizioni di produzione [15].

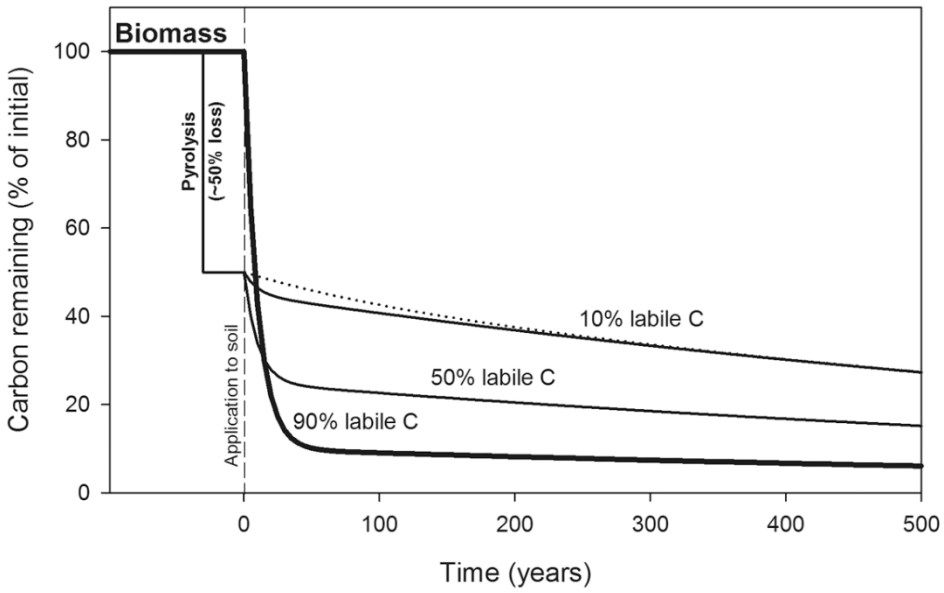


Figura 7. Modello illustrativo del decadimento di carbonio utilizzando un modello di decadimento con un MRT di 10 anni per il pool C labile e 1000 anni per il pool C stabile. Analisi su biochar contenente proporzioni diverse di C labile [4].

Essendo biologicamente recalcitrante, diversi studi inerenti alle metodologie di *regenerative agriculture* hanno evidenziato un netto potenziamento della biomassa microbica presente nei suoli, principale fautrice dell'assorbimento di sostanze nutritive da parte della vegetazione presente sul terreno. Nonostante la gamma di effetti positivi che il biochar sembra avere sulla fertilità/salute dei suoli, il dosaggio durante la sua applicazione sembra essere il punctum dolens di tale metodologia: un sovradosaggio di bio-charcoal potrebbe infatti indurre flessioni negative sulla resa agricola delle colture trattate, il che obbliga la redazione di analisi approfondite sulla composizione chimico-fisica sia del biochar, sia del suolo in modo tale da poterne simulare l'interazione e prevederne il corretto dosaggio.

L'apporto di biochar, dunque, può influenzare in modo sostanziale il sistema-suolo nelle sue proprietà fisico-chimiche, alterandone in maggior specie la tessitura, la struttura, la porosità e la consistenza (grandezza e distribuzione dei pori, densità e impaccamento). Grazie ad una macroporosità elevata delle strutture a nido d'ape (di 10µm), il biochar può effettivamente facilitare le funzioni vitali del suolo come l'aerazione, la ritenzione idrica, la crescita e il movimento radicale (proprio quest'ultime condizionano la produttività delle colture). In ogni caso, l'assenza di progetti monitorati per un lasso temporale superiore a quindici anni circa non permette all'attuale stato dell'arte di esporre chiare evidenze quantitative sui reali effetti di medio-lungo termine di tale metodologia [41].

Come sintetizzato in Fig. 8, i principali effetti il biochar produce sono:

- Essendo una fonte di carbonio ricalcitrante e stabile si ha un diretto aumento della frazione di Carbonio Organico del Suolo (SOC) mentre la parte volatile viene dissipata dagli eventi atmosferici.

- Non è ancora stato dimostrato con evidenze scientifiche se la presenza di biochar nel suolo possa o meno influenzare la presenza di Carbonio Inorganico del Suolo (SIC), anche se alcuni studi preliminari mostrano di come il biochar aumenti la riserva di SIC sia direttamente, sia indirettamente.
- Il biochar tende a rendere i suoli più scuri e, quindi, a ridurre l'albedo superficiale, ovvero decurta considerevolmente il potere riflettente del terreno, anche se la presenza di un manto vegetale o nevoso può attenuare questo effetto.
- Riduzione delle emissioni del suolo, ad esempio, N2O, CH4 , NOx , e NH3.
- Aumento della ritenzione idrica e dell'immediata disponibilità di acqua da parte delle piante
- Influenza positiva o negativa sull'evapotraspirazione in coltura a seconda delle condizioni del suolo e del clima, la quale a sua volta può aumentare o diminuire l'efficienza d'uso dell'acqua da parte delle piante. Quando non sono presenti colture, ovvero si dice che il terreno e "a riposo", il biochar tende a ridurre l'evaporazione; tuttavia, sono necessarie maggiori evidenze asupporto di tale teoria.
- Produttività primaria netta (NPP): il biochar ha effetti misti sulla NPP a seconda delle condizioni del suolo; l'aumento della NPP fissa più carbonio nella vegetazione, aumentando i residui organici nel sottosuolo (letto radicale), i quali innalzano il livello di SOC presente.

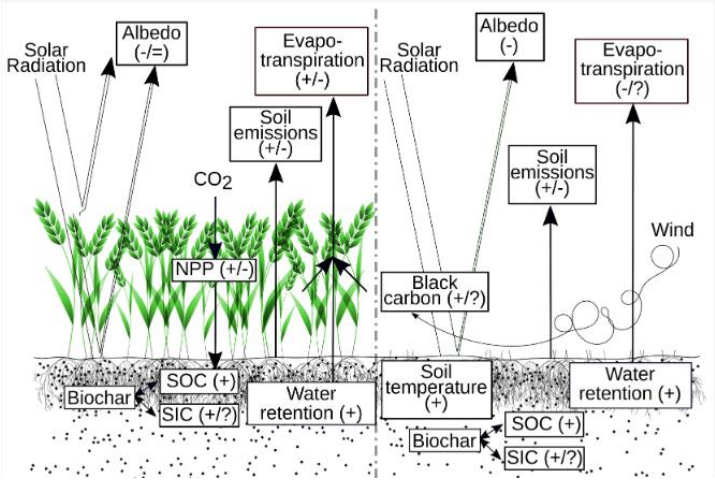


Figura 8. Raffigurazione grafica degli effetti del biochar sul clima nelle condizioni di campo coltivato (sinistra) o in riposo (destra). I segni tra parentesi indicano l'effetto del biochar sulla variabile rispetto al controllo senza biochar: (+) aumentato, (−) diminuito, (=) invariato, (?) [42].

Inoltre:

- Aumento della resa agricola: in uno studio pubblicato da Jeffery et al. (2011), è stato dimostrato che l'aggiunta di biochar in agricoltura può aumentare la produttività agricola. Gli autori hanno esaminato l'impatto del biochar su diversi tipi di suoli e diversi tipi di colture, e hanno scoperto che l'aggiunta dell'ammendante nero ha avuto un effetto positivo sulla struttura del suolo, sulla capacità di immagazzinamento dei nutrienti e sulla crescita delle piante [43].

- Riduzione dell'eutrofizzazione delle acque e capacità filtranti: Winsley et al. (2011) hanno scoperto che il biochar si comporta come un depuratore e può assorbire le sostanze

inquinanti presenti nell'acqua come i metalli pesanti; di conseguenza, aiuta a ridurre l'eutrofizzazione delle acque quando investite da eccessivi apporti di sostanze ad effetto fertilizzante (azoto, fosforo ed altre sostanze fitostimolanti) [44].

- Riduzioni delle emissioni di gas serra: molti autori presenti in letteratura hanno esaminato l'impatto del biochar sulla qualità del suolo e sulle emissioni di gas serra. Tutti hanno dimostrato che l'aggiunta di biochar al suolo può migliorare la qualità del suolo e ridurre le emissioni di gas serra attraverso il sequestro del carbonio (soprattutto N20 e CH4) [43] [42].

- La riduzione dell'uso dei fertilizzanti è stata dimostrata ma necessita ancora di diversi studi per poter divenire evidenza scientifica. La complessità nelle misurazioni e nell'ampiezza del numero di variabili da tener in conto, tutt'oggi rendono quest'evento di difficile valutazione quantitativa.

- Aumentando la ritenzione idrica del suolo, oltre a contrastare il processo di desertificazione oggi in atto nella maggior parte delle pianure sfruttate per l'agricoltura intensiva, riduce la resistenza del terreno quando arato con un conseguente risparmio di combustibili fossili [45].

Centinaia di *papers* e ricerche accademiche incentrate sull'estrapolazione del Biochar Life Cycle Assessment (LCA) hanno dimostrato i seguenti effetti, riportati in Fig. 9 in pagina seguente.

Parameter	Typical Assumption
Biochar stability	15/85%, 20/80%, or 30/70% fraction of labile/recalcitrant fractions in biochar
	Remaining carbon in biochar after 100 year in soils: 68%
Reduced fertilizer use	Nitrogen: 7.2–10% and up to 25–30% reduction
	Phophorus: 5–7.2% reduction
	Potassium: 5–7.2% reduction
Reduced soil N_2O emissions	15 to 50% reduction in soil N_2O emissions; some studies model the transient effect of biochar on soil N_2O emissions; reduction of N_2O emission via reduced application of N fertilizer
Changes in soil CH_4 emissions/uptake	20% reduction in soil CH_4 emissions in paddy rice field; reduced upland soil methane sink by 0–50%
Effect on SOC	Changes in SOC through increase in NPP (5–10% increase) and negative priming on native SOC (5–10% decrease in decomposition rate); sensitivity analysis on SOC change from −12 to +21%
	Additional sequestration of 4 tC/ha over 30 years, 3.4 tC/ha over 25 years
Soil leaching	Reduced heavy metal leaching from soils
Functional unit	CO_2eq/kg feedstock
	CO_2eq/kg biochar
	CO_2eq/kg food produced
Biochar's yield effect	Modeled via the functional unit: increased yield lowers the yield-scaled GHG emissions intensity of food production
	Reduced fertilizer input for similar crop yield
	Increased NPP lead to more biomass output for biochar production or increases SOC
Pyrolysis coproduct treatment	Substitution; coproducts displace other products; associated burdens are substracted: electricity, residential, or industrial heat; various waste treatment options; cooking fuel
	Allocation, burden/benefits distributed across coproducts by mass, energy, or economic allocation
	Not treated; they are assumed to be outside system boundaries and to provide neither positive substitution effects nor burden

Figura 9. Riepilogo dei pricipali effetti misurati in seguito all'applicazione di biochar come ammendante agricolo [42].

4. Analisi generale del mercato Biochar e delle potenziali applicazioni

Come mostrato in Fig. 10 e riassunto da Kathleen Draper (2016) nel suo articolo *The Biochar Displacement Strategy* pubblicato all'interno del *Biochar Journal*[2], il biochar non è usato solo come ammendante dei suoli (*in-soil application*), ma può essere usato anche per molti altri scopi (attraverso *non-soil application*) legati, ad esempio, alla veterinaria (come additivo negli alimenti per animali) [46], all'edilizia (come materiale additivo o isolante) [47] [48] e alla decontaminazione ambientale (filtro per la purificazione dell'aria, delle acque o dei suoli). In quest'ottica, sono presenti numerosi progetti di ricerca in corso su come il biochar può essere utilizzato per la depurazione delle acque reflue, la rimozione di metalli pesanti e altre applicazioni ambientali. Ad oggi, viene impiegato anche per scopi maggiormente tecnologici inerenti alla produzione di supercondensatori o pseudocondensatori[3] per l'accumulo di energia elettrica (fuel cell) [49], anche se questi mercati sono ancora in fase embrionale di ricerca [50] [51].

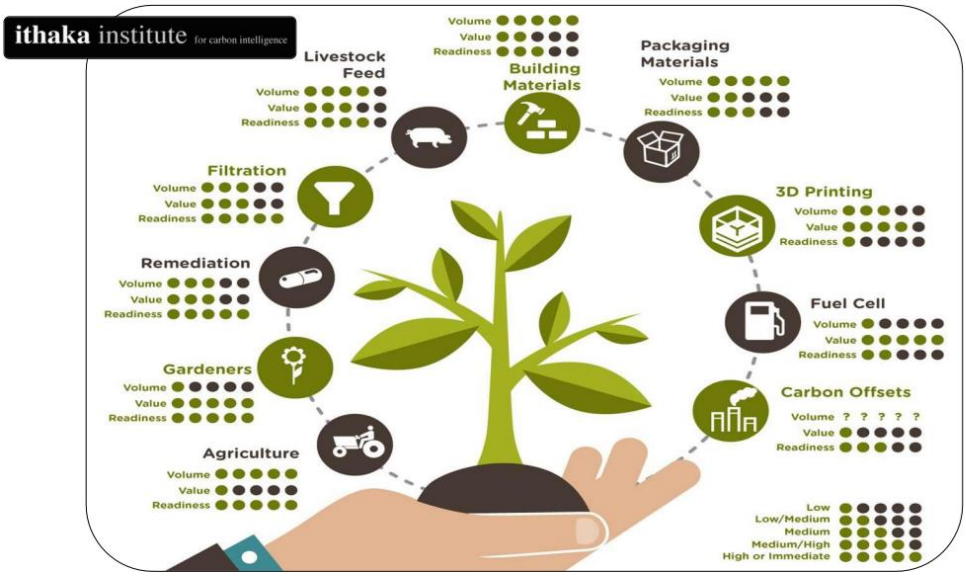


Figura 10. Infografica relativa ai potenziali usi del biochar per settori di applicazione [50].

Anche Thengane S. K. et al. (2021), cinque anni dopo le pubblicazioni di Kathleen Draper (2016), confermano questa tendenza complessiva all'*exploration* dell'intera industria di biochar (la Fig. 11 mostra i mercati più redditivi per il prossimo triennio 2021-2024), anche se osservando i volumi applicati, i settori maggiormente maturi sembrerebbe comunque appartenere al mercato B2B agricolo e a quello B2C (*home gardeners*, hobbisti, orticoltori) [52].

[2] Disponibile al link: https://www.biochar-journal.org/en/ct/85.
[3] Il biochar è agevola il processo di ossidoriduzione;

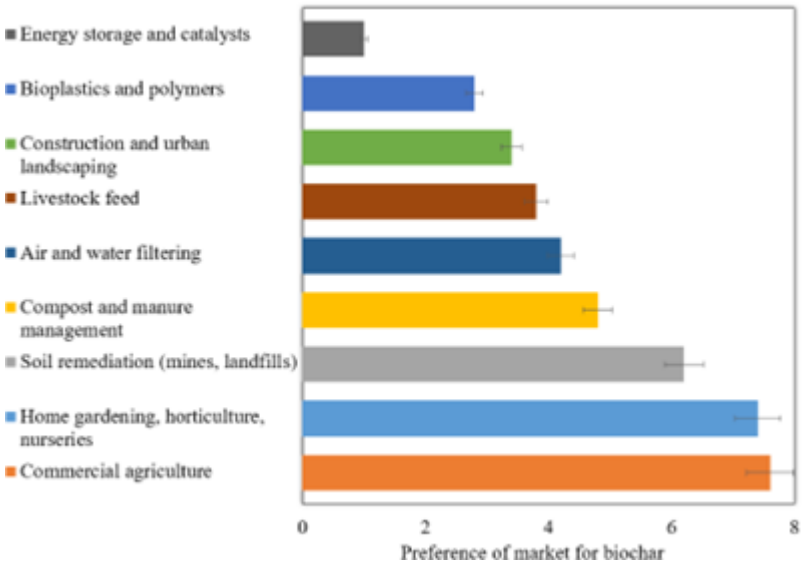


Figura 11. Classifica dei vari settori di mercato/applicazione per il biochar nei prossimi 3 anni (sull'asse X un valore più alto indica il mercato più preferito e un valore più basso indica il mercato meno preferito) [52].

4.1. Diffusione tecnologica e stato dell'arte della ricerca

Per quanto concerne la tecnologia di produzione del biochar, è divenuta prassi integrare i pirolizzatori ad altri moduli creando così i c.d. *Combined Heat and Biochar (CHAB) Systems* in grado di garantire una cogenerazione di calore e/o elettricità utilizzabile durante l'operazione stessa di tostatura della biomassa in input.

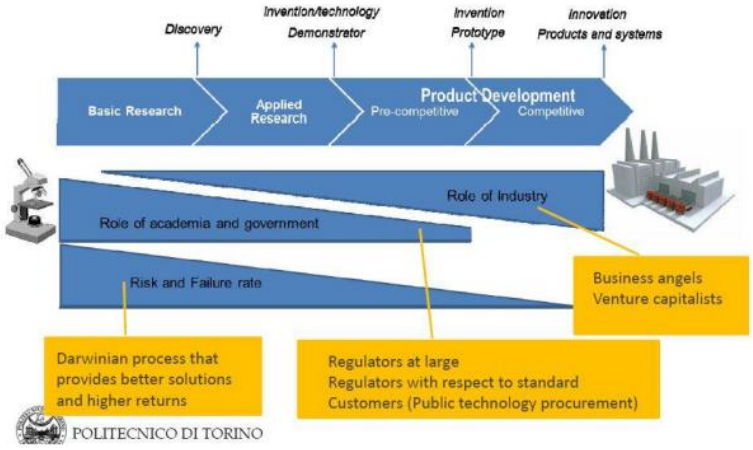


Figura 12. Concettualizzazione del modello lineare di innovazione.
Fonte: Politecnico di Torino.

Con riferimento al modello lineare dell'innovazione (Fig. 12), l'appartenenza a questa o quella fase innovativa per la tecnologia CHAB sembrerebbe dipendere dalla locazione geografica del mercato di appartenenza; se da una parte il mercato statunitense e il mercato cinese rappresentano le forze di punta per la produzione di biochar, non si può dire altrettanto di quello europeo, russo, sud-est asiatico e sudamericano. In USA e Cina, al momento, gli high-technology pyrolysis reactors si attestano nel pieno della loro fase precompetitiva, dove i prototipi fin qui sviluppati hanno dato ottime risposte in termini di efficienza termica/energetica e di resa produttiva, mentre alcune aziende commercializzano già da alcuni anni impianti simili. In egual maniera, per quanto concerne la loro diffusione, essa non sta avvenendo in maniera omogenea in quanto il mercato statunitense e quello asiatico registrano volumi produttivi sempre maggiori rispetto agli altri mercati di riferimento. In questo senso, a guidare la diffusione sono ancora gli *Innovators* (< 2,5% della gaussiana del modello lineare di difussione) che assieme alla ricerca universitaria e dei centri R&D privati collaborano allo studio di tale metodologia produttiva (come mostrato in Fig. 13, l'aumento esponenziale del numero di pubblicazioni è sintomo della sinergia tra ricerca e produttori per sviluppare reattori sempre più performanti). Non essendo ancora la pirolizzazione di biomassa in fase competitiva, non esistono *standard* produttivi o metodologici in quanto si parla di *tailored-production plants,* ovvero, di reattori progettati e assemblati a seconda delle esigenze espresse dal cliente stesso.

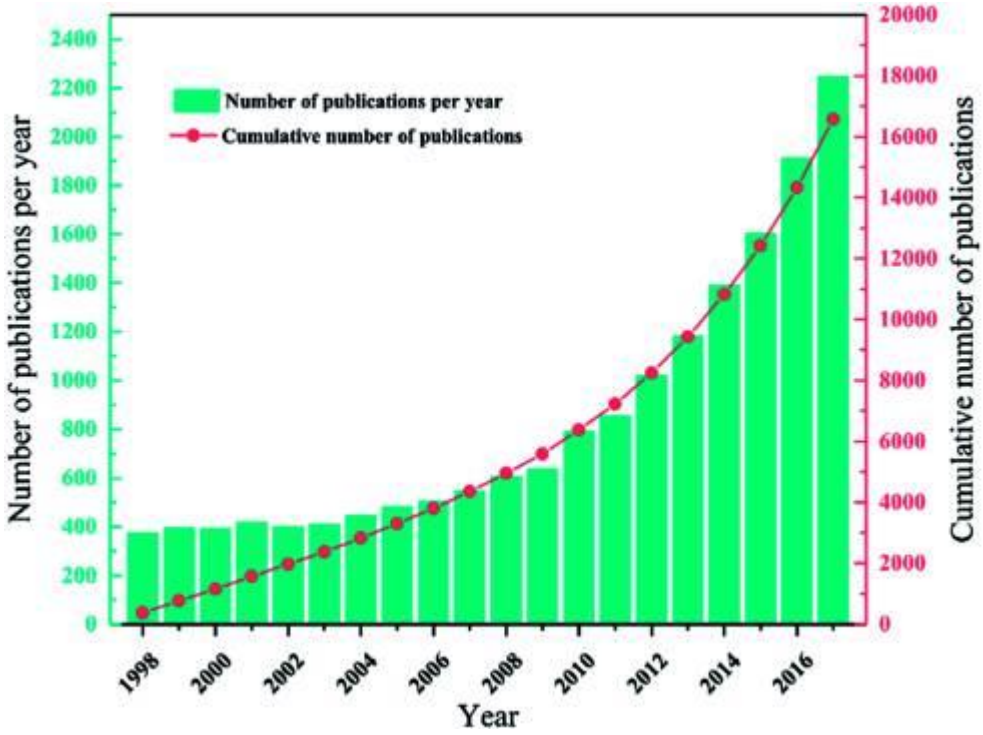


Figura 13. Numero di pubblicazioni scientifiche worldwide che contengono la parola "biochar" [53].

Con particolare focus al mercato europeo, anche il Vecchio Continente risulta *in-trend* con i *first mover markets,* poiché il numero di pubblicazioni segue l'andamento esponenziale del numero registrato su scala globale (Fig. 13).

In Fig. 14, invece, l'*European Biochar Market Report 2022/2023* pubblicato dall'European Biochar Industry (EBI) riportata i key players dell'industria europea di biochar, dove sono presenti sia le imprese di servizio alla produzione come ad esempio Carbonfuture, Carbon Standards e South Pole, sia le imprese fornitrici di pirolizzatori (Pyro Core, Carboforce, AquaGreen, VOW, Pyreg, ecc..) e sia le imprese attive che dispongono di pirolizzatori (Made of Air, Mash Makes, Carbuna, ecc..). Tutti gli esperimenti vengono condotti sia in colture in campo sia nel settore vivaistico e/o della serricoltura per rilevare l'effetto del biochar sulla fertilità del suolo e sulla resa agricola delle colture ispezionate, nonché per valutare gli impatti ambientali derivanti dalla sua applicazione metodica. L'obiettivo di ricerca è massimizzare le performaces ingegneristiche degli impianti come quantificare il reale contributo di tali metodologie di *regenerative agriculture* nella mitigazione del cambiamento climatico, al fine di rendere tali pratiche economicamente sostenibili su scala industriale [54].

Figura 14. Mappa raffigurante i key players dell'industria europea di biochar [54].

Alla fine del 2022, il numero cumulato di impianti di produzione in Europa è cresciuto fino a 130 e per la fine del 2023 le stime indicano che si possa arrivare a 180 (Fig. 15) dal momento che molti altri progetti (alcuni di essi dotati di grande scala) sono in fase avanzata sia nel processo di pianificazione e autorizzazione, sia nella messa in servizio. Tale crescita esponenziale denota un CAGR di circa il 60-80% nella capacità produttiva installata seguita da un proprio e vero boom economico. La distribuzione di tali progetto su suole europeo, però, è tutt'altro che omogenea poiché sono le nazioni nordiche a trainare l'industria come sotto raffigurato [54].

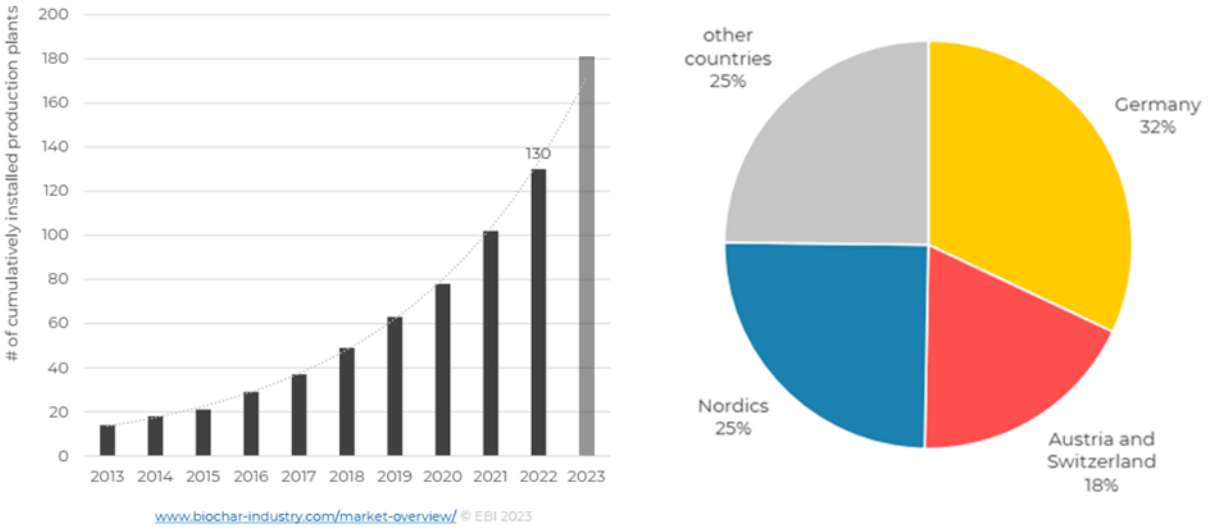


Figura 15. Numero cumulato di impianti produttivi biochar installati in EU (dx) e loro distribuzione geografica (sx) [54].

Essendo un'industria emergente con applicazioni in diversi settori, c'è la necessità di sviluppare mercati, politiche ed ecosistemi appropriati. L'international Biochar Initiative (IBI), fondata nel 2006, ha lavorato per creare *standards* metodologici e *best practices* a supporto dell'industria nascente, includendo anche un sistema di certificazione progettato per delineare un futuro trasparente e sostenibile per il biochar [55]. A partire dal 2015, l'iniziativa ha collaborato con 326 aziende rispetto alle 175 del 2013, mostrando un rapido aumento della partecipazione all'iniziativa. Relativamente al mercato statunitense, invece la US Biochar Initiative (USBI), fondata nel 2009, sta lavorando parallelamente all'IBI pur mantenendo un focus specifico sull'America del Nord.

Nel 2014 sono state censite all'incirca 150 aziende, per lo più piccoli rivenditori di forniture per giardini e specializzati attivi come *B2C sellers*, mentre solo alcune imprese vendono biochar su larga scala in tutto il mondo (Fig. 16) [56]. Nonostante la datazione di tale infografica, si è scelto comunque di riportarla poiché rappresentativa ancora oggi della distribuzione della produzione di biochar ad eccezione dell'Europa che nell'ultimo decennio ha visto una forte crescita del mercato biochar. Dunque, è chiaro di come ci siano forti opportunità emergenti, sospinte soprattutto dall'evoluzione dei mercati della CO2 e la nascita di politiche fiscali pressanti sulla tassazione proporzionale sulle emissioni annuali prodotte, ma in generale il mercato è ancora in fase embrionale con una produzione limitata e costi elevati [57].

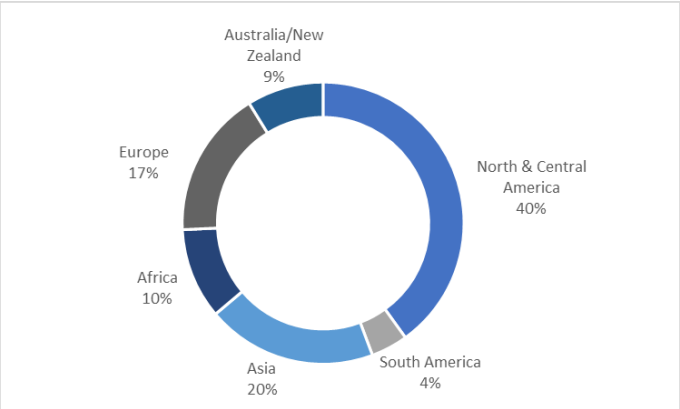


Figura 16. Distribuzione della produzione di biochar per paese d'origine nel 2014 [56].

In accordo alle analisi riportate su *Fortune Business Insights* e *Global Industry Analysts*, Inc. (GIA), si prevede che il mercato globale del biochar crescerà da 164,5 mln $ nel 2021 a 365 mln $ entro il 2028 con un CAGR medio del 12,1-12,6% nel periodo di previsione, tendenza inversa alla contrazione del -7,7% subita dal settore nel 2020 dovuta al *demand shock* causato dalla pandemia COVID-19 [58].

4.2. Ecosistema produttivo e supply chain

All'interno della ricerca *Market prospects for biochar production and application in California* (2021), promossa dalla Society of Chemical Industry and John Wiley & Sons, Ltd e Biofuels, Bioprod. Bioref., Sonal K. Thengane et al. hanno riportato un'analisi dettagliata dello stato dell'arte in cui versa l'industria californiana del biochar, regione che ospita uno dei mercati maggiormente fiorenti del settore e, pertanto, utile come benchmark nonostante le ampie diversità con i mercati europei maggiormente frammentati. Da una recente analisi di 100 start-up da parte di CB Insights, la principale ragione del fallimento della maggior parte delle start-up è la mancanza di domanda e di come quest'ultima faccia ancora fatica a comprendere i benefici legati all'applicazione di biochar in agricoltura [52]. Lo studio è stato condotto seguendo la teoria di Diffusione delle Innovazioni di Roger e sul sistema di innovazione tecnologica dell'energia come mostrato di Fig. 17 [59] [60].

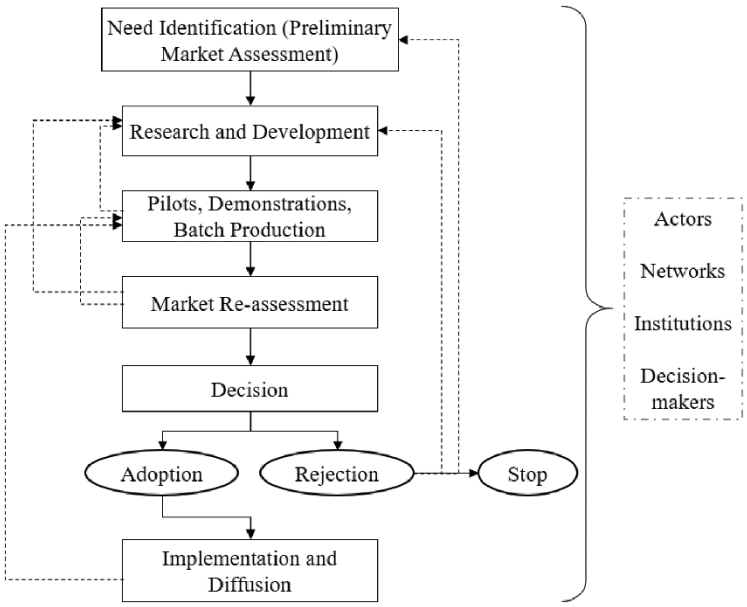


Figura 17. Concettualizzazione del modello di Diffusione di Roger [52].

Tuttavia, la maggior parte degli altri settori concorrenziali possiedono ecosistemi consolidati e paradigmi tecnologici stabile e difficili da scardinare come, ad esempio, quello dei prodotti agronomici di derivazione dalla raffinazione dei combustibili fossili oppure dei prodotti concorrenti come i fertilizzanti sintetici, il compost non biologico e la pacciamatura in serra. L'adattamento al biochar richiederà non solo un cambiamento delle attuali configurazioni di paradigma tecnologico ed informativo ma soprattutto un mutamento radicale nelle attitudini dei consumatori e dei principali *policymakers*, dai quali dipenderà fortemente il peso dei costi a monte e a valle che dovranno sostenere gli attori in gioco, produttori e non. Recentemente, si discute molto dei premi finanziari per i crediti di carbonio ottenuti grazie al biochar, il che richiede interventi politici appropriati e strategie per lo sviluppo del mercato. Secondo l'approccio proposto, gli sforzi di ricerca per lo sviluppo della tecnologia produttiva per il biochar dovrebbero iniziare solo se la valutazione preliminare del mercato regionale identifica particolari *needs* lato domanda dal momento che il tasso di fallimento si mantiene su livelli oltre la norma. In questo senso, per guidare lo sviluppo industriale nelle fasi iniziali della commercializzazione del prodotto in esame, tutti gli stakeholder interessati (finanziatori esterni, *policymakers*, fornitori di biomasse, produttori e potenziali acquirenti) dovrebbero adoperare uno sforzo combinato poiché la sinergia così ottenuta da alleanze *pre-competitive* dimostrano business di maggiore solidità [61]. Per l'industria del biochar, gli stakeholders lato offerta includono sviluppatori di tecnologia produttiva, produttori, distributori di biochar, agenzie governative e ricercatori. Lato domanda, invece, sono presenti agricoltori, serricoltori, vivaisti, *forestry owners*, orticoltori, cultori dell'*home gardening* (hobbisti).

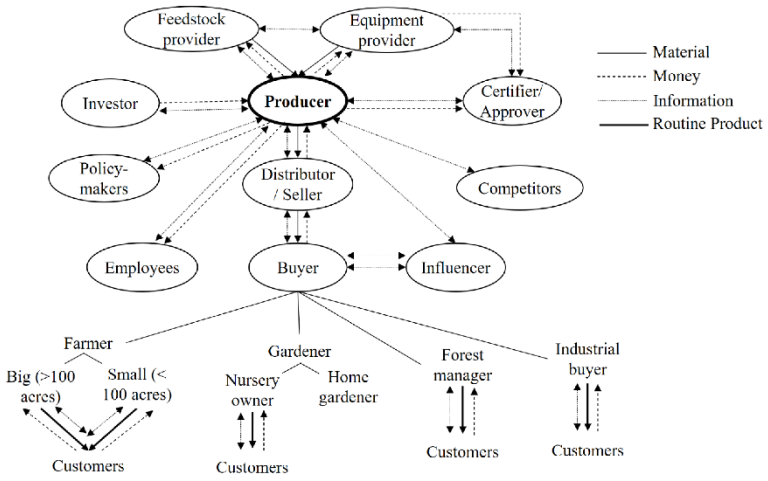


Figura 18. Concettualizzazione della supply chain lagata alla produzione e commercializzazione del biochar [52].

In Fig. 18 viene mostrato l'ecosistema-tipo legato alla catena del valore del biochar, che consiste in una serie di stakeholder che vanno dagli investitori ai compratori. Questo è un ecosistema di esempio che mostra il flusso o lo scambio di denaro, materiale e informativo tra i diversi stakeholder collegati al produttore dell'ammendante [52].

4.3. Market Barriers

Per quanto concerne l'analisi delle barriere all'ingresso, la ricerca sopra citata *Market prospects for biochar production and application in California* (2021), promossa dalla Society of Chemical Industry and John Wiley & Sons, Ltd e Biofuels, Bioprod. Bioref., Sonal ha realizzato un *focus group* intervistando più di venti produttori californiani di biochar e altrettanti esperti del settore con l'obiettivo di elencare e classificare quali barriere all'entrata impediscono oggi una maturazione completa del settore [52].

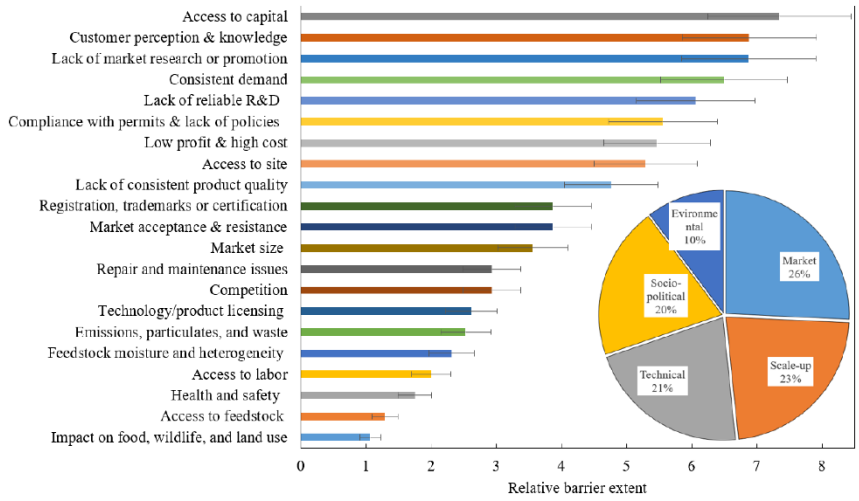


Figura 19. Estensioni relative dei diversi fattori che si presentano come ostacoli in base alle risposte raccolte (l''asse X con un valore più alto indica un ostacolo maggiore e un valore più basso indica un ostacolo minore) [52].

In Fig. 19, la distribuzione delle principali *biochar market barriers* sembrerebbe omogenea per categoria analizzata (tecnologiche, socio-politiche, business scalability, forze di mercato e ambientali). Tra la barriere più rilevanti lato offerta, l'accesso al capitale per l'investimento iniziale o per il mantenimento dell'impianto di produzione è il maggior ostacolo indicato dalla maggioranza dei produttori, seguito dai fattori di mercato e di domanda. Raggruppando le barriere individuate in diverse categorie, l'ordine di rilevanza che si ottiene rispetta il seguente ordine (anche se le entità classificate risultano interdipendenti l'una con le altre):

1. Barriere dovute alle configurazioni di mercato, alla mancanza di ricerca applicata e condivisa, di licenze di tecnologia/prodotto, di *quality standards* (la disponibilità variabile e l'eterogeneità delle biomasse organiche in input possono rendere complesso mantenere standard qualitativi di produzione), di promozione da parte degli enti regolatori (incentivi pubblici).
2. Barriere dovute ad una difficile scalabilità del business a causa della forte regionalità (gli alti costi di trasporto non rendono, ad esempio, profittevole l'investimento).
3. Barriere dovute all'aspetto economico-tecnologico, dove gli alti costi impongono ai produttori un aumento dei prezzi che si traduce direttamente in bassi profitti poiché le tariffe di acquisto applicato risultano essere uno dei principali *demand driver*.
4. Barriere socio-politiche che individuano nella domanda una scarsa attenzione ai temi di innovazione, causata principalmente da percezioni e conoscenze distorte degli utilizzatori; inoltre, i produttori esprimono difficoltà nel rispettare le politiche, le normative e i requisiti di certificazione, nonché aleggia preoccupazione per l'elevata incertezza e frammentarietà delle regolamentazioni sull'emissione dei crediti di carbonio generati dalla produzione e dall'utilizzo del biochar (anche qui, non esiste uno standard internazionale). In questo senso, l'ottenimento di ricompense finanziarie per i crediti di carbonio aumenterebbe i profitti e motiverebbe i produttori a scalare le loro strutture e ad espandere ulteriormente il mercato del biochar.
5. Barriere classificate come ambientali che vedono nell'ancora scarsa evidenza e promozione scientifica degli effetti reali dell'applicazione agricola del biochar.

4.4. Analisi dei prezzi di mercato e della customers' willingness to pay

Come si è potuto evincere dai precedenti paragrafi, allo stato attuale dell'arte non esiste un *market assesment* puntuale. I principali studi reperibili in letteratura si concentrano per i mercati maggiormente maturi (americano ed australiano), stimando che all'ingrosso il prezzo minimo di vendita del biochar sia nella fascia di \$150-\$600 t^{-1} (in riferimento al solo mercato nordamericano) [62], anche se i prezzi di mercato medi per il biochar variano da \$600-\$1.300 t^{-1} [63], in netta diminuzione rispetto al prezzo medio di \$2.850 t^{-1} registrato nel 2013 [64][4]. Questi prezzi, inoltre, potrebbero subire una leggera contrazione se la vendita avviene all'ingrosso rivolta al mercato B2B.

Come sostenuto da Dumortier et al. (2020), invece, i prezzi del biochar dipendono fortemente dalla scala produttiva dell'impianto adottato, il che comporta un'incertezza [65]. Calcolare la *customers' willingness to pay* (*wtp*) esprime d'altrocanto il vantaggio di offrire un *benchmark* di riferimento più consistente in quanto è la domanda aggredibile a determinare la resilienza dei business ad oggi presenti. Dumortier et al. calcolano la wtp degli agricoltori come la differenza tra il *Net Present Value* (NPV) derivato dall'investimento agricolo con e senza l'applicazione di biochar, ovvero, in base all'aumento previsto della resa agricola attesa (cioè rispetto al ritorno dell'investimento atteso dall'acquirente finale), supponendo un tasso di applicazione di biochar di 5 t ha^{-1} al primo anno. L'aumento della resa agricola è minore quando il biochar applicato è prodotto da biomasse con bassa resa ingegneristica di carbonio (sfalci, paglia o graminacee) rispetto a biomassa con più alta concentrazione di carbonio (residui di taglio, potature arboree, ecc..)[5]. La wtp è stata quantificata rispetto a due scenari di resa monetaria di vendita delle sei colture prese in esame come mostrato in Fig. 20 [66].

Table 2: Lowest and highest commodity prices (2017 \$ t^{-1}) observed between 1996 and 2017. Source: USDA NASS Quickstats

Commodity	Corn	Peanuts	Rice	Sorghum	Soybeans	Wheat
low	96.85	427.80	109.16	79.30	225.29	134.42
high	280.34	800.26	363.04	233.27	549.20	335.50

Figura 20. Campione di ricavi low-high medi [\$ t^{-1}] per sei differenti colture in Nordamerica [66].

I ricercatori hanno stimano che il 5% delle terre coltivate su suolo nordamericano per le sei colture analizzate sarebbe ammendato con biochar se quest'ultimo venisse venduto per un intervallo di prezzo pari a \$238-\$265 t^{-1} (nel caso di bassi prezzi di vendita a tonnellata delle sei colture) e di \$665-\$747 t^{-1} (in caso di alti prezzi). Per ottenere una copertura del 25% delle terre coltivate,

[4] Disponibile al link: https://biocharinternational.org/commercialization/.

[5] L'Interazioni complesse tra colture, caratteristiche del suolo e clima hanno causato significative variazioni nelle stime delle risposte di resa alle applicazioni di biochar (Biederman e Harpole, 2013). Crane-Droesch et al. (2013) hanno condotto una meta-analisi utilizzando un database di 40 studi pubblicati per determinare l'effetto delle applicazioni di biochar sulla produttività delle colture. L'analisi condotta da Dumortier et al. (2020), invece, si basa sul lavoro di Dokoohaki et al. (2019) che hanno aggiunto ulteriori 63 studi pubblicati dopo il 2013 al database esistente di Crane-Droesch et al. (2013).

invece, i prezzi del biochar dovrebbero diminuire a \$146-\$169 t^{-1} e a \$395-\$453 t^{-1} rispettivamente (Fig. 21). In entrambi gli scenari-obiettivo di frazione di terreno ammendato (5%, 25%), la differenza tra la wtp lower bound per low price crops e la wtp upper bound per high price crops si attesta intorno al 270% [66].

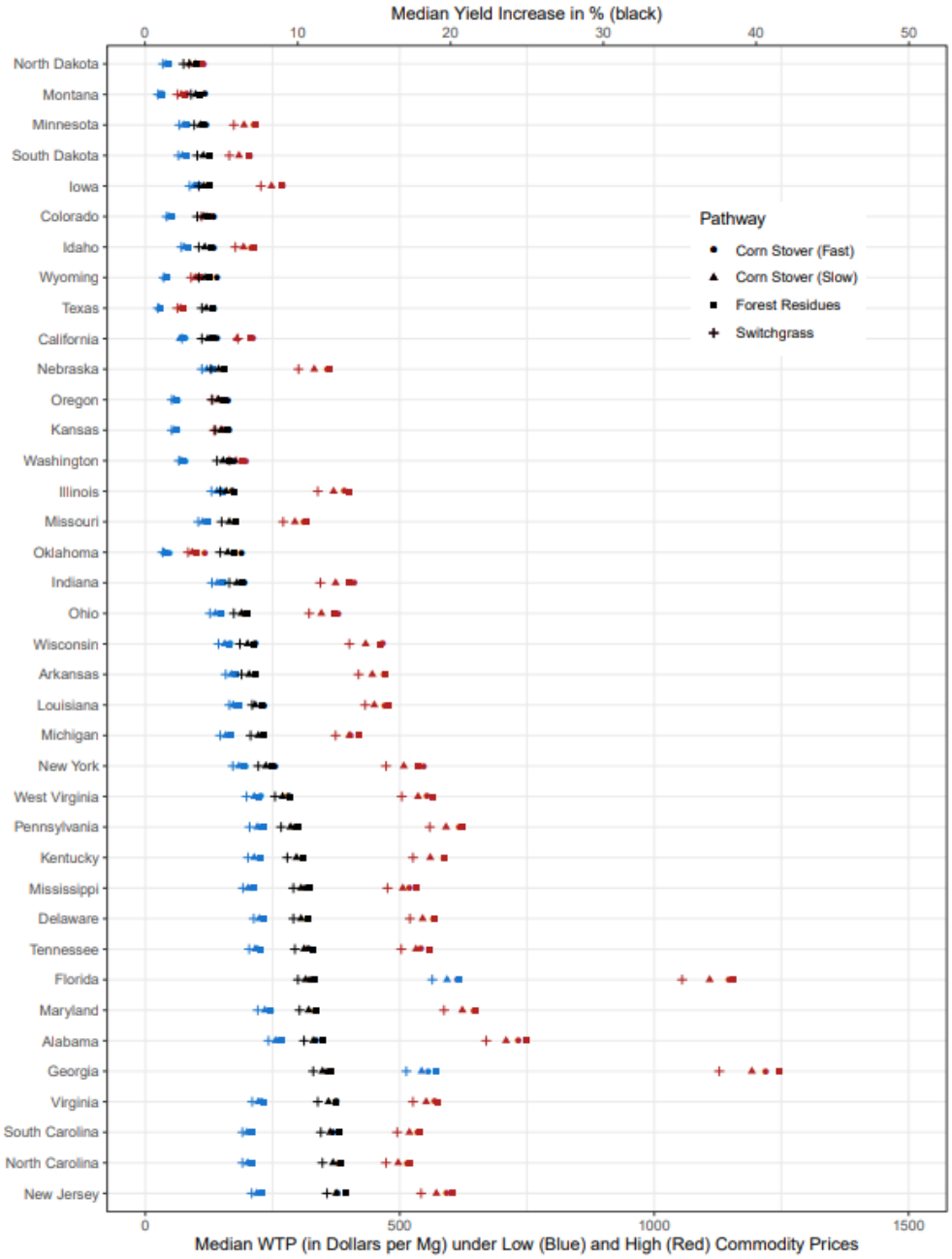


Figura 21. Risulti dell'analisi della wtp media riportata da Dumotier J. et al. (2020) [66].

Riassumendo i prezzi reperiti in letteratura:

- \$600-\$1.300 t^{-1}, [63];
- \$238-\$265 t^{-1} , per colture a bassa redditività [66];
- \$665-\$747 t^{-1}, per colture ad alta redditività [66].

Ipotizzando un match perfetto tra il prezzo di vendita del biochar adottato dai produttori nordamericani e la wtp espressa dagli agricoltori, le tariffe di vendita di biochar applicabili ad imprese agricole con alta redditività sembrerebbero economicamente ragionevoli poiché, a seconda della tecnologia e del throughput produttivo dell'impianto, i costi operativi per la produzione di biochar variano da \$ 200-\$ 1.000 t^{-1}, con una media di circa \$400 t^{-1} per la maggior parte dei produttori (in riferimento al mercato californiano) [62] [67], senza contare la potenziale copertura dei costi di produzione derivanti dall'incasso dei crediti di carbonio [56] [52], i quali dovrebbero compensare almeno in parte i costi di produzione del biochar per un valore di \$193-\$234 t^{-1} di biochar.

5. Verra e i programmi di Carbon Crediting

Se i primi quattro capitoli di questa ricerca si sono concentrati sulle tecnologie di produzione, sull'analisi fisico-chimica e dell'interazione con il suolo che ne deriva e sull'osservazione delle principali dinamiche del mercato biochar, questo capitoli si occuperà di fornire una più chiara visione sulle modalità di certificazione ed emissioni di Crediti di Compensazione del Carbonio (CCC)[6] sui principali Voluntary Carbon Markets (VCM) al fine di garantire un secondo afflusso monetario positivo ad un eventuale progettualità come potrebbe essere la produzione di carbone vegetale tramite pirolizzazione di biomasse agricole di scarto, per altro, oggetto di discussione di questa tesi. Come osservato nel paragrafo 4.4, *Analisi dei prezzi di mercato e della customers' willingness to pay,* il mismatch tra prezzo di offerta e wtp della domanda è ancora troppo vario per poter garantire ad un eventuale produzione di biochar una profittabilità costante e duratura per l'intero ciclo di vita di un reattore-tipo. Oltre a questo, l'intero capitolo 4 mostra come il mercato di riferimento sia ancora in fase embrionale, gli incentivi statali ancora timidi e le barriere di mercato ancora troppo imponenti, sia lato domanda, sia lato offerta. In questo senso, perciò, si vuole condurre un'analisi su quali effetti comporterebbe l'ipotetica registrazione del progetto tramite un ente certificatore riconosciuto internazionalmente come Verra con l'obiettivo di analizzare il possibile impatto economico dell'emissione (e vendita) dei crediti di carbonio. Il biochar, inoltre, si conferma un'ottima pratica per stoccare CO2 dall'atmosfera come spiegato nel capitolo 3 e quindi garantire un quantitativo economicamente interessante di CCC.

Verra è un'organizzazione no-profit che si occupa di gestire crediti di compensazione al carbonio, permettendo alle aziende di acquistare crediti per bilanciare le loro emissioni di CO2, essendo essa stessa coinvolta nel VCM, un mercato in cui le aziende possono acquistare crediti di compensazione al carbonio da progetti che riducono le emissioni di CO2 o assorbono CO2 dall'atmosfera. Nella gestione dei crediti di compensazione, Verra ha sviluppato una serie di metodologie per quantificare le reali tonnellate di GHG sequestrati, tra cui la metodologia *VM0044* il cui scopo è quello di regolamentare la produzione di biochar e definire un processo di certificazione a cui i project proponets devono obbligatoriamente far fede[7].

5.1. VM0044: methodology for biochar utilization in soil and non-soil applications

Tale metodologia è stata ideata e creata da Verra in collaborazione con Biochar Works, Delaney Forestry Services, Forliance e South Pole, enti ed imprese il cui scopo è quello di formulare iniziative volte alla decarbonizzazione delle economie. La VM0044 è stata formulate sulla base delle seguenti normative emanate durante il Protocollo di Kyoto (e seguenti COP) dall'UNFCCC:

[6] Con il termine "credito di compensazione del carbonio" (CCC) si indica un'unità di carattere finanziario che corrisponde all' eliminazione di una tonnellata di CO2 equivalente dall'atmosfera. Il credito rappresenta le emissioni di CO2 o altri gas climalteranti, quali metano o N2O, che sono state evitate o sequestrate attraverso un progetto specifico. I CCC non sono da confondersi con i crediti di carbonio o carbon credits/carbon allowances, che corrispondono al permesso di emettere una tonnellata di CO2 equivalente in un sistema regolamentato quale un Emission Trading Scheme (ETS).

[7] Disponibile al link: https://verra.org/wp-content/uploads/2022/10/VM0044-Methodology-for-Biochar-v1.00.pdf.

- Clean Development Mechanism (2007) Small-Scale Methodology AMS-III.L: Avoidance of methane production from biomass decay through controlled pyrolysis, version 2.0[8].
- Clean Development Mechanism (2014) Small-Scale Methodology AMS-III.E: Avoidance of methane production from decay of biomass through controlled combustion, gasification or mechanical/thermal treatment, version 17.0[9].
- Clean Development Mechanism (2014) Small-Scale Methodology AMS-III.BG: Emission reduction through sustainable charcoal production and consumption, version 3.0[10].
- Clean Development Mechanism (2006) EB23 Annex 18: Definition of Renewable Biomass[11].

Inoltre, sono state avvisate della formulazione di tale metodologia le seguenti organizzazioni:

- European Biochar Certificate (EBC)
- International Biochar Initiative (IBI)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

Come definite nell'*Appendix 1 Eligible Afolu Project Categories*[12] del documento *Verified Carbon Standard methodologies* emanato da Verra il 20 gennaio 2022, la produzione di biochar rientra nella categoria Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) projects, più precisamente come Improved Cropland Management (ICM) dal momento che l'applicazione come ammendante agricolo riduce direttamente le emissioni nette di GHG dei terreni coltivati aumentando il carbon stock nel suolo, riducendo inoltre le emissioni di N2O e di CH4.

Il documento prevede che l'attività del progetto deve installare e far funzionare un nuovo impianto di produzione di biochar (o più impianti) dove il promotore del progetto deve obbligatoriamente (a) procurarsi biomassa di rifiuto, (b) produrre il biochar e (c) garantire che il biochar sia effettivamente utilizzato. La tipologia di applicazione può essere in-soil o non-soil e, dato che il fine ultimo di questo documento è fornire un'analisi circa la profittabilità di un impianto produttivo di biochar da sfruttare come ammendante agricolo, si prenderà in considerazione solo la prima. Il Verified Carbon Unit (VCU), ovvero un CCC di Verra, verrà emesse se e solo se sia verificata l'effettiva applicazione idonea del prodotto finito.

Inoltre, le attività del progetto devono soddisfare le seguenti condizioni (project boundaries) riportate nei prossimi sotto-paragrafi [68].

5.1.1. Ambito tecnologico

1. La metodologia è applicabile quando il biochar è prodotto da biomassa di rifiuto idonea attraverso un processo termochimico come la pirolisi, la gassificazione o le caldaie a biomassa, mentre la torrefazione e la carbonizzazione idrotermica sono esclusi da questa metodologia.

[8] Disponibile al link: https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/72XV0Z89701S2D87UBPFD57WE5AFP5.
[9] Disponibile al link: https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/AZB89EQ3FIRUIN1Q80MS80RXCLA2TS.
[10] Disponibile al link: https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/S4V8CI7HHKADRWTLKZO6CRK3LHAGEQ.
[11] Disponibile al link: https://cdm.unfccc.int/EB/023/eb23_repan18.pdf.
[12] Disponibile al link: https://verra.org/wp-content/uploads/2022/01/VCS-Methodology-Requirements_v4.1.pdf.

5.1.2. Biomassa elegibile e termini di produzione

La materia prima utilizzata per produrre biochar deve soddisfare tutte le seguenti condizioni per essere idonea:

2. La materia prima deve essere costituita esclusivamente da biomassa di rifiuto biogenica e non coltivata appositamente.
3. La materia prima è elegibile solo e soltanto se, in assenza del progetto, sarebbe stata destinata a decadere o ad essere bruciata per scopi diversi dalla produzione di energia.
4. La materia prima non deve essere stata importata da altri paesi. La biomassa di scarto utilizzata come materia prima e il biochar derivante possono essere trasportati via nave, barca e veicoli diversi dal trasporto su strada fino a una distanza di 200 km. Tuttavia, deve essere trasportato solo su strada per distanze superiori a 200 km, come definito nella *CDM Tool 12: Project and leakage emissions from road transportation of freight*[13].
5. La biomassa di origine non deve presentare contaminanti dannosi per la salute. Il produttore di biochar deve presentare test di laboratorio.

5.1.3. Biochar e criteri di applicazione

6. Il biochar è idoneo ad essere utilizzato e conteggiato nella metodologia se viene utilizzato entro un anno dalla sua produzione.
7. Il biochar è idoneo ad essere utilizzato come emendante del suolo su terreni diversi dalle zone umide (aree fluviali, aree paludose, ecc..). I tipi di terreni idonei includono i terreni coltivati, i pascoli e le foreste. Il biochar può essere applicato sia in superficie che in profondità nel suolo. Per l'applicazione in superficie, il biochar deve essere mescolato con altri substrati. Per l'applicazione in profondità, invece, il biochar può essere applicato come unico emendante del suolo. Per qualsiasi applicazione del suolo, il biochar deve rispettare standard qualitativi per evitare il rischio di trasferire metalli pesanti e contaminanti organici indesiderati nel suolo.

Questa metodologia non è applicabile nelle seguenti condizioni:

8. La metodologia non può ritenersi applicabile se il biochar viene utilizzato per scopi energetici, bruciato come combustibile o utilizzato in altre applicazioni in cui non è possibile dimostrare che il biochar sia un long-term C-sink. La permanenza attraverso l'utilizzo idoneo deve pertanto essere documentata e registrata.

5.1.4. Addizionalità

Un'attività di progetto si afferma come addizionale se può essere dimostrata che la sua realizzazione si traduce in riduzioni delle emissioni superiori a quanto si otterrebbe in uno scenario "business-as-usual", ovvero rispetto al caso in cui il progetto non sarebbe venuto in essere e in assenza dell'incentivo fornito dai mercati del carbonio.

[13] Disponibile al link: https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-12-v1.pdf/history_view.

L'addizionalità è una caratteristica importante dei crediti GHG, compresi i VCU, perché se verificata ed accertata garantisce che la riduzione di GHG è effettivamente un beneficio ambientale netto e, quindi, si può progredire nella trasmutazione di tali riduzioni in titoli di carbonio sul VCM. Le metodologie stabiliscono una procedura per dimostrare l'addizionalità utilizzando standard quantitativi dimostrati.

- Regolatory Surplus: il progetto non deve essere imposto da alcuna legge, statuto o altro quadro normativo, sia esso stato emanato da entità nazionali o enti sovranazionali (come UNFCCC)

- Implementation Barriers: il progetto deve accusare alcune difficoltà applicative come:

    - Investment Barriers: il progetto deve affrontare limiti di capitale o rendimento dell'investimento, limiti che possono essere superati con i ricavi aggiuntivi ottenibili dalla vendita di crediti GHG.
    - Technology Barriers : il progetto deve affrontare ostacoli legati alla tecnologia alla sua attuazione.
    - Institutional Barriers: il progetto deve affrontare limiti finanziaria (diversi da quelli identificati nel primo punto di questo elenco come, ad esempio, l'assenza di incentivi statali), barriere organizzative, culturali o sociali smorzabili dall'afflusso economico positivo derivante dalla vendita di VCU.

- Il progetto deve dimostrare di non ricadere nella categoria "common practice projects", ovvero che non sia l'alternativa più economicamente vantaggiosa fra quelle esistenti e che non sia economicamente sostenibile senza l'indotto generato dalla conseguente creazione dei VCU connessi al progetto.

5.1.5. GHG emission removals accounting

Dal momento che si vuole proporre un progetto che sfrutti per la produzione di biochar un impianto definibile altamente tecnologico poiché implica una combustione post-pirolisi come l'incanalamento dei gas attraverso un postcombustore (per controllare la produzione di CO2 e CH4), la reiniezione di gas nel sistema di pirolisi per aumentare l'efficienza di produzione, verranno prese in considerazioni sole le parti del framework di calcolo per le rimozioni di GHG confacenti a tale tecnologia.

Il calcolo delle rimozioni di carbonio effettive viene sotto categorizzato per ogni fase del processo come segue:

- la fase di approvvigionamento, in cui la biomassa di scarto viene prelevata e raccolta e trasportata al reattore, di norma prossime allo zero come riportano le assunzioni descritte nel documento.

- La fase di produzione, durante la quale viene preparata la biomassa di scarto per poi essere convertita termochimicamente in biochar.

- La fase di applicazione, in cui il biochar viene applicato nel suolo.

Il conteggio delle tonnellate nette di CO2 sequestrate si basa sui seguenti documenti:

- CDM (2017) Methodological Tool 03: Tool to calculate project or leakage CO2 emissions from fossil fuel combustion, version 03.0[14].

- CDM (2017) Methodological Tool 05: Baseline, project and/or leakage emissions from electricity consumption and monitoring of electricity generation, version 03.0[15].

- CDM (2012) Methodological Tool 12: Project and leakage emissions from transportation of freight, version 01.1.0[16]

- CDM (2017) Methodological Tool 16: Project and leakage emissions from biomass, version 04.0[17].

Tale modello verrà applicato sperimentalmente nel Cap 10.8 al fine di quantificare effettivamente le tonnellate di CO2e sequestrate dalla proposta di progetto.

5.1.6. Monitoring e risk assessment

L'obiettivo principale del monitoraggio è dimostrare l'effettiva applicazione finale di biochar, riportando con precisione il bilancio di emissioni risultanti dallo scenario di progetto durante tutto il di osservazione in esame (ovvero l'intera vita utile del progetto, in quanto la documentazione di monitoring va presentata al pervenire di date condizioni o su base periodica da sancire con l'ente certificatore, di norma coincidente con il periodo di emissione annuale dei crediti). Il project proponent deve stabilire e applicare tutte le procedure di gestione dei dati e delle informazioni indicate nella guida, definendo a priori le metodologie da esso messe in pratica e riportare, per ogni fase di misurazione, tutte le rilevazioni dei parametri utili alla verifica della consistenza del progetto alle norme della guida (ad esempio, massa del biochar prodotto, temperature di reazione, moisture content della biomassa in input e del biochar realizzato, residence time, risultati dei test in laboratorio sulla composizione delle biomasse utilizzate e del biochar ottenuto e così via). Il proponente del progetto deve sviluppare e applicare un piano di monitoraggio secondo la norma UNI EN ISO 14064-2:2019 *Gas ad effetto serra - Parte 2: Specifiche e guida, al livello di progetto, per la quantificazione, il monitoraggio e la rendicontazione delle emissioni di gas ad effetto serra o dell'aumento della loro rimozione*[18].

Tutta la documentazione verrà verifica da parte di Verra. In questa fase, viene effettuato un controllo accurato dei dati e delle informazioni presentate dal proponente, al fine di verificare la conformità del progetto ai criteri di Verra. È possibile che altri enti di verifica vengano eletti in sua vece.

[14] Disponibile al link: https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-03-v3.pdf.
[15] Disponibile al link: https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-05-v3.0.pdf.
[16] Op. Cit.
[17] Disponibile al link: https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-16-v4.pdf.
[18] Disponibile al link: https://store.uni.com/uni-en-iso-14064-2-2019.

In Fig. 20 invece, vengono riportati tutti i documenti da presentare al fine di completare l'iter di certificazione.

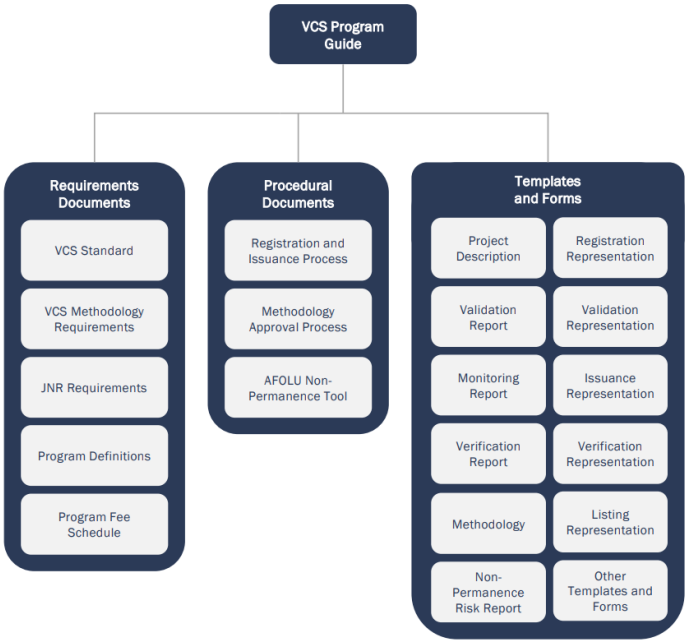


Figure 20. Schema di riepilogo della documentazione di supporto alla presentazione della domanda di certificazione presso Verra.
Fonte: Verra[19].

[19] Disponibile al link: https://verra.org/Wp-content/uploads/2022/12/VCS-Program-Guide-v4.3-FINAL.pdf.

6. La compravendita di CCC tramite Corporate offsetting practices

Come anticipato nel Cap. 2, le tecnologie di pirolisi oggigiorno impegnano troppo spesso finanziariamente i project owners, i quali desistono nell'affrontare gli investimenti di start up, complice anche l'assenza di un mercato maturo e diffuso, le cui barriere all'entrata lato domanda tendono a flettere negativamente o, addirittura, a non garantire un flusso continuo di ricavi nel tempo. Al fine di incentivare pratiche ambientalmente vantaggiose e, al tempo stesso, decarbonizzare più rapidamente (o almeno sulla carta) l'economia, si fanno sempre più largo iniziative di carbon offsetting tramite l'acquisto CCC, i quali equivalgono di norma al sequestro di una tonnellata di CO2eq. In sostanza, soprattutto le aziende occidentali altamente inquinanti, sono molto restie nell'abbandonare gli investimenti fatti fino ad oggi anche se dannosi per l'ambiente, condotta derivante sia da una normale path dependency finanziaria, sia da una propensione tacita verso i profiti "ad ogni costo" anche se questi determinano un danno ambientale non indifferente. Al fine di limitare questa indigenza, le entità sovranazionali e gli enti regolatori, in collaborazione con le realtà nazionali, hanno pianificato dei programmi di tassazione il cui onere si presenta proporzionale all'ammontare di emissioni prodotte durante il periodo di osservazione preso in esame. Le imprese private, in tutta risposta, hanno dimostrato una sempre più comune propensione all'acquisto di CCC per limitare gli effetti economicamente negativi di tali normative fiscali ambientali, soprattutto se si considera il fatto che, ad oggi, investire in CCC costa meno che investire realmente nella decarbonizzazione interna della propria struttura di business poiché misurare e, quindi, intervenire nella risoluzione di practices inquinanti risulta in operazione capital intensive.

Le emissioni generate da un'azienda possono essere di due tipi, dirette e indirette, classificate secondo la gerarchia proposta da *Greenhouse Gas Protocol (GHGP)*.

- Scope 1: emissioni che derivano direttamente da operazioni possedute o controllate da un'organizzazione
- Scope 2: emissioni associate alla generazione di energia acquistata, come l'elettricità. Tecnicamente, corrisponderebbero ad emissioni indirette poiché si verificano presso le strutture del fornitore di energia elettrica o dell'utility acquistata ma rientrano tra le attività su cui l'azienda ha il controllo dal momento che quest'ultima ne dirige il consumo.
- Scope 3: emissioni generate indirettamente da un'organizzazione lungo tutta la sua supply chain. Si tratta di emissioni che le organizzazioni non controllano direttamente ma che si verificano a seguito delle loro operazioni.

Le emissioni appartenenti alle prime due categorie possono essere più facili da misurare poiché le informazioni sono in genere facilmente reperibili per la società che ne desidera la rendicontazione. Al contrario, le emissioni Scope 3 sono decisamente più difficili da misurare e gestire perché generate da terze parti su cui l'azienda ha vari gradi di influenza. A rendere ancora più complesso questo compito, tali emissioni rappresentano la percentuale più elevata. Seguendo le politiche sovranazionali volte alla *carbon neutrality*, anche le organizzazioni private sono tenute ad implementare net-zero strategies e, ovviamente, il focus cade sulle emissioni che rappresentano la frazione più elevata sul totale. Il carbon offset, cioè la neutralizzazione di emissioni di CO2, viene operato tramite sostegno a progetti di tutela ambientale sviluppati da realtà terze all'azienda, in contesti territoriali normalmente slegati dalle filiere aziendali di approvvigionamento delle materie prime. Acquistando crediti di carbonio che certificano il sequestro di una tonnellata di CO2, le aziende sono in grado di controbilanciare le proprie emissioni. In questo caso l'acquirente privato può decide se ottenere CCC con un livello di coinvolgimento alto nel progetto che li ha generati, ovvero, condividendo investimenti o costi di gestione attraverso finanziamenti una tantum, oppure,

decidendo di voler rimanere slegati da questi e quindi propendere per l'acquisto di CCC attraverso broker o sui mercati finanziari.

L'oggetto di quest'analisi prevede appunto lo studio di una proposta rientrante nella pratica di carbon offsetting con un elevato gradi di coinvolgimento per una grossa azienda italiana leader nel settore della torrefazione e produzione di caffè tostato, con il fine di rendere maggiormente sostenibile l'intera filiera di approvvigionamento da cui dipende. Si è scelto di promuovere un progetto che sia frutto diretto dell'investimento da parte dell'azienda poiché un più alto livello di coinvolgimento determinerebbe sicuramente una validità superiore dei crediti emessi, senza contare il fatto che l'azienda andrebbe a decurtare direttamente il carbon footprint della propria supply chain.

6.1. Critiche

La compensazione di carbonio è spesso criticata dalla stampa e da alcuni attivisti ambientali. Il CDM ha da sempre scatenato critiche da parte dei movimenti ecologisti, sia con accuse di "colonialismo del carbonio", frode e sovrastima delle riduzioni, data la scarsa credibilità iniziale dei crediti emessi. Nonostante gli sforzi più recenti dei programmi di compensazione del carbonio, una serie di studi hanno identificato seri problemi con alcuni enti certificatori operanti sui Voluntary Carbon Markets, i quali continuano ad emettere CCC di scarsa qualità e dubbia provenienza, fenomeno attribuibile alla necessità di queste organizzazioni di generare ricavi per poter sopravvivere sul mercato, ricavi che dipendono direttamente dalle commissioni di certificazione e di emissione dei crediti. Nonostante questo, alcuni studi sui mercati del carbonio ufficiale gestiti da entità sovranazionali, come i programmi di compensazione più diffusi al mondo (CDM e il Joint Implementation - JI), suggeriscono che parte dei loro crediti di compensazione non rappresenterebbero riduzioni valide di GHG e lasciano spazio a scetticismo sull'integrità di questi meccanismi [69] [70] [71] [72].

Le critiche non si limitano solo alla qualità dei crediti, ma anche agli incentivi che le pratiche di offsetting possono generare. Spesso i CCC sono paragonati alle indulgenze cattoliche romane, un meccanismo per continuare a inquinare pagando per un'assoluzione che al momento non si presenta molto costosa, piuttosto che cambiare il comportamento dannoso alla radice. Per far crescere in maniera appropriata questi mercati e far fronte a queste critiche, è richiesta una standardizzazione e trasparenza crescente per assicurare la qualità dei progetti, ma anche un adeguato incoraggiamento delle aziende ad affrontare prima di tutto le loro emissioni, per identificare ogni possibile opzione di riduzione alla fonte, e solo a seguito considerare programmi di compensazione.

7. Voluntary Carbon Market (VCM)

Il VCM è un mercato non regolamentato dove le imprese e le organizzazioni possono acquistare crediti di carbonio volontari (ovvero emessi da iniziative e progetti privati e non finanziate statalmente) per compensare le proprie emissioni di gas a effetto serra. A differenza del mercato regolamentato del carbonio, dove i crediti di carbonio sono emessi sulla base di obblighi legali, i crediti di carbonio volontari sono emessi da progetti di mitigazione del clima che non sarebbero stati realizzati senza il finanziamento proveniente da questo mercato. I crediti di carbonio volontari possono essere scambiati su piattaforme online, tramite intermediari e/o broker o in modo bilaterale tra acquirenti e venditori (accordi e partnership). Tali contratti di compravendita possono avvenire anche sul mercato secondario.

Negli ultimi dieci anni, il mercato volontario del carbonio è cresciuto in termini di volume e valore delle transazioni. Rispetto al 2019, già un anno di crescita forte crescita del mercato, il volume di transazioni è aumentato dell'80% nel 2020, e nel 2021 chiuderà con oltre $1 miliardo in transazioni annuali. È dunque un momento storico di grande interesse per le aziende che fanno uso di CCC per le loro strategie net zero, anche se questa forte espansione del mercato (soprattutto dal lato della domanda, a fronte di un'offerta inelastica) pone delle incognite riguardo ai prezzi futuri. Questo studio esamina le caratteristiche dei CCC, il contesto politico, normativo e finanziario che sta influenzando il mercato dei crediti, e le previsioni future per i prezzi dei CCC, anche in relazione all'evoluzione dei mercati regolamentati di carbonio.

Figura 22. Distribuzione geografica dei voluntary offset projects attivi [73].

Il prezzo medio dei crediti di carbonio volontari è aumentato negli ultimi anni, passando da circa 3,50 dollari USA per tonnellata di CO2 equivalente nel 2011 a circa 4,50 dollari USA nel 2020. Oltre a questa crescita di prezzo data dalla forte espansione dei mercati volontari, si registra una forte oscillazione del prezzo associato ai singoli crediti data dalla locazione geografica in cui esso viene in essere (Fig. 22). Quest'ultima determina effetti sull'assegnazione del prezzo dei CCC, passando da

$0.91 per tCO2eq in China a $15.90 in Nuova Zelanda. Tuttavia, i prezzi possono anche variare notevolmente a seconda del tipo di progetto (Fig. 23) e della piattaforma di scambio utilizzata.

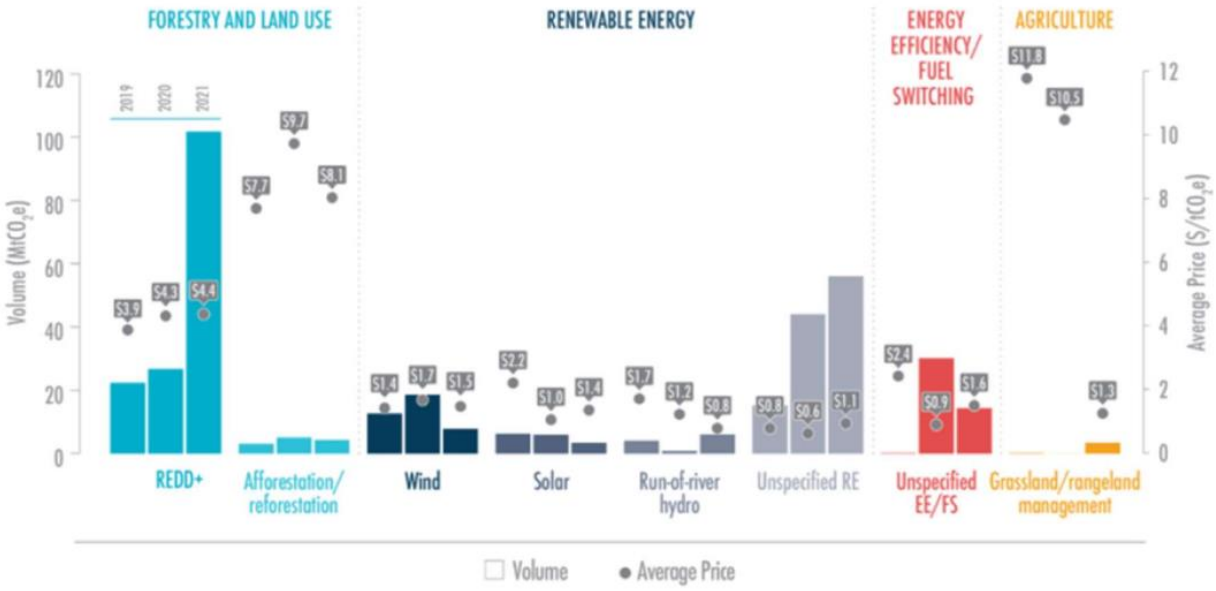


Figura 23. Dimensioni del mercato del carbonio volontario transato per tipologia di progetto (2019-2021) [74].

In termini di volumi di transazioni, i progetti di riforestazione e di conservazione delle foreste sono stati i più popolari nel mercato volontario del carbonio negli ultimi anni. Nel 2020, questi progetti rappresentavano il 41% del totale dei crediti di carbonio emessi. Altri tipi di progetti, come quelli di energia rinnovabile e di riduzione delle emissioni industriali, hanno visto un aumento della domanda negli ultimi anni.

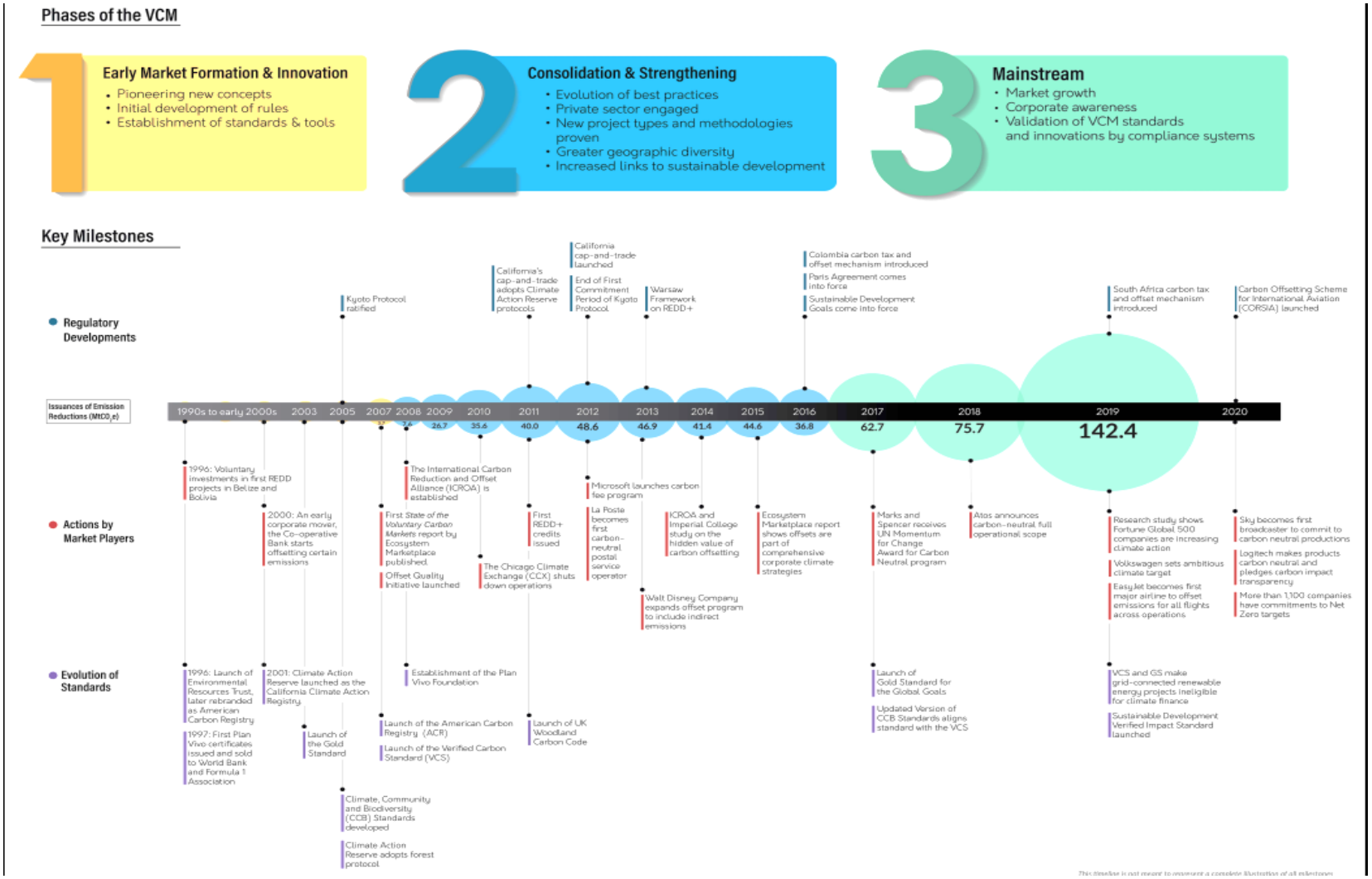


Figura 24. Roadmap del VCM.
Fonte: VERRA e ICROA, 2020[20]

[20] Disponibile al link: https://voluntarycarbonmarket.org/docs/VCM-Interactive-PDF-Version-1-With-Introduction.pdf Interactive-PDF-Version-1-With-Introduction.pdf.

7.1. Contesto politico e normativo

Il messaggio chiave del rapporto *IPCC Working Groups (WG) III* è che senza riduzioni immediate e profonde delle emissioni in tutti i settori, limitare il riscaldamento globale a 1,5°C resta un obiettivo irraggiungibile. La Fig. 25 mostra lo sviluppo delle emissioni globali di GHG tra 1,5°C e 2°C. I percorsi senza un *high temperature overshoot* richiedono più che sostanziali riduzioni nel prossimo decennio poiché, come affermato nel report, nessun scenario ottimale sarà raggiunto se la politica attuale continua, come indicato dalla linea rossa in figura [75].

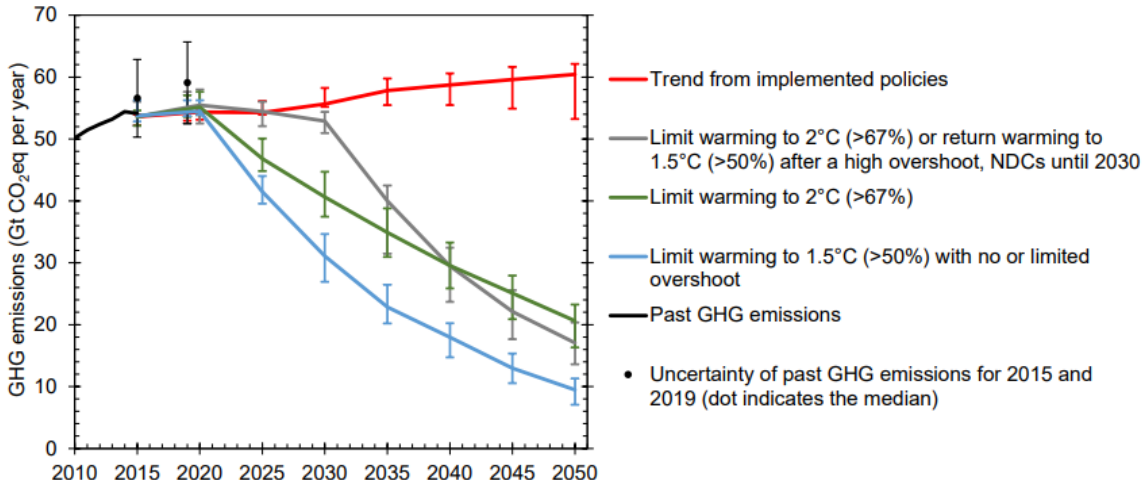


Figura 25. Trend delle temperature globali correlate ai livelli di GHG emissions registrati nel 2022 [75]

La fornitura di finanziamenti per il clima continua a essere un argomento chiave nei negoziati UNFCCC. Già dal 2009, i paesi economicamente sviluppati si sono impegnati a mobilitare congiuntamente 100 miliardi di dollari all'anno entro il 2020 per rispondere alle esigenze dei paesi in via di sviluppo nella lotta al cambiamento climatico. Questo obiettivo è stato confermato nel 2015 al momento dell'adozione degli Accordi di Parigi, oltre a fissare un nuovo pacchetto di aiuti finanziari per il clima entro il 2025, il quale dovrebbe superare il pacchetto di aiuti finanziari annui mobilitato in precedenza. I negoziati alla COP26 sono stati inaugurati con il mancato raggiungimento dell'obiettivo prefissato nel 2009. Ad oggi, secondo la quarta valutazione biennale della *Standing Committee on Finance (SCF)*, i paesi donatori hanno registrato una media annua di sostegno pubblico di 48,7 miliardi di dollari tra il 2017 e il 2018. Hanno fornito altri 25 miliardi dollari attraverso le banche multilaterali di sviluppo e 2,7 miliardi di dollari attraverso il Climate Fund [76]. Mentre i dati definitivi sui flussi del 2020 saranno disponibili solo a partire dal prossimo anno, l'OCSE ha stimato che i finanziamenti per il clima siano stati forniti e mobilitati ammontano a 80,4 miliardi di dollari nel 2019 e 83,3 miliardi nel 2020, lasciando un gap di circa 16 miliardi di dollari che non è stato possibile colmare (OCSE, 2022). Inoltre, i governi dei paesi beneficiari hanno ripetutamente criticato i paesi donatori per aver sopravvalutato i loro contributi, compresi i prestiti non agevolati al valore nominale (es. INKA consult 2021; INKA consult e CARE 2021; Oxfam 2020; Governo dell'India 2016; PUÒ 2021) [75]. Ad oggi, la COP27 si è limitata nel commissionare all'SCF il compito di proseguire nella definizione di finanziamento per il clima.

7.2. COP26 e COP27, gli obbiettivi del futuro

- Articolo 6

L'articolo 6 dell'Accordo di Parigi (redatto durante la COP21 del 2015) è composto da nove paragrafi che tentano di fornire una linea comune d'azione su come i paesi partecipanti possano *pursue voluntary cooperation*, al fine di raggiungere i rispettivi obiettivi climatici. In questo articolo è fornito il quadro che consente ai paesi di vendere e acquistare *GHG removals*, noti come *Internationally Transferred Mitigation Outcomes (ITMOs)*[21]. Nel rispetto degli Accordi di Parigi, ciascun paese ha comunicato il proprio *Nationally Determined Contributions (NDCs)* ai sensi dell'Articolo 4 che riporta gli obbiettivi di riduzione delle emissioni per ciascun paese. Inoltre, l'articolo 6 sancisce la nascita del *Global Carbon Market Mechanism (GCMM)* ai sensi dell'art. 6.4 in base al quale i paesi sono legittimati alla compravendita di ITMOs (quest'ultima regolata all'art. 6.2) al fine di raggiungere gli obbiettivi prefissati nei corrispettivi NDCs [75].

La COP26 di Glasgow ha prodotto le regole iniziali sulle quali si baserà il funzionamento del GCMM e sui meccanismi di mercato dell'articolo 6, documento collettivamente riconosciuto come *Article 6 Rulebook*. Tuttavia, i dettagli chiave sul funzionamento pratico del GCMM sono stati demandati alla COP27, compresi i particolari su come funzionerebbe il GCMM, le metodologie di emissione e autorizzazione degli ITMOs e come queste possano essere "ritirate". Nonostante gli intensi negoziati della COP27, la conferenza sul clima ha redatto soluzioni parziali ai quesiti ritenuti maggiormente spinosi [75].

- Articolo 6.2

Un risultato chiave della COP26 è l'adozione di norme contabili complete per il trasferimento internazionale di *ITMOs.* Nell'ambito del quadro contabile, due paesi impegnati nel trasferimento di unità di carbonio devono applicare il c.d. *corresponding adjustments* all'interno del proprio NDCs*.* Similmente alla contabilità in partita doppia, il regolamento impone la detrazione dei titoli venduti dall'NDCs del paese venditore in modo tale che il paese acquirente possa registrarli nel proprio. Questo approccio garantisce che solo il paese acquirente possa sfruttare i titoli di carbonio trasferiti per il raggiungimento dei propri obiettivi climatici e quindi evitare il fenomeno legato al *double counting* [77].

- Articolo 6.4

Ai sensi dell'articolo 6.4, si è sancita la nascita del GCMM sotto la supervisione di un organismo delle Nazioni Unite. Questo nuovo meccanismo è comunemente considerato il successore del *Clean Development Mechanism (CDM)*, anche se possiede regole più stringenti. Ad esempio, il GCMM stabilisce nuovi principi per dimostrare l'addizionalità dei progetti che assicurano la riduzione o sequestro di un certo ammontare di CO2eq. In quest'ottica, si verrà a creare un mercato globale del carbonio supervisionato da un "Organo di Vigilanza" che sarà incaricato di monitorare e approvare i

[21] Possono essere misurati in anidride carbonica equivalente (CO2e) o utilizzando altri parametri, come i chilowattora (KWh) di energia rinnovabile.

progetti in collaborazione al paese in cui verrà realizzato prima che abbia inizio l'iter previsto dall'ONU per il rilascio dei nuovi crediti A6.4ER (*Emission Reductions*) [78], i quali possono essere acquistati da paesi, aziende e anche individui[22].

L'obiettivo rimane quello di far convergere i vari mercati esistenti (come l'EU ETS) e, pertanto, i partecipanti saranno tenuti a monitorare le riduzioni delle emissioni generate nell'ambito del GCMM al fine di sodisfare i vari principi di conformità e poter accedere ad altri sistemi o programmi di scambio di titoli climalteranti. Inoltre, al fine di garantire continuità finanziaria ai progetti esistenti durante questo periodo di transizione finanziaria, il CDM istituito nell'ambito del Protocollo di Kyoto continuerà ad operare secondo le norme vigenti, anche se all'*art. 6 Rulebook* si è regolamentata la transizione dei progetti CDM al nuovo programma GCMM (i crediti CDM, noti come *Certified Emission Reduction (CER)*, saranno validi fino al 31 dicembre 2025 o alla fine del loro attuale periodo di accreditamento, a seconda di quale evento si verifichi per primo). Dal 2026 in poi, questi dovranno essere pienamente conformi all'art. 6, tuttavia, durante questo lasso temporale permane il rischio di vedere centinaia di milioni di *trash credits* CER (non vigenti secondo le nuove regole, viziati da double counting e *not-additional*) rinominati come 6.4ER, ovvero crediti di carbonio ai sensi dell'art. 6.4[23]. In questo senso, sono già in corso vari sforzi di vigilanza per contribuire a ridurre l'incertezza e fornire maggiore chiarezza agli utenti di questi mercati. L'obiettivo è quello di conformare alle norme internazionali del GCMM il c.d. *VCMs Wild West*: la volontà è quella di non riconoscere ufficialmente tutti i crediti emessi secondo le logiche *avoided emissions* tipici dei VCM (non sono conformi al nuovo art. 6) per favorire l'emissione dei soli *mitigation contributions* (o *emission reductions*, 6.4ER) [77]. A questo fine, il Segretario generale delle Nazioni Unite ha recentemente istituito un gruppo di esperti di alto livello con il compito di valutare gli standard e le definizioni attuali per la definizione di obiettivi net-zero da parte di attori non statali, mettendo pressione ad altri organi come la Taskforce for Scaling Voluntary Carbon Markets (TSVCM), l'Integrity Council for Voluntary Carbon Markets (ICVCM) o il Voluntary Carbon Market Integrity Initiative (VCMI), come ad altre organizzazioni di accreditamento come Gold Standard e Verra.

[22] I crediti A6.4ER non potranno essere scambiati fino a quando non saranno istituiti questo organismo di vigilanza e un registro centralizzato per la rendicontazione delle compravendite.

[23] Fino a 2,8 miliardi di crediti potrebbero diventare idonei per l'emissione se tutti i progetti CDM dovessero passare.

8. Descrizione del modello di analisi adottato e degli scenari esaminati

Al fine di distinguere i quattro *case studies* analizzati, due presso Torino (Italia) e due in Brasile, si è adottata una nomenclatura come descritto nei prossimi paragrafi.

8.1. Locazione geografica progettuale e tipologia di impianto scelto

- **X.**: indica l'impianto scelto e la conseguente scala adottata.

    - **ITA 1.**: impianto produttivo di piccola scala BST-05 Pro skid-mounted installato presso il plant di torrefazione di una grossa impresa alimentare attiva nel settore del caffè.
      Biomassa in input selezionata: scarti di torrefazione (silverskin) pallettizzati.

    - **ITA 2.**: impianto produttivo di media scala BST-10 installato presso il plant di torrefazione di una grossa impresa alimentare attiva nel settore del caffè.
      Biomasse in input selezionata: scarti di torrefazione (silverskin) pallettizzati, scarti della prima lavorazione di colture cerealicole e dei processi di sgusciatura di frutta secca (noci, nocciole, mandorle).

X.	
Production Plant Dimension	
BST-05 Pro (ITA)	BST-10 (ITA)
1.	2.

Tabella 1. Sigle scenari italiani: ITA 1. BST-05 Pro e ITA 2. BST-10

    - **BRA 3.**: si è scelto di delocalizzare la produzione di biochar nel paese d'origine dove l'impresa di torrefazione italiana reperisce la materia prima. Attualmente sono due i fornitori di chicchi di caffè verde brasiliani, entrambi con piantagioni di proprietà annesse. In questo caso, si è scelto di installare due impianti produttivi di media scala BST-10 presso ciascun fornitore, ove il fornitore che presenta un maggior

quantitativo di scarti appaga la capacità di biomassa in input del reattore mentre l'altro la satura al 50% circa, imponendo una fornitura esterna.
Biomassa in input selezionata per il processo di co-pirolisi: residui post-raccolta (cascara e pergamino) e scarti di potatura.

- **BRA 4.**: si è scelto di delocalizzare la produzione di biochar nel paese d'origine dove l'impresa di torrefazione italiana reperisce la materia prima. Attualmente sono due i fornitori di chicchi di caffè verde brasiliani, entrambi con piantagioni di proprietà annesse. In questo caso, si è scelto di installare un solo impianto produttivi di medi-grande scala BST-30 presso il fornitore che presenta un maggior quantitativo di scarti.
  Biomassa in input selezionata per il processo di co-pirolisi: residui post-raccolta (cascara e pergamino) e scarti di potatura.

X.	
Production Plant Dimension	
2xBST-10 (BRA)	BST-30 (BRA)
3.	4.

Tabella 2. Sigle scenari italiani: BRA 3 2xBST-10 e BRA 4 BST-30

8.2. Scenari di prezzo analizzati

- **MAIUSC.**: indica lo scenario di prezzo analizzato, in modo tale da dare una maggiore indicazione circa la potenziale profittabilità del progetto a seconda del prezzo di vendita adottato (principale fattore ad influenzare la decisione dell'acquirente), sia individuare con più precisione a quale prezzo corrisponde il breakeven point. La scelta dei vari prezzi per scenario dipende dal mercato di riferimento poiché la wtp degli agricoltori italiani e ben differente dalla wtp dei farmers brasiliani, oltre alla differenza di propensione verso l'adozione di pratiche agricole sostitute a quelle maggiormente diffuse oggigiorno. Inoltre, per entrambi mercati, l'analisi di prezzo si differenzia a seconda se la vendita avviene nei confronti di altre aziende (B2B) o verso orticoltori privati, vivaisti non commerciali, home gardeners e hobbisti (B2C).

8.2.1. Best Price, Middle Price, Worst Price scenarios per il mercato B2B e B2C italiano

- ***Bp.***: Best Price Scenario, prezzo di vendita del biochar per il mercato B2B pari a \$800 t^{-1} , per il mercato B2C pari a \$20 kg^{-1}.

- ***Mp.***: Middle Price Scenario, prezzo di vendita del biochar pari a \$650 t^{-1}, per il mercato B2C pari a \$15 kg^{-1}.

- ***Wp.***: Worst Price Scenario, prezzo di vendita del biochar pari a \$500 t^{-1}, per il mercato B2C pari a \$10 kg^{-1}.

_MAIUSC.		
Refers to Price Scenario		
Best price Scenario	Middle price Scenario	Worst price Scenario
Bp. 800 \$/ton 20 \$/kg	Mp. 650 \$/ton 15 \$/kg	Wp. 500 \$/ton 10 \$/kg

Tabella 3. Riepilogo scenari di prezzo Bp, Mp, Wp scelti per il mercato italiano

8.2.2. Surveys analysis: studio sperimentale della willingness to pay tramite Van Westendorp price sensitivity meter

Come descritto nel capitolo 4.4. *Analisi dei prezzi di mercato della customers willingness to pay*, il prezzo che l'acquirente deve sostenere è uno dei principali driver d'acquisto e, se la letteratura è popolata da molte ricerche tecnico-economiche per la produzione di biochar e di come la scala e/o la vendita di carbon credits possano soppesare e bilanciare i costi in essere di tale esercizio, è altresì vero che la stessa è sprovvista di studi approfonditi sulla stima della potenziale penetrazione di tale prodotto all'interno del mercato. Uno dei principali motivi di tale asimmetria risiede nell'enorme difficoltà che i ricercatori incontrano nell'analisi della wtp della customer segment in esame a causa dell'enorme quantitativo di variabili e dati che devono essere prese in considerazione. Questo compito si può dire più facile in mercati usciti dalla propria fase embrionale (come quello nordamericano ad esempio) e dove la customer segment che si vuole aggredire opera in un settore con un tasso di tecnologizzazione medio-alto. In ottica di ricerca e conferma dei dati prelevati dalla letteratura, si è deciso di diffondere un questionario (n=76 rispondenti) composto da due sezione, una per rispondenti B2B (n=44), l'altro per rispondenti B2C (n=32), al fine di analizzare la wtp del consumatore e la sua percezione nei confronti del biochar e dei suoi benefici in campo agricolo o hobbistico.

Al fine di determinare la wtp, si è deciso di operare una Price Sensitivity Van Westendorp Analysis per determinare l'optimal price point a cui il biochar dovrebbe esser venduto e, quindi, attrarre il maggior numero di potenziali acquirenti possibili. Per entrambe le sezioni B2B – B2C sono state sottoposte ai rispondenti quattro domande come segue:

- Q1. *Sapresti indicare per il BIOCHAR il prezzo di vendita a tonnellata (B2C, a kilogrammo) che ritieni eccessivamente economico?*
- Q2. *Sapresti indicare per il BIOCHAR il prezzo di vendita a tonnellata (B2C, a kilogrammo) che ritieni equo/economico?*
- Q3. *Sapresti indicare per il BIOCHAR il prezzo di vendita a tonnellata (B2C, a kilogrammo) che ritieni caro?*
- Q4. *Sapresti indicare per il BIOCHAR il prezzo di vendita a tonnellata (B2C, a kilogrammo) che ritieni eccessivamente caro?*

Graficando le risposte su Excel, i grafici risultanti evidenziano quattro punti:

- Point of marginal expensiveness (o highest reasonable price): risultante nell'incrocio tra le curve *cheap* e *too expensive*, rappresenta il punto di prezzo in cui la dispendiosità dell'esborso risulta eccessiva rispetto all'utilita/beneficio che deriverebbe dall'acquisto stesso.

- Point of marginal Inexpensiveness (o lowest reasonable price): risultante nell'incrocio tra le curve *too cheap* ed *expensive*, rappresenta il punto di prezzo in cui le vendite sarebbero influenzate negativamente a causa della percezione che il cliente afferisce al prodotto poiché una bassa dispendiosità dell'esborso si traduce nella percezione che il prodotto sia di bassa qualità.

- Indifference price point: risultante nell'incrocio tra le curve *cheap* ed *expensive,* rappresenta il prezzo in cui la percentuale di clienti che ritiene che il prodotto stia diventando troppo

costoso equipara la percentuale di quelli che ritengono che il prodotto sia venduto ad un prezzo vantaggioso.

- Optimal price point: risultante nell'incrocio tra le curve *too cheap* e *too expensive*, rappresenta il punto di prezzo in cui la percentuale di clienti che ritiene il prezzo sia troppo costoso o troppo economico è al minimo, traducendosi in una bassa resistenza all'acquisto. A questo prezzo si massimizzano le vendite.

Interpretando il grafico, si può ottenere una stima del prezzo da assegnare al prodotto che si desidera commercializzare. In generale, il prezzo deve essere compreso tra il point of marginal expensiveness e il point of marginal inexpensiveness, intervallo anche detto Range of Acceptable Pricing (RAI).

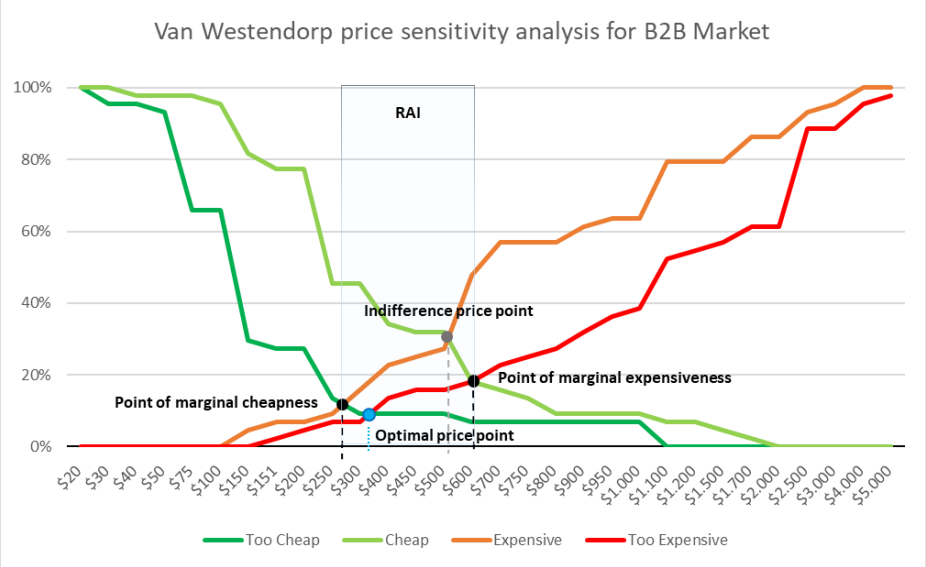


Tabella 4. Van Westendorp price sensitivity analysis per il mercato biochar B2B.

Come mostrato in Tab. 4, la clientela B2B presenta un'ottima propensione al consumo nell'intervallo di prezzo compreso tra i \$275 e i 650\$ t^{-1}, massimizzata però verso il lower bound di tale intervallo, ovvero \$350 t^{-1}. In riferimento agli studi riportati da Dumotier et al. (2020) sulla wtp (Cap. 4.4)[24], se si assumessero simili il tasso di tecnologizzazione del settore agricolo e l'anagrafica di reddito medio degli agricoltori nordamericani ed europei, i risultati ottenuti dal questionario non differiscono da quelli ottenuti dagli autori del Paul H. O'Neill School of Public and Environmental Affairs

[24] I ricercatori hanno stimano che il 5% delle terre coltivate su suolo nordamericano per le sei colture analizzate sarà ammendato con biochar se quest'ultimo venisse venduto per un intervallo di prezzo pari a \$238-\$265 t^(-1) (nel caso di bassi prezzi di vendita a tonnellata delle sei colture) e di \$665-\$747 t^(-1) (in caso di alti prezzi). Per ottenere una copertura del 25% delle terre coltivate, invece, i prezzi del biochar devono diminuire a \$146-\$169 t^(-1) e a \$395-\$453 t^(-1).

dell'Università dell'Indiana, anzi, si dimostrano perfettamente in-range. Non passa inosservato, però, che oggigiorno c'è un disallineamento significativo tra il prezzo di mercato all'ingrosso per una tonnellata di biochar e la wtp ottimale dei potenziali acquirenti. Come riportato da Young P. e Lawrence J. (2019), il prezzo attuale per il biochar varia da \$600-\$1.300 t^{-1} all'ingrosso, ovvero circa il 100% più alto rispetto alla wtp stimata da Dumotier et al. (2020) [66] per la fascia di consumatori basso-spendenti e circa il 50% per quelli alto-spendenti. I prezzi così scelti per l'analisi multi-scenario per il mercato B2B (*Bp* \$800 t^{-1}, *Mp* \$650 t^{-1}, *Wp* \$500 t^{-1}), si rivelano a cavallo tra i prezzi lower bound \$600-\$800 t^{-1} stimati per la vendita all'ingrosso da Young P. e Lawrence J. (2019) [63] e il RAI upper bound pari a \$500-\$650 t^{-1} individuato tramite survey analysis.

Infatti, la determinazione del prezzo di mercato non è in alcun modo risultante dall'incrocio tra le curve di domanda e offerta poiché in Europa, al momento, non esiste un mercato B2B del tutto formato a causa di un'offerta ancora sporadica, priva di standard qualitativi e/o categorie merceologiche riconosciute internazionalmente e timidamente incentivata a livello pubblico. Dall'altra parte, invece, gli individui lato domanda sono meno propensi all'utilizzo di pratiche innovative in un settore in cui i costi e gli incrementi dei prezzi gravano sui bilanci delle PMI europee e soprattutto italiane, le quali quindi preferiscono riporre fiducia in quei prodotti (fertilizzanti e/o concimi fosfatici e azotati) che fin qui hanno consentito una redditività tale da poter sopravvivere.

Per quanto concerne, invece, l'analisi della wtp lato B2C l'analisi Van Westendorp (Tab. 5) rileva che la clientela presenta un'ottima propensione al consumo nell'intervallo di prezzo compreso tra i \$12 kg^{-1}e i \$25 kg^{-1}, massimizzata a circa \$13 kg^{-1} (optimal price point). Pertanto, i prezzi B2C scelti (*Bp* \$20 kg^{-1}, *Mp* \$15 kg^{-1}, *Wp* \$10 kg^{-1}) si possono considerare in-range.

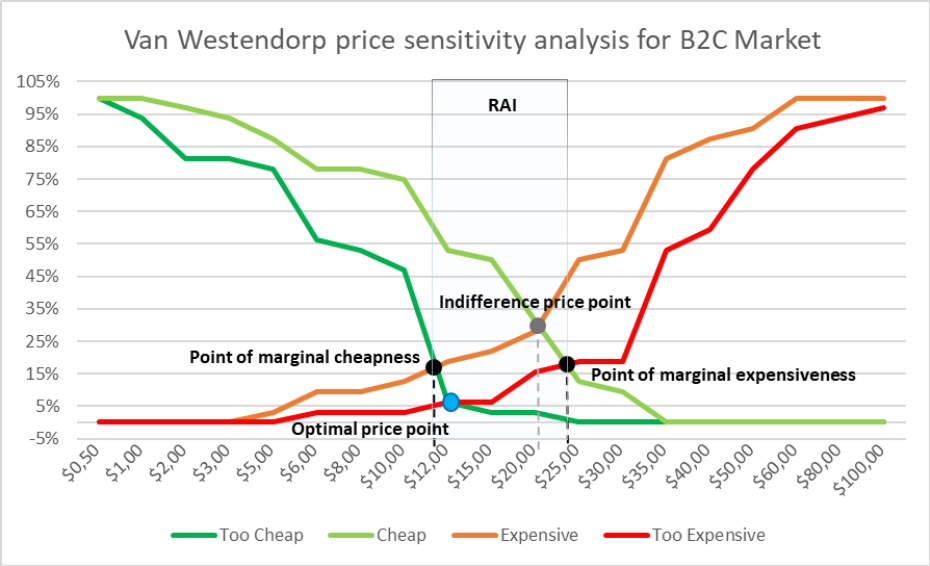


Tabella 5. Van Westendorp price sensitivity analysis per il mercato biochar B2C.

8.2.3. Analisi campionaria dei prezzi B2C reali per il mercato italiano

Attualmente il mercato italiano del biochar è in forte espansione lato retail, dove la vendita al dettaglio vede sempre più attori in gioco. Le produzioni di larga scala sono totalmente assenti data la complessità progettuale per sostenere investimenti per high technology pyrolysis plants e, dunque, il biochar viene prodotto principalmente come attività secondaria o marginale rispetto alle pratiche agricole o agroalimentari. I metodi di produzione, per così dire, si rivelano pressoché "rudimentali", ovvero tramite lo sfruttamento di pratici forni al fine di estrarre la maggior utilità possibile dagli scarti che l'attività primaria d'impresa crea.

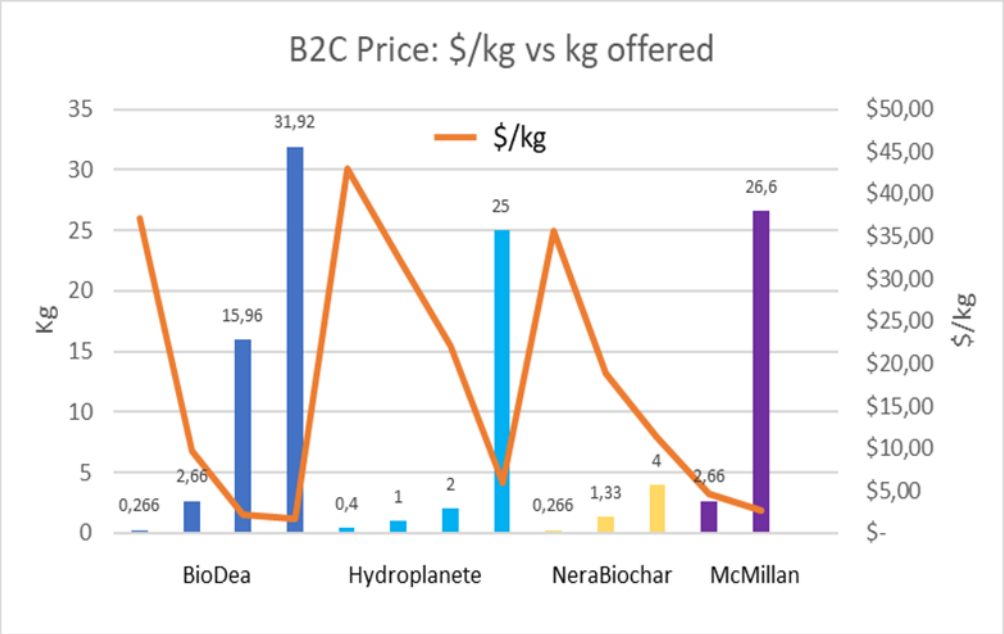


Tabella 6. Analisi campionaria dei prezzi attuali presenti sul mercato biochar B2C italiano.

Nel campione analizzato e riportato in Tab. 6 solo NeraBiochar ha come core business la produzione di carbone vegetale. Facendo un confronto con i prezzi attuali reperibili sul mercato italiano, i venditori adottano forti sconti all'aumentare della quantità che si desidera acquistare. Le imprese produttrici vendono i loro prodotti confezionati in bags dimensionate per litro (1 L = 0,266 kg). Come si può osservare tutte le imprese-campione rivelano prezzi al di sopra i \$35 kg^{-1} per bag da 1 L, \$18-\$25 kg^{-1} per bag da 3-5 L, fino a \$2-\$5 kg^{-1} per ordini superiori a 60 L (>15 kg). Essendo estremamente difficile stimare la penetrazione di mercato per il biochar e non essendoci un chiaro studio dell'anagrafica imprenditoriale attiva sul territorio con chiari riferimenti sulla concentrazione d'impresa al momento in essere, si è rilevato pressoché impossibile stimare i ricavi per ogni categoria dimensionale di vendita scelta tramite una bulk discount strategy e, dunque, si è propeso per analizzare tre scenari di prezzo statici.

8.2.4. Best Price, Middle Price, Worst Price scenarios per il mercato B2B e B2C brasiliano

- ***Bp.***: Best Price Scenario, prezzo di vendita del biochar per il mercato B2B pari a \$266 t^{-1} , per il mercato B2C pari a \$6 kg^{-1}.

- ***Mp.***: Middle Price Scenario, prezzo di vendita del biochar pari a \$216 t^{-1}, per il mercato B2C pari a \$5 kg^{-1}.

- ***Wp.***: Worst Price Scenario, prezzo di vendita del biochar pari a \$166 t^{-1}, per il mercato B2C pari a \$3 kg^{-1}.

_MAIUSC.		
Refers to Price Scenario		
Best price Scenario	Middle price Scenario	Worst price Scenario
Bp. 266 \$/ton 6 \$/kg	Mp. 216 \$/ton 5 \$/kg	Wp. 166 \$/ton 3 \$/kg

Tabella 7. Riepilogo scenari di prezzo Bp, Mp, Wp scelti per il mercato brasiliano.

Per il mercato brasiliano si è rivelato ancora più complesso stimare i prezzi di vendita (come riportato in Tab. 7) che corrispondessero alla realtà poiché non sono presenti né market assesments in letteratura, né tantomeno studi sulla profittabilità economica per la pirolizzazione di biomasse con conseguente commercializzazione di biochar. Inoltre, non essendo presenti chiare evidenze sulla wtp dei farmers brasiliani per l'acquisto di ammendanti alternativi, non si è potuto confrontare i prezzi scelti per i tre scenari analizzati con la reale propensione al consumo dei potenziali acquirenti. Il metodo utilizzato per la stima del tariffario da imporre, perciò, risulta aleatorio e pressoché indicativo poiché si è scelto di confrontare i prezzi B2C al momento imposti da alcuni rivenditori locali con i prezzi B2C del mercato italiano. La ratio espressa da questo confronto si attesta su 1:3, indicando che i prezzi B2C nel Vecchio Continente sono generalmente tre volte superiori rispetto a quelli brasiliani. In questo senso, si è scelto di adottare lo stesso approccio per i prezzi B2B.

Intervistando il Professor Mauro Giorcelli, ICHAR Board Executive Member for biochar innovative applications nonché esperto ricercatore di carbon-based nanotechnologies, la determinazione del prezzo di vendita passa in secondo piano poiché la prassi odierna dei produttori di biochar, soprattutto oltre-oceano, è di basare il proprio revenue stream model sulla vendita di carbon credits per nutrire le campagne di carbon offsetting di altre imprese interessate nel bilanciare le proprie emissioni di Scope 3. In questo senso, i produttori di biochar che si affermano in economie in via di

sviluppo riescono maggiormente a dimostrare l'addizionalità dei propri carbon credits[25] e a limitare il double counting on credits, peculiarità che innalzano notevolmente la "qualità" e l'affidabilità dei crediti stessi e, di conseguenza, il loro valore. Perciò, è comune prassi che i ricavi ottenuti dalla vendita di biochar prodotto rappresentino un'entrata secondaria poiché i prezzi alla tonnellata stabiliti per il carbone vegetale si devono adattare alla wtp del mercato locale, wtp decisamente ridotta rispetto ai mercati occidentali. Spesso, infatti, i produttori di biochar concordano partnership di favore con i fornitori di biomassa locali dove il meccanismo di *do ut des* viene rappresentato dalla fornitura di biomassa prima e la vendita assicurata di biochar a prezzi di favore (al fine di controbilanciare il valore della biomassa fornita) dopo.

8.3. Diversificazione del modello di revenues e dei livelli Best Case - Worst Case dell'investimento iniziale, del WACC e del trend di crescita dei prezzi dei VCU

- **minusc.**: come specificato nel Cap. 2.1. *Classificazione dei processi di pirolisi*, i CHAB pyrolyzers sono in grado di raccogliere e sintetizzare sottoprodotti di reazione oltre alla produzione di biochar, come wood vinegar (potente erbicida naturale) e tar nelle quantità 60 kg $t^{-1}biom$ e 30 kg $t^{-1}biom$ rispettivamente. Essendo per quest'ultimi un mercato estremamente di nicchia e di difficile stima sia per quanto riguarda la determinazione del prezzo, sia per quanto concerne la propensione all'acquisto da parte dei farmers, siano essi italiani o brasiliani, si è deciso di operare un'analisi della profittabilità bi-scenario, a seconda che si basi il business sulla sola vendita di biochar o sull'offerta in bundle di biochar e wood vinegar. Il tar, invece, si è scelto di sintetizzarlo per produrre bio-diesel da sfruttare come combustibile all'interno dell'impianto al fine di ammortizzare la dipendenza della reazione dall'immissione ulteriore di gas naturale, minimizzando per quanto possibile i costi associati. Per ogni scenario di vendita, che sia biochar-only o by-products bundling, si è associata un'analisi ulteriore di sotto-scenari: al fine di perfezionare l'analisi condotta sulla profittabilità derivante dalla produzione e commercializzazione di biochar in un contesto di certificazione ed emissione di crediti al carbonio sul VCM di Verra, si è scelto di adoperare una combinazione lineare di scenari Worst Case (WC) – Best Case (BC). Più specificatamente, si è scelto di stimare i costi di investimento iniziale e di start up del business, il Weighted Average Cost of Capital (WACC) con cui andare a scontare i flussi di cassa futuri al valore presente e la crescita del valore dei VCU emessi dettata dai meccanismi intrinseci di domanda e offerta del VCM fornendo un valore lower bound (pessimistico) ed un valore upper bound (ottimistico) al fine di aumentare la consistenza dell'analisi e osservare la sensibilità di oscillazione del Net Present Value (NPV), dell'Internal Rate of Return (IRR) e del Return On Investment (ROI) al variare delle voci sopra-elencate (come mostrato in Tab. 8)

[25] I crediti di carbonio devono rappresentare riduzioni o sequestro di emissioni di CO2 che non si sarebbero altrimenti verificati in assenza della vendita dei crediti di carbonio.

Pertanto:

- **a, aprod**: investimento iniziale ottimistico (BC), WACC al 6,5% (BC) e crescita del valore di mercato dei VCU pari a \$5,04 $tCO2eq^{-1}yr^{-1}$ (BC).
- **b, *Bp*rod**: investimento iniziale pessimistico (WC), WACC al 8,5% (WC) e crescita del valore di mercato dei VCU pari a \$5,04 $tCO2eq^{-1}yr^{-1}$ (BC).
- **c, cprod**: investimento iniziale ottimistico (BC), WACC al 8,5% (WC) e crescita del valore di mercato dei VCU pari a \$2,18 $tCO2eq^{-1}yr^{-1}$ (WC).
- **d, dprod**: investimento iniziale pessimistico (WC), WACC al 6,5% (BC) e crescita del valore di mercato dei VCU pari a \$2,18 $tCO2eq^{-1}yr^{-1}$ (WC).
- **e, eprod**: investimento iniziale pessimistico (WC), WACC al 8,5% (WC) e crescita del valore di mercato dei VCU pari a \$2,18 $tCO2eq^{-1}yr^{-1}$ (WC).

_minusc.				
Refers to Investment, WACC, VCU price growth Scenarios				
Biochar only	By Products	Investment	WACC	VCU price growth
a	aprod	BC	BC	BC
b	bprod	WC	WC	BC
c	cprod	BC	WC	WC
d	dprod	WC	BC	WC
e	eprod	WC	WC	WC

Tabella 8. Prospetto sigle degli scenari analizzati a seconda del modello di revenue analizzato (Biochar only, By products) e del valore WC - BC assunto dall'investimento iniziale, dal WACC e dal trend di crescita del prezzo associato ai VCU emessi.

I valori WC e BC del WACC corrispondono ai valori indicati nell'Annual Report 2020[26] e 2021[27] rispettivamente dell'azienda italiana produttrice di caffè tostato presa in esame, mentre il tasso di crescita stimato per il valore associato ad 1 tCO2eq sequestrata (= 1 VCU) sul VCM è stato ricavato da uno studio condotto da Trove Research insieme all'University College of London (UCL), i quali hanno sviluppato un modello di simulazione dei mercati dei crediti di compensazioni del carbonio [79]. La ricerca stima due scenari possibili per l'evoluzione dei prezzi dei CCC. Da un lato, se l'Articolo 6 e seguenti, concepiti durante la COP15 di Parigi e tutt'oggi ancora discussi (COP26-27 e la nascita GCMM per una regolamentazione uniforme e condivisa internazionalmente sia per i mercati

[26] Disponibile al link: https://www.lavazzagroup.com/content/dam/lavazza/lavazza-corporate/chi-siamo/il-gruppo-lavazza/risultati/Lavazza_RelazioniBilanci2020_Mono.pdf.
[27] Disponibile al link: https://www.lavazzagroup.com/content/dam/lavazza-corporate/chi_siamo/risultari/module/LavazzaGroup2021_Bilanci2021_ENG.pdf.

istituzionali sia per i voluntary carbon markets), non portassero a significativi disposizioni contro il fenomeno del double counting per i crediti da parte del settore privato e dei paesi per i loro Nationally Determined Contributions - NDCs (no NDCs adjustment), l'equilibrio di mercato potrebbe assestarsi intorno ai \$20-\$50 $tCO2eq^{-1}$ nel 2030. Considerando invece un aggiustamento completo del sistema per evitare ogni forma di double counting (full NDCs adjustment), la riduzione nell'offerta di crediti disponibili porterebbe a prezzi più alti, fra i \$30-\$100 $tCO2eq^{-1}$(Fig. 26) [79].

Figura 26. Analisi dei trend di prezzo futuri relativi ai crediti di carbonio [79].

Questi prezzi sono sicuramente più realistici per poter finanziare progetti di offset di alta qualità ed economicamente sostenibili nel tempo, avvicinandosi inoltre agli ordini di grandezza del mercato regolamentato Europeo, l'ETS[28]. In conclusione, per determinare il tasso di crescita WC annuale per i VCU, si è scelto di prendere il valore medio tra il range di prezzo d'equilibrio indicato nello scenario *no NDCs adjustment,* \$35 $tCO2eq^{-1}$, e di dividerlo per la vita utile del progetto stesso, 14 anni, ottenendo un valore di \$2,18 $tCO2eq^{-1}y^{-1}$. Allo stesso modo, per determinare il tasso di crescita BC annuale si è scelto di dividere per la vita utile del progetto il valore medio tra il range di prezzo d'equilibrio indicato per lo scenario *full NDCs adjustment,* \$75 $tCO2eq^{-1}$, il che è risultato in un tasso di crescita pari a \$5,04 $tCO2eq^{-1}y^{-1}$ [79].

[28] Le possibili interazioni fra voluntary carbon markets e mercati regolamentati sono al di là dello scopo di quest'analisi. In particolare, nell'ETS Europeo non si prevede che gli offsets volontari possano essere utilizzati in futuro da enti soggetti all'ETS stesso. L'aumento di liquidità nell'ETS ha recentemente portato a fenomeni di speculazione che hanno fortemente spinto i prezzi al rialzo e, pertanto, è plausibile che un simile fenomeno possa verificarsi all'aumentare dell'integrazione dei mercati VCM e all'accumulo della liquidità disponibile.

8.4. Riepilogo degli scenari analizzati per locazione geografica

Riassumendo, per i due casi Italia ITA.1 e ITA.2 avremo la seguente notazione (Tab. 9):

LEGENDA SIGLA: X.MAIUSC.minusc									
X.		_MAIUSC.			_minusc.				
Production Plant Dimension		Refers to Price Scenario			Refers to Investment, WACC, VCU price growth Scenarios				
BST-05 Pro (ITA)	BST-10 (ITA)	Best price Scenario	Middle price Scenario	Worst price Scenario	Biochar only	By Products	Investment	WACC	VCU price growth
1.	2.	Bp. 800 $/ton 20 $/kg	Mp. 650 $/ton 15 $/kg	Wp. 500 $/ton 10 $/kg	a	aprod	BC	BC	BC
					b	bprod	WC	WC	BC
					c	cprod	BC	WC	WC
					d	dprod	WC	BC	WC
					e	eprod	WC	WC	WC

Tabella 9. Prospetto completo delle sigle inerenti agli scenari italiani

Inoltre, per il caso ITA 1. BST-05 Pro non sono state condotte le relative analisi di profittabilità per gli scenari by-products bundling revenue stream (ITA *1.Bp/Mp./Wp.aprod*, ITA *1.Bp/Mp./Wp.Bprod*, ITA *1.Bp/Mp./Wp.cprod*, ITA *1.Bp/Mp./Wp.dprod* e ITA *1.Bp/Mp./Wp.eprod*) in quanto non è prevista dall'azienda produttrice cinese la configurazione del sistema di sintetizzazione per la raccolta di wood vinegar, come invece è per i reattori di media scala BST-10 e di medio-grande scala BST-30. Dunque, per il caso Italia si sono analizzati 15 scenari per ITA.1 BST-05 Pro e 30 scenari per ITA.2 BST-10 rispettivamente, per un totale di 45 scenari.

Per quanto concerne, invece, i due casi BRA.3 e BRA.4 seguiranno la seguente notazione (Tab. 10):

LEGENDA SIGLA: X.MAIUSC.minusc									
X.		_MAIUSC.			_minusc.				
Production Plant Dimension		Refers to Price Scenario			Refers to Investment, WACC, VCU price growth Scenarios				
2xBST-10 (BRA)	BST-30 (BRA)	Best price Scenario	Middle price Scenario	Worst price Scenario	Biochar only	By Products	Investment	WACC	VCU price growth
3.	4.	Bp. 266 $/ton 6 $/kg	Mp. 216 $/ton 5 $/kg	Wp. 166 $/ton 3 $/kg	a	aprod	BC	BC	BC
					b	bprod	WC	WC	BC
					c	cprod	BC	WC	WC
					d	dprod	WC	BC	WC
					e	eprod	WC	WC	WC

Tabella 10. Prospetto completo delle sigle inerenti agli scenari brasiliani

Per il caso Brasile si sono analizzati 30 scenari per BRA.3 2xBST-10 e altrettanti scenari per BRA.4 BST-30 rispettivamente, per un totale di 60 scenari.

Inoltre, tutti gli scenari precedentemente elencati sono stati analizzati anche in un contesto dove non è previsto il processo di certificazione del progetto tramite Verra, al fine di osservare l'impatto della

mancata redditività derivante dall'assenza dei crediti al carbonio sulla profittabilità finale del progetto stesso. In totale, dunque, questa ricerca racchiude un'analisi Free Discounted Cash Flow analysis (FDCF) di 105 scenari in un contesto di carbon crediting e di 105 scenari "puri", per un totale di 210.

9. Descrizione degli impianti selezionati per la produzione di biochar

La tipologia di impianti di produzione scelti corrisponde alla categoria CHAB system (come descritto nel sotto capitolo 5.1.1.), classificabili come *high technology production facility* in riferimento alla VCS Methodology - *VM0044: Methodology for biochar utilization in-soil and non-soil applications* emanata dall'ente certificatore Verra il 12/08/2022, in collaborazione con Biochar Works, Delaney Forestry Services, Forliance e South Pole [68]. Le strutture produttive ad alta tecnologia sono quelle che soddisfano tutte le seguenti condizioni in base alle EBC Guidelines for Sustainable Production of BiocharLinee emanate dall'European Biochar Certificate (EBC). In particolare:

- i GHG (greenhouse gasses) pirolitici prodotti durante la pirolisi devono essere recuperati o combusti - non è consentita l'emissione di gas serra nell'atmosfera;
- almeno il 70% dell'energia termica prodotta dalla pirolisi deve essere riutilizzata (tenendo conto delle inefficienze del trasferimento di calore);
- i gas esausti di combustione devono essere monitorati attraverso, ad esempio, un ossidatore termico o altri componenti utili a tale scopo con l'obiettivo di soddisfare le soglie di emissioni locali, nazionali o internazionali;
- la temperatura di produzione è misurata e riportata.

Se una di queste condizioni non viene soddisfatta, la struttura viene categorizzata come struttura produttiva a bassa tecnologia (*low technology production facility*).

In questa ricerca si è scelto di acquistare impianti CHAB prodotti dall'azienda cinese Beston Group Co.,Ltd, divisione per la protezione ambientale di Henan Golee Holding Group, responsabile della promozione di soluzioni di rigenerazione delle risorse, produzione di apparecchiature e implementazione di progetti nel mercato globale, con sede legale presso la città di Zhengzhou, provincia di Henan, Cina e con sede dell'impianto produttivo presso Xiwang RD, area del cluster industriale, Shangqiu City-476000, Cina.

Beston Group è principalmente impegnata nella produzione di apparecchiature per il riciclaggio di rifiuti di plastica/pneumatici/gomma, trattamento dei fanghi oleosi, riciclaggio di biomasse, gestione dei fanghi di depurazione e riciclaggio della carta, nonché soluzioni tecniche di imballaggio, servizi di installazione e messa in servizio, servizi di gestione di progetti. Al momento vanta 15,000 m^2 di impianti industriali, più di 300 lavoratori attivi e oltre 10 anni di esperienza nel settore. Oltre alla Cina continentale, Beston Group ha esportato prodotti in oltre 100 paesi e regioni dei 6 continenti di tutto il mondo, tra cui Asia, Europa, Nord America, Sud America, Africa e Oceania (Fig. 27). Tutti i dati riportati in seguito sono stati reperiti navigando il sito dell'azienda (https://bestonasia.com/charcoal-making-machine/) in aggiunta al prospetto tecnico inviato dallo stesso Sales Manager previa richiesta di informazioni.

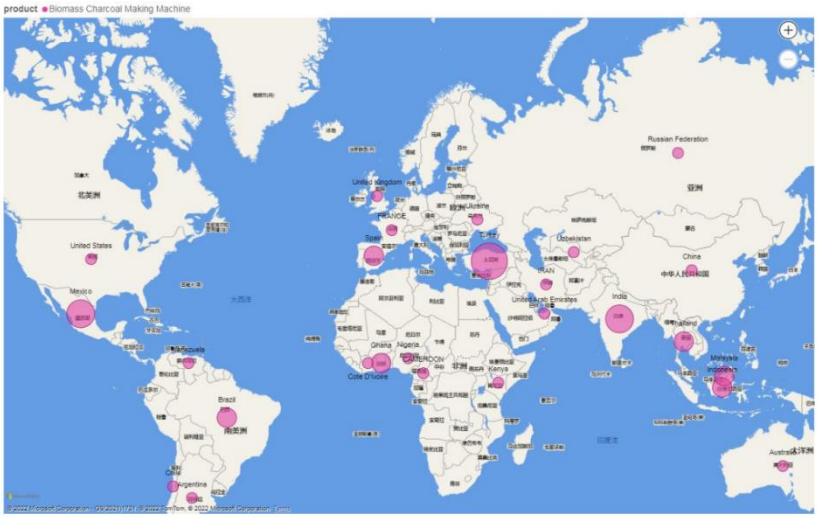


Figura 27. Localizzazione dei progetti attivi Beston Group Ltd. nel 2022.

9.1. Investimento iniziale, design, struttura e trasporto

9.1.1. BST-05 Pro Skid-mounted

Per il caso ITA.1, si è scelto un impianto produttivo di piccola scala denominato dall'azienda cinese BST-05 Pro. Nella Tab. 11, viene riportato il prospetto tecnico dell'impianto.

In Fig. 28 e 29, viene raffigurato il modello 3D dando evidenza dei componenti di cui è dotato. Si tratta dell'impianto con throughput produttivo più basso dell'intera gamma di reattori offerta dall'azienda cinese, capace di pirolizzare 0,3 t hr^{-1} di biomassa in input per un totale di 2592 t yr^{-1}, a fronte di una produzione media di biochar pari al 30%, ovvero circa 778 t yr^{-1}.

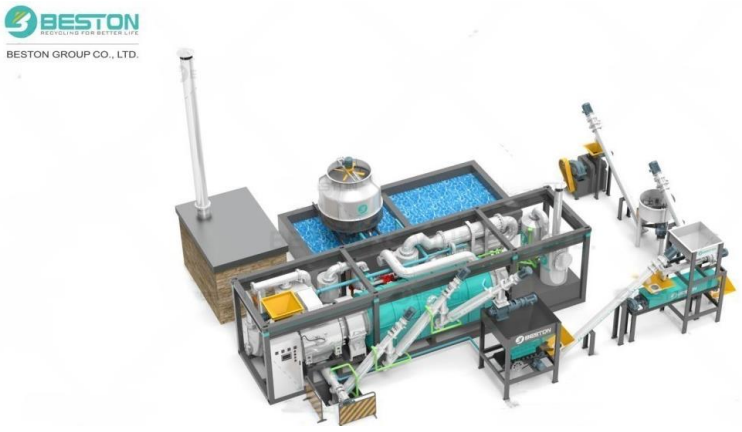


Figura 28. Modello 3D raffigurante l'impianto BST-05 Pro.
Fonte: Beston Group Ltd.

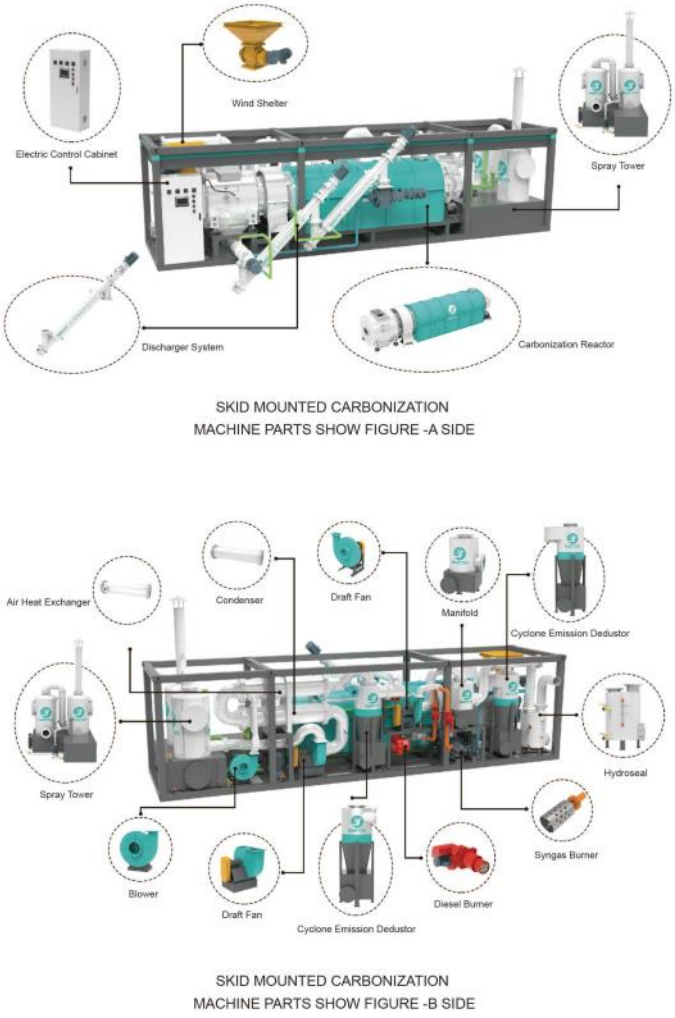


Figura 29. Modello 3D dell'impianto BST-05 Pro e delle sue componenti.
Fonte: Beston Group Ltd.

Come afferma il Sales Manager di Beston, il BST-05 Pro è stato progettato per rispondere a quella crescentenecessità da parte dei nuovi clienti di condurre prima test pilota per calibrare il proprio business e solo dopo investire in impianti in grado di pirolizzare quantità di biomassa in input più elevate. In questo senso, Beston è riuscita a contenere il prezzo dell'investimento richiesto, circa $75'000, a fronte di un prodotto che garantisce 8 anni di vita utile d'esercizio (allungabili di altri 6 come teorizzato nei prossimi casi grazie ad una manutenzione speciale) nonostante il reattore sia *always full heated*.

CASE 1. - BST-05 PRO (Skid-mounted)		
Dryer	yes	
Life span (WC)	8	yrs
Life span (BC)	12	yrs
Production Time + LT	120	d
Warranty	18	months
Installation type	(Self) Online guidance	
Mobile	yes	
Average input capacity	0,3	T/hr
Feeding requirements		
Processing Time	45	min
size (up to)	0,2	m
moisture (up to)	15	%
Preheating time	1	h
Min Carbonization Temperature	380	°C
Max Carbonization Temperature	550	°C
Min Furnace Temperature	450	°C
Max Furnace Temperature	750	°C
Land for equipment (L*W*H)		
L	10	m
W	8	m
H	3.9	m
Weight	15	ton
Energy consumption	720	kwh/day
Natural Gas Consumption	34,3	m3/day
Working method	fully continuos	
Structure	Double barrel single hearth	
Min speed	1	RPM
Max speed	9	RPM
Control Method	Automatic	
Reactor Material	Q245R	
Pressure	Micro negative pressure	
Heating material	Diesel, natural gas, heavy oil, biomas, etc.	
Heating method	Direct	
Max noise	80	dB
Condenser	Circulating water cooling	
Rotation Method	External gear rotation	

Tabella 11. Prospetto tecnico dell'impianto BST-05 Pro.

Il suo design si presenta compatto grazie all'ingegnerizzazione della disposizione di tutti i suoi componenti, rendendo possibile una sua miniaturizzazione funzionale alla delivery dal momento che è necessario un solo 40-foot high cube container per il trasporto (40HQ, dimensioni esterne, (L)12.19m x (W)2.44m x (H)2.99, interne (L)12m x (W)2.35m x (H)2.58m), il che minimizza i costi di shipping dell'impianto da Qingdao (Cina). La struttura, inoltre, è stata pensata per essere incapsulata in quella che l'azienda cinese chiama *skid-mounted configuration,* simile ad un esoscheletro in grado di facilitarne lo spostamento da una sede all'altra qualora il cliente necessiti di un impianto in grado di affrontare viaggi. Un altro vantaggio lato client risiede nella facilità di assemblaggio finale poiché il 95% del montaggio viene completato nel sito industriale di origine e per questo, l'investimento iniziale non concerne alcun costo aggiuntivo per i tecnici Beston poiché la parte rimanente dell'installazione viene supervisionata online da tecnici specializzati.

Se necessario, è possibile aggiungere al plant-layout pensato per il BST-05 Pro un dryer Beston come visualizzato in Fig. 30. Nel caso italiano, non è stato aggiunto poiché la moisture content della biomassa selezionata si attesta al di sotto del 15%, ovvero sottosoglia ottimale e quindi non si palesa la necessità di installare un essiccatore. Per quanto riguarda il caso brasiliano, invece, è stato inserito nel potenziale investimento iniziale data la maggiore umidità sia a livello atmosferico nella regione di produzione sia nella biomassa in input, la quale non comprende solo residui di torrefazione

pellettizzati (secchi) come nel caso italiano, ma tutti gli altri potenziali scarti ottenibili dalla lavorazione primaria della raccolta di caffè (potature arboree, polpa della ciliegia del caffè, c.d. cascara). In quest'ultimo caso, sarebbe necessario un 20HQ container aggiuntivo e un delta costo di circa $20'000-$30'000.

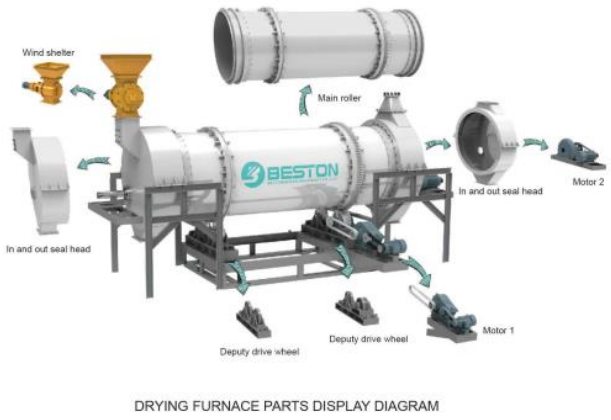


Figura 30. Dryer Beston.
Fonte: Beston Group Ltd.

In Fig. 31 sottostante vengono riportati tutte le caratteristiche dei componenti assemblati, le quali funzioni verranno descritte nello specifico nei paragrafi seguenti.

No.	System	Description	Quantity	Unit	Picture
Carbonization Line					
1	Cache silo	840X840XH400	1	set	
2	Air Lock	250	1	set	
3	Screw feeder	ø273 X750	1	set	
4	Carbonization Line	Reactor: Φ830XΦ490XL5880	1	set	
		Casing1: φ1280XL3500 Casing2: φ1230XL3500			
		Drive: ZQ350-40-I-Z 4KW			
		Combustion system	1	set	
5	Discharging air lock	250	1	set	
6	Syngas system	Manifold: Φ600xH1100	1	set	
		Hydroseal: Φ550xH1060	1	set	
		Gas cyclone dust removal	1	set	
7	Dedustor	Flue condenser	1	set	
		Water Tank			
		Spray device	2	sets	
		Chimney	1	set	
8	Discharger	Water cooling φ194Xφ273XL2400	2	sets	
9	Cooling Tower	30T	1	set	
10	Controller	PLC	1	set	
11	Frame system	L9285XB2250XH2500	1	set	
12	Spare Parts	One year	1	set	

Figura 31. Riepilogo delle componenti pre-assemblate nell'impianto BST-05 Pro.
Fonte: Beston Group Ltd.

9.1.2. BST-10 e BST-30

Per il caso ITA 2 e BRA 3, si è scelto di affidare la produzione ad un impianto di media scala denominato dall'azienda cinese BST-10 (nel caso brasiliano saranno installati due impianti BST-10 presso due fornitori di biomassa brasiliani differenti come precedentemente anticipato. In Fig. 32, viene raffigurato il modello 3D per entrambi gli impianti mentre in Tab. 12 viene riportato il loro prospetto tecnico.

	ITA 2/BRA 3 - BST-10	CASE 4. - BST-30 in one location	
Dryer	yes	yes	
Life span (WC)	6	6	yrs
Life span (BC)	8	8	yrs
Production Time + LT	120	120	d
Warranty	18	18	months
Installation type	Normal	Normal	
Mobile	yes	no	
Average input capacity	0,3	3	T/hr
Feeding requirements			
Processing Time	45	45	min
size (up to)	0,2	0,2	cm
moisture (up to)	15	15	%
Preheating time	90	90	min
Min Carbonization Temperature	300	300	°C
Max Carbonization Temperature	650	650	°C
Min Furnace Temperature	450	450	°C
Max Furnace Temperature	750	750	°C
Land for equipment (L*W*H)			
L	35	40	m
W	15	15	m
H	7	7	m
Weight	15	35	ton
Energy consumption	1440	2160	kwh/day
Natural Gas Consumption	102,9	68,57	m3/day
Working method	fully continuos	fully continuos	
Structure	Double barrel single hearth	Double barrel double hearth	
Min speed	1	1	RPM
Max speed	9	9	RPM
Control Method	Automatic	Automatic	
Reactor Material	Q245R	Q245+310S	
Pressure	Micro negative pressure	Micro negative pressure	
Heating material	Diesel, natural gas, heavy oil, biomas, etc.	Diesel, natural gas, heavy oil, biomas, etc.	
Heating method	Direct	Direct	
Max noise	80	80	dB
Condenser	Circulating water cooling	Circulating water cooling	
Rotation Method	External gear rotation	External gear rotation	3

Tabella 12. Prospetto tecnico degli impianti BST-10/30.

In Fig. 33, invece, data la maggior complessità strutturale degli impianti di media e medio-grande scala, viene riportato il plant-layout sotto forma di disegno tecnico. Il BST-10 corrisponde all'impianto con un throughput produttivo medio rispetto all'intera gamma di reattori offerta dall'azienda cinese, capace di pirolizzare 1 t hr^{-1} di biomassa in input per un totale di 8640 t yr^{-1}, a fronte di una produzione media di biochar pari sempre al 30%, ovvero circa 2592 t yr^{-1}. Per quanto concerne il BST-30, invece, l'impianto è da considerarsi medio-grande scala, riuscendo a pirolizzare fino a 3 t hr^{-1} di biomassa in input per un totale di 25920 t yr^{-1}, a fronte di una produzione media di biochar di circa 7776 t yr^{-1} (+300% rispetto al caso ITA.2 e +150% rispetto al caso BRA.3 che vede l'installazione di due BST-10)

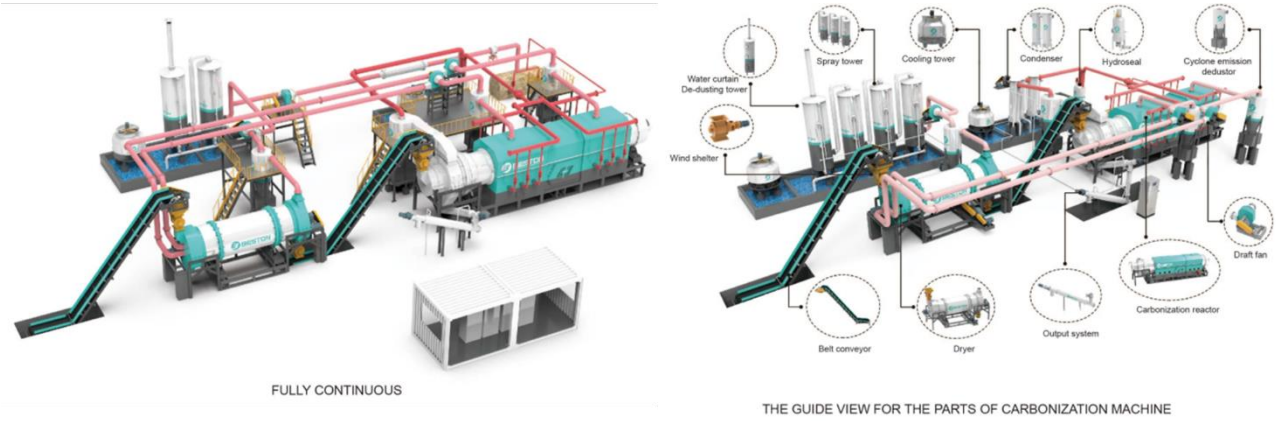


Figura 32. Modello 3D degli impianti BST-10/30 e delle loro componenti.
Fonte: Beston Group Ltd.

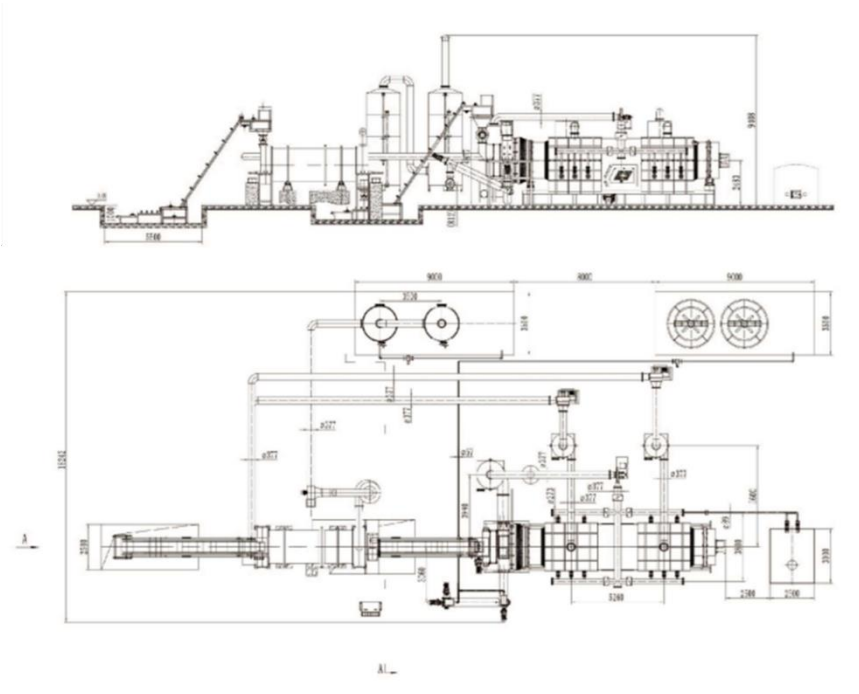


Figura 33. Disegno tecnico del plant-layout per gli impianti BST-10/30.
Fonte: Beston Group Ltd.

Anche in questo caso, Beston è riuscita a contenere il prezzo dell'investimento richiesto per entrambi i reattori in esame, circa $200'000 per il BST-10 e $300'000-$350'000 per il BST-30. Ad entrambi vengono garantiti 8 anni di vita utile d'esercizio più altri 6 previa manutenzione speciale, sempre alle stesse condizioni *always full heated*.

Al contrario del BST-05 Pro, dove il design compatto e la miniaturizzazione funzionale dell'intero impianto rendevano il trasporto poco dispendioso, per entrambi i reattori il processo di delivery

risulta maggiormente costoso da Qingdao (Cina) dal momento che sono necessari 4*40 HQ containers per il trasporto per il BST-10 (dunque 2*4*40 HQ cont. Per il caso BRA.3) e 5*40 HQ containers per il BST-30. Entrambi gli impianti, una volta installati, non possono essere trasportati data la loro complessità e dimensione poiché il BST-10 occupa un'area pari a (L)35m x (W)15m sviluppandosi fino a 7m di altezza mentre il BST-30 presenta un range dimensionale pari a (L)40m x (W)15m x (H)7m. L'assemblaggio avviene totalmente presso il sito di destinazione richiede circa quaranta giorni per essere ultimato, compreso il periodo di setting finale; come si può osservare nello scheduling sottostante (Fig. 34) l'installazione viene seguita da due tecnici Beston specializzati in loco al fine di supervisionare i lavori degli idraulici, saldatori e muratori assunti per curare la posatura e calibratura delle tubature, l'assemblamento delle componentistiche che richiedono saldature e la preparazione del fondo (fondazioni, basamento, ecc..) rispettivamente.

NO	Project schedule name	The start time	required time	The end time	explain	remarks
1	Make the foundation	2021/01/01	4	2021/01/05	Foundation drawing, use embedded parts to make foundation	Construction workers
2	Base, furnace insulation layer	2021/01/05	4	2021/01/09	Weld iron mesh to make refractory layer	Construction workers and welders
3	Installation of main reactor	2021/01/09	2	2021/01/11	hoisting the base and main reactor	Cranes and hoisting workers
4	Reaction kettle head, dryer drum hoisting	2021/01/11	3	2021/01/14	Sealing installation of the head and installation of the dryer	Cranes and hoisting workers
5	Casing installation	2021/01/14	1	2021/01/15	Installation of reducer and other accessories.Casing installation	Cranes and hoisting workers
6	Install dryer head, disconnecting shaft	2021/01/15	2	2021/01/17	Dryer related accessories	Cranes and hoisting workers
7	Belt conveyor installation	2021/01/17	1	2021/01/18	Assemble the belt conveyor and lift it	Cranes and hoisting workers
8	Dust removal system installation	2021/01/18	5	2021/01/23	Dust removal tower, fan and pipe connection	welders
9	Combustible smoke pipe connection	2021/01/23	6	2021/01/29	Accessories installation and fan pipe welding	welders
10	Finished carbon transfer system	2021/01/29	5	2021/02/03	Accessories and line welding	welders
11	Power system installation	2021/02/03	2	2021/02/05	Motor installation and line laying	The electrician
12	Trial operation, worker training	2021/02/05	5	2021/02/10		
13	A total of time	2021/01/01	40	2021/02/10	**The actual installation time depends on the work efficiency and working environment of the customer site.**	

Figura 34. Scheduling del processo di installazione di un impianto BST-10/30.
Fonte: Beston Group Ltd.

9.1.3. Dryer e biotrituratori

Come si può osservare sia dal modello 3D, sia nella sua trasposizione tecnica, a differenza del BST-05, per entrambi i due impianti e prevista d'ufficio l'installazione di un dryer al fine di essiccare la biomassa in input fino alla percentuale di umidità ottimale desiderata (10%-15%). Se per il caso ITA.1 BST-05 Pro il dryer si è detto superfluo data la condizione ottimale di partenza della biomassa in input e delle condizioni metereologiche non avverse, per il caso ITA.2 BST10 non si può dire lo stesso poiché, oltre agli scarti di torrefazione (silverskin) pallettizzati, si è deciso di saturare la capacità con scarti derivanti dalla prima lavorazione di colture cerealicole e dei processi di sgusciatura di frutta secca (noci, nocciole, mandorle), il quale moisture content non è conosciuto e probabilmente soprasoglia rispetto a quello ottimale. Per quanto riguarda, invece, i casi brasiliani BRA.3 2xBST-10 e BRA.4 BST-30, i residui post-raccolto eccedono sicuramente la percentuale di umidità prestabilita, complice anche un clima molto umido, il che rende essenziale la presenza di un essiccatore. Il prezzo d'acquisto pari a $20'000-$30'000 è incluso in partenza all'interno dell'investimento iniziale stimato per tutti e i tre casi sopracitati.

In aggiunta, se per il caso ITA.1 gli scarti di torrefazione possiedono mediamente una dimensione non eccedente il limite consigliato di 20 mm, la grandezza della biomassa in input per gli altri casi (scarti derivanti dalla prima lavorazione di colture cerealicole e dei processi di sgusciatura di frutta secca per il caso ITA.2 e cascara mista a scarti potatura arborea per i casi brasiliani) risulta over-limit, cioè >20 mm, e pertanto si è considerato l'aggiunta un biotrituratore per caso. Nello specifico avremo:

- ITA.2 BST-10: si è scelto il biotrituratore cingolato movibile ELIET Superprof Cross Country 2015 Max Zr Abm-Vanguard EFI B&S[29] (Tab. 13). Come riportato nella scheda tecnica (Tab. 13sx), il costo di investimento iniziale è pari a $27'535,40 mentre i costi di manutenzione sono stati aggiunti a quelli annuali del reattore. Supponendo un tasso di arrivo della biomassa da cippare diluito nel tempo, il crusher di ELIET non dovrebbe rivelarsi collo di bottiglia nel processo di produzione del biochar poiché, grazie alla sua capacità di taglio di 6,5 $m^3 hr^{-1}$, è in grado di svolgere la sua funzione in meno di 100 giorni anno. Per quanto riguarda i consumi di benzina sono stati sommati a quelli di gas naturale dell'impianto calcolati ai prezzi correnti di vendita del carburante in Italia.

ELIET SUPERPROF CROSS COUNTRY 2015 MAX ZR ABM-VANGUARD EFI B&S		
Fuel Crusher		
Cost	**$**	**27.535,40**
Grindable diameter [mm]		140
Number of blades (HSS steel)		24
Shredding width [mm]		480
Transmission		XPA 2120/2 V-belt
Hydraulic feed roller		yes
EcoEye device		yes
ABM engine anti-lock system		yes
Hydraulic traction		yes
Dimensions (LxWxH) [mm]		2000x890x1450
Weight [Kg]		506
Capacity [m³/hr]		**6,5**
Fuel Compsumption (L/hr)		5,5
Biomass to be crushed [t/yr]		6.315
Hours needed to crush biomass [hrs]		**971,6**
Working days		**97,16**
Fuel Compsumption (L/yr]		**5343,7**
Gasoline cost - Italy [$/L)	$	1,70
Annual Fuel Cost [$/yr]	**$**	**9.084,23**

Tabella 13. Raffigurazione (dx) e prospetto tecnico (dx) del biotrituratore cingolato movibile ELIET Superprof Cross Country 2015 Max Zr Abm-Vanguard EFI B&S.

- BRA. 3 2xBST-10: in questo caso, si è scelto il biotrituratore R335BK38ON-M Crusher NEGRI, dotato di un motore KOHLER ECH980[30] (Tab. 14). Dovendo installare due reattori in due

[29] Scheda tecnica e informazioni sul rivenditore disponbili al link: https://www.centroverderovigo.com/it/prod/biotrituratore-a-scoppio-eliet-cingolato-2510097-4863?q=eliet%20superprof%20cross%20country%202015%20max%20zr%20abm-vanguard%20efi%20b&s&trkParms=OOjfBHfRN0QHGro4cCWf8A%3d%3d.

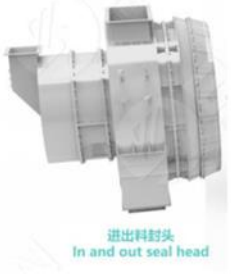
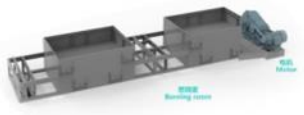
[30] Scheda tecnica e informazioni sul rivenditore disponbili al link: https://www.centroverderovigo.com/it/prod/biotrituratore-r335bk38on-m-negri-6494?trkParms=YQ1VvuKSyd7jqoNiIMRu5sZocolAzs5sUwKuN7IEAXMajj5NevUV2Q%3d%3d.

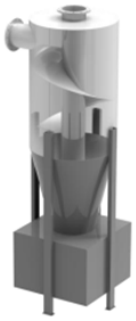
locazioni geografiche differenti (plant 1 e plant 2) con domanda di cippatura superiore pari a 8257 tyr^{-1} e 8640 tyr^{-1} rispettivamente, si è scelto di affidare il compito ad un crusher con capacità superiore (18 m^3hr^{-1}). Come riportato nella scheda tecnica (Tab. 14dx), il costo di investimento iniziale è pari a $30'000 per macchinario acquistato, per un totale di $60'000 complessivi. Anche in questo caso, i costi di manutenzione e i costi relativi al consumo di carburante (calcolati ai prezzi correnti di vendita del carburante in Brasile) sono stati aggiunti a quelli annuali dei due reattore.

R335BK38ON-M CRUSHER NEGRI, ENGINE KOHLER ECH980		
Fuel Crusher		
	Plant 1	Plant 2
Cost	**$ 30.000**	**$ 30.000,00**
Grindable diameter [mm]	160	
# Reversible mobile hammers (hardened steel)	68	
Shredding width [mm]	390	
Engine	KOHLER ECH980 hp38	
OBS - On Board control System	yes	
ABM engine anti-lock system	yes	
Belt drive with fluid coupling	yes	
Dimensions (LxWxH) [mm]	3629x1580x2320	
Weight [Kg]	750	
Capacity [m³/hr]	**18**	**18**
Fuel Consumption [L/hr]	8,8	8,8
Biomass to be crushed [t/yr]	8.257	8640
Hours needed to crush biomass [hrs]	**458,7**	**480,0**
Working days	**45,87**	**48,00**
Fuel consumption [L]	**4036,5**	**4224,0**
Total Fuel Consumption	**8260,5**	
Gasoline cost - Brazil [$/L]	1	
Annual Fuel Cost [$/yr]	**$**	**8.260,51**

Tabella 14. Raffigurazione (dx) e prospetto tecnico (dx) del biotrituratore R335BK38ON-M Crusher NEGRI, dotato di un motore KOHLER ECH980.

In Fig. 35, invece, viene riportato il prospetto tecnico di ogni componente prevista nell'impianto, le quali descrizione vengono riportate nei prossimi paragrafi.

System	Item	Quanti	Unit	Specification	Picture
Dryer line					
Dryer system	1300 dryer	1	set	1300	
Carbonization Line					
Carbonization Host	Inner & Outer Cylinder	1	Set	Φ1300	
	Socket Set	1	Set	Q245R+Q235	
	Gear Base	1	Set	Q245+ZG45	
	Wheel Base	1	Set	Q235+ZG45	
	Sealant Ring	1	Set	/	
	Driving System	1	Set	ZQ400 With Frequency Motor 7.5kw	
	Reactor Base	1	Set	Q235B	 
	Casing Lower	4	Set	Q235B	
	Upper Casing	2	Set	Q235B	
	Socket Base	1	Set	235B	
	Rear Base	1	Set	Q235B+ZG45	
	Anti-Explosion Device	1	Set	/	
	Smoke Blocker	8	Set	Q235B	
	Driving Case	1	Set	Q235B	
	Driving Cover	2	Set	/	
	Mechanical Thermometer	3	Set	With Weilding Screw	
	u Type Pressure Gauge	1	Set	With Pipes	
	Accessories	1	Set	/	

Air-Lock Vale Feeding	450 Air-Lock Valve	1	Set	3kw	
Air-Lock Vale Dishcarging	450 Air-Lock Valve	1	Set	3kw	
Cooling Discharger	325 Cooling Discharger	1	Set	3kw	
	Cooling Discharger Two	1	Set	3kw	
	Centrifugal Water Pump	1	Set	5.5kw	
Syngas System	Syngas Outlet	1	Set	/	
	Cyclone Dedustor	1	Set	Square Head	
	Hydro-Seal	1	Set	ϕ700，Height 1000	
	High Pressure Centrifugal Fan (9-19-№4.5c-4kw)	1	Set	（Right 0°）Stainless Steel, Explosion-Proof	
	Combustible Induced Draft Fan Connecting Pipe	1	Set	/	
	Gas Outlet	1	Set	/	
	89-180 New Nozzle	14	Piece	/	
Burning System	Syngas Valve	1	Set	DN250,PN10	
	Syngas Valve	4	Set	DN200,PN10	
	Plug Valve	14	Set	DN80，PN10	
	Ignition Control Cabinet	1	Set	With Accessories	
	Igniter	14	Set	Including Ignition Gun	
De-Dusting System	Cyclone	2	Set	Round Head	
	Boiler Centrifugal Induced Draft Fan	2	Set	5.5kw*2, Frequency Control	
	Turn Head 1	2	Set	/	
	Turn Head 2	2	Set	/	
	Spray Tower	1	Set	/	
	Chimney	1	Set	/	
	Ceramic Ring	9	Bag	ϕ38x38	
	Water Pump	1	Set	5.5kw	
	Inlet Air Closer	1	Set	2.2kw	
	Outlet Air Closer	1	Set	2.2kw	

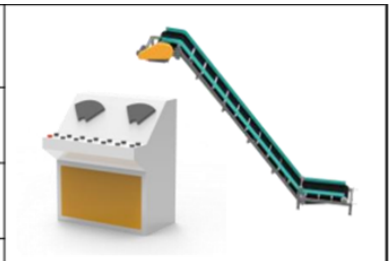
Feeding System	Big Angle Conveyor 4680mm	1	Set	4kw	
Storage Bin	Matched	1	Set		
Control Panel	Control Panel	1	Set	Plc	
Accessories	Bolts, Nuts, Gaskets, Valves...				
Syngas Pipping	Pipping	30+30+70	Meter	Standard Configuration	
De-Dusting Pipping	De-Dusting Pipping	70	Meter	ϕ373x4	
Cooling Tower	100t	2	Set	/	
IOT	**Internet Of Things**	**1**	**Set**	**/**	**Controlling System**

Figura 35. Riepilogo delle componenti pre-assemblate negli impianti BST-10/30.
Fonte: Beston Group Ltd.

9.2. Carbonization Line: il reattore

Di base, tutti e tre gli impianti selezionati sfruttano lo stesso tipo di reattore (orizzontale, double layer) e condividono lo stesso flow chart, a cambiare è solo il dimensionamento e il numero di componenti per tipologia. Nello specifico, il reattore è fabbricato con doppio rivestimento, quello esterno in acciaio cinese Q245R mentre all'interno è stato applicato un film di acciaio inossidabile 310S per garantire maggiore vita utile dell'impianto stesso. Il BST-05 Pro (caso ITA.1) presenta una fornace di un diametro di Ø0,83m, il BST-10 (caso ITA.2 BRA.3) di Ø1,3m mentre il BST-30 (caso BRA.4) di Ø1,7m. Per tutti gli impianti scelti, la fornace si presenta incastonata tra doppia testa di tenuta posizionate davanti e in coda al reattore, utili all'incapsulamento del *main roller* al secondo layer cilindrico. Quest'ultimo è a sua volta protetto da una carcassa di protezione esterna (casing). Alla prima testa è installato un wind shelter (o air lock) utile a non disperdere la biomassa in attesa di processamento (funge anche come primo buffer di attesa o cache silo post-load tramite montacarichi). All'interno è montato un screw feeder (alimentatore a vite) che scandisce e regola la portata di biomassa in entrata. La fornace è appunto composta da un double layer barrel cilindrici al fine di massimizzare la resa termica (double-return heating structure); inoltre, è stato aggiunto uno scambiatore di calore ad aria (air heat exchanger) che sfrutta il calore dei gas esausti di combustione per scaldare aria la quale viene direzionata a sua volta all'interno del reattore al fine di aumentare la resa termica del 5%-10%. All'interno della fornace, non c'è contatto diretto tra le fiamme e la biomassa al fine di evitare la contaminazione del biochar ad opera dei gas esausti esalati dalla combustione stessa e minimizzare la dispersione termica; la combusione della miscela di ossigeno e

gas metano (flue gas) avviene infatti nella camera di combustione (burning room) posizionata al di sotto dell'involucro esterno contenente il main roller. In questo caso, contrariamente alla Fig. 36 dove viene raffigurato un reattore double barrel – double heart BST-10/30 (ovvero con due camere di combustione), il BST-05 Pro è classificato come un reattore double barrel – single heart in quanto una sola burning room appaga il fabbisogno termico del reattore di piccola scala.

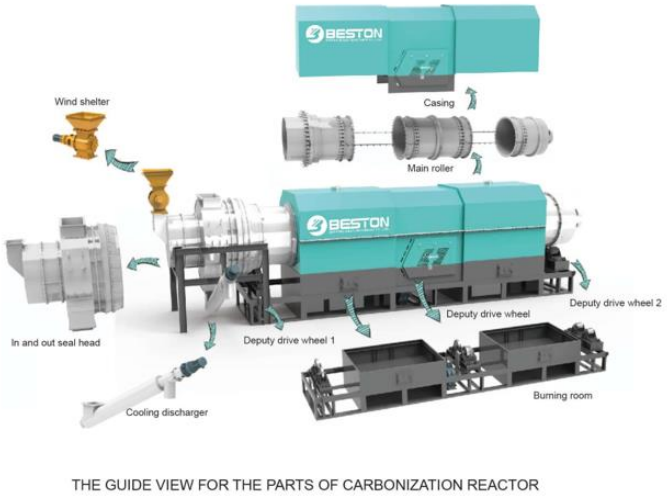


Figura 36. Raffigurazione della struttura e delle componenti del reattore assemblato in tutti gli impianti. Fonte: Beston Group Ltd.

Il tempo medio per riscaldare il main roller è di circa 60-90 min a seconda delle dimensioni del reattore e della temperatura di combustione desiderata. Il consumo stimato per portare il reattore alla temperatura di processo selezionata è di circa 120 m^3 di gas metano per il BST-05 Pro, 180 m^3 per il BST-10 e 240 m^3 per il BST-30. Il reattore è stato progettato per operare in condizioni always full-heated per 6*24h cicli; al termine dei cicli prestabiliti il reattore va spento per eseguire le operazioni manutentive di pulizia ordinaria. Si è assunto che la perdita di rateo produttivo derivante dallo spegnimento per la manutenzione viene ampiamente ripagata dall'aumento della vita utile dell'impianto che ne deriva. La combustione scalda la fornace dove il main roller è in continua rotazione (velocità 1-9 Rpm mantenuta costante tramite due external gears nel caso del BST-05 Pro, tre nel BST-10/30) mantenuto a pressione negativa in assenza di ossigeno al fine di massimizzare l'efficienza termica dell'impianto (70-80%) e proddure high-quality biochar. All'aumento del tempo di carbonizzazione (in media 20-30 minuti) e all'aumento della temperatura di combustione (500-600 °C), la "purezza" del biochar ottenuto sarà maggiore (aumenta la percentuale di carbonio in forma stabile, ovvero, aumenta l'efficienza del processo di carbonificazione), mentre il rapporto di carbonio diminuisce (la ratio comunque si assesta a 2,8-3:1). Al contrario, l'aumento della velocità di rotazione della fornace può migliorare il rapporto biomassa in input – biochar prodotto ma comunque abbasserebbe il contenuto di carbonio fisso all'interno del prodotto finito.

L'avanzamento della biomassa è da imputare ad una vite elicoidale (avanzamento a "coclea continua"), anch'essa in continua rotazione, la quale garantisce uniformità di cobustione per un determinato tempo di residenza prefissato (<60 min, è come fosse il *clock* dell'impianto) per qualsiasi temperatura e spin scelti. In ogni caso, il residence time può essere monitorato ed esso dipende

fondamentalmente dalla percentuale di umidità della biomassa, dalla misura delle singole unità di biomassa e dalla temperatura di reazione, da cui dipendono principalmente le caratteristiche chimico-fisiche desiderate del biochar.

9.3. Energy saving effect e gestione dei gas esausti

La società produttrice dichiara che la temperatura di carbonizzazione del materiale è generalmente di 380-650 °C mentre la temperature raggiunte nella fornace variano nel range 450-750 °C. Grazie al sistema di riutilizzo dei GHG emessi durante il processo di pirolisi, Beston assicura che in configurazione standard (T = 450-500 °C circa) la maggior parte del consumo di gas metano avviene nella sola fase di riscaldamento del reattore (pre-heating phase) garantendo una quasi-totale autonomia della combustione. Tuttavia, come riportato nel Regolamento Delegato (UE) 2021/2088 della Commissione del 7 luglio 2021 che modifica gli allegati II, III e IV del regolamento (UE) 2019/1009 del Parlamento europeo e del Consiglio al fine di aggiungere i materiali di pirolisi e gassificazione come categoria di materiali costituenti nei prodotti fertilizzanti dell'UE[31], il rapporto molare H/C_{org} deve mantenersi stabile sotto lo 0,7; pertanto, dai case studies reperiti in letteratura, si consiglia una temperatura di combustione intorno ai 600 °C[32]. Quest'ultima impone un apporto di combustibile che eccede il quantitativo di combustibile che l'impianto è in grado di generare sia dal riutilizzo dei gas esalati dal processo di combustione, sia dalla raccolta di bio-olio (tar) che, una volta depurato, garantisce un alto potere calorifico. Ovviamente a maggiori temperature di combustione corrisponderanno maggiori consumi di flue gas e per questo motivo si è scelto di attribuire ai consumi annuali di ogni reattore (120 m^3/w * 52 w/yr, 180 m^3/w * 52 w/yr, 240 m^3/w * 52 w/yr) un fattore moltiplicativo x2.

[31] Disponibile al link: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R2088

[32] Valutazione espressa nell'ambito della ricerca dal Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI – Politecnico di Torino)

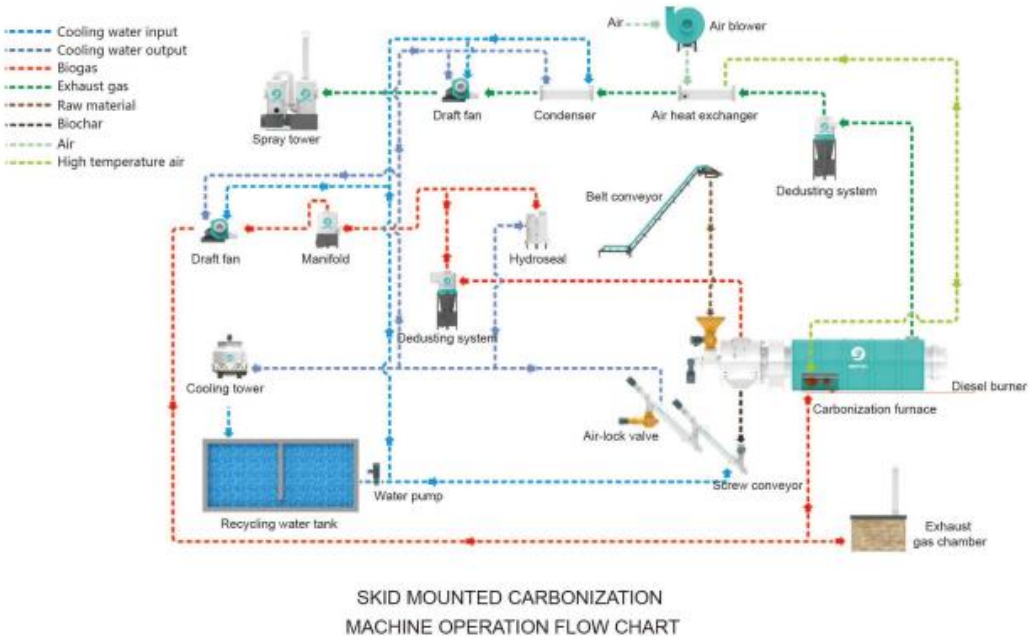


Figura 37. Operational flow chart per un impianto BST-05 Pro.
Fonte: Beston Group Ltd.

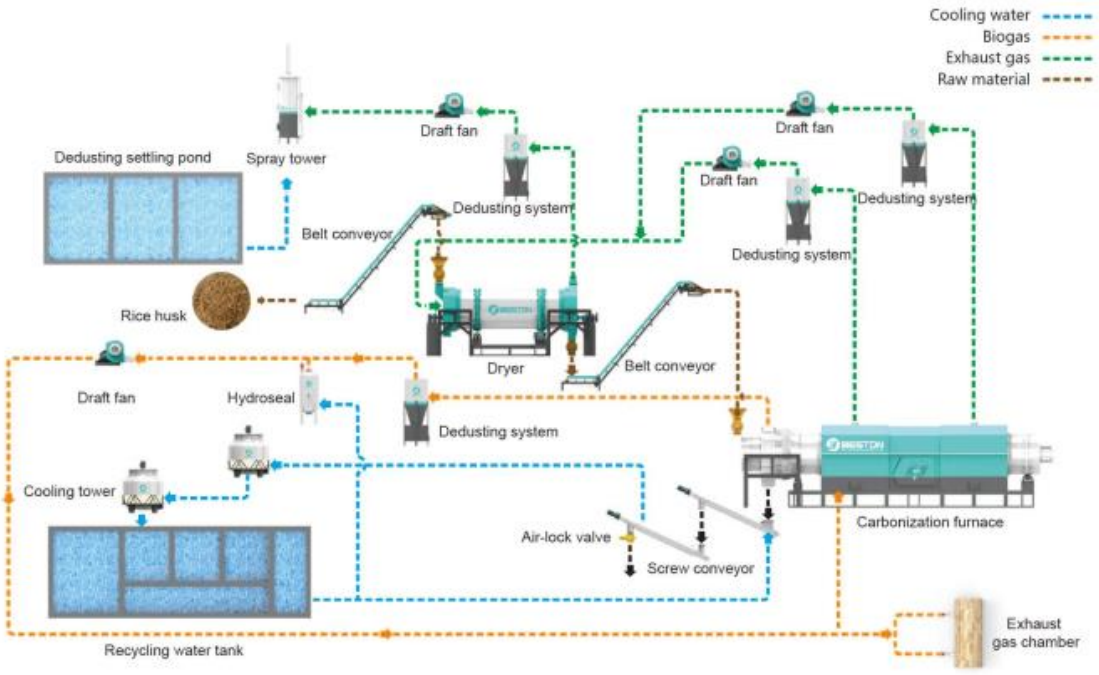


Figura 38. Operational flow chart per gli impianti BST-10/30.
Fonte: Beston Group Ltd.

Il flow chart, invece, differisce per il solo numero di componenti in gioco per tipologia poiché il funzionamento generale di base rimane invariato (Fig. 37 e Fig. 38 a confronto). Nello specifico si possono osservare il seguente schema:

- Raw Material (linea marrone): se consideriamo il flow chart del BST-05 Pro (Fig. 37), essendo assente il dryer, la biomassa in input viene immessa direttamente nel cache silo tramite l'utilizzo di un montacarichi mentre per il BST-10/30, la biomassa deve subire prima la fase di essiccamento e solo dopo può essere caricata. Il rateo di immissione di biomassa all'interno del reattore è regolato un screw feeder. Qui la biomassa affronta la sua prima fase pirolitica, detta endothermic pyrolysis stage.
- Biogas (linea rossa in Fig. 37 e arancione in Fig. 38): durante l'endothermic pyrolysis stage (200-270 °C) la biomassa in entrata incomincia a degradarsi rilasciando principalmente CO2 e H2S, gas che vengono recuperati e purificato tramite un cyclone emission dedustor dalle polveri pesanti di cui sono carichi. Una volta completata questa prima operazione di purificazione, viene sfruttata l'elevata temperatura del biogas per trasformare acqua in entrata (linea blu) in vapore che, grazie ad un draft fan, viene sospinto fino all'intersezione della pipeline che trasporta altro vapore dal condenser (linea azzurra) per poi terminare nella cooling tower, la quale lo raffredda e lo riporta allo stato liquido per ultimare il riciclo dell'acqua all'interno del sistema (il recycling water system è meglio descritto nel flow chart in Fig. 37 mentre, anche se presente, non è stato raffigurato per il BST-10). Dopo questo step, il biogas viene direttamente trasferito attraverso un sistema di tubature all'interno della fornace per una seconda combustione (mediante un syngas burner).
- Gas esausti (linea verde scuro): essi vengono esalati direttamente dalla combustione di gas naturale, bio-olio e biogas durante la seconda fase pirolitica, detta carbonization stage (500-700 °C). Essi vengono fatti confluire prima all'interno di un cyclone emission dedustor per portare a termine il loro processo di purificazione, e dopo all'interno di uno scambiatore di calore alimentato ad aria tramite un air blower (questo passaggio è stato raffigurato nel flow chart in Fig. 37 mentre, anche se presente, non è stato riportato per il BST-10). Qui i gas cedono il loro calore per convezione all'aria (linea verde chiaro in Fig. 37) che, nel caso del BST-05 Pro, viene direttamente fatto confluire all'interno della fornace per aumentare la resa termica del sistema e diminuire il più possibile la dipendenza della combustione dall'immissione ulteriore di gas naturale mentre, nel caso del BST-10/30, va ad alimentare il processo di essiccamento all'interno del dryer. Che ci sia o meno quest'ultimo, i gas esausti procedono spediti verso il condenser (solo raffigurato in Fig. 37) al fine di far evaporare l'acqua in entrata. Al termine di quest'ultimo processo, i gas terminano il loro percorso all'interno di una spraying tower, dove viene usata una soluzione NaOH per assorbire la CO2 e altri inquinanti, così da abbattere sensibilmente dell'80%-90% l'inquinamento che deriverebbe da un loro rilascio in atmosfera e rendere effettivamente negativo il carbon footprint della produzione di biochar (per questo si parla anche di carbon removal emissions, poiché la quantità di carbonio in forma gassosa emessa per la produzione di una tonnellata di biochar è sensibilmente inferiore al carbonio stoccato in forma stabile all'interno del biochar stesso).
- Biochar (linea nera): passato il tempo utile per una carbonizzazione ottimale della biomassa in input, il biochar risultante viene raffreddato fino a 30 °C grazie ad un processo umido e trasportato tramite a più screw conveyor al buffer finale di fine processo.

9.4. Security system & monitoring

L'impianto scelto è dotato di un sistema di monitoring IoT, in grado di interpretare autonomamente sia situazioni di pericolo sia la raccolta di dati operativi di produzione e di processo live, evidenziando throughput rate, consumi ed eventuali malfunzionamenti, sistema che conferisce un alto livello di affidabilità all'impianto stesso.

Per quanto concerne la sicurezza dell'impianto, sono previste varie valvole di sicurezza, di cui una posizionata sulla coda della fornace (explosion-proof hole) la quale garantisce che non vengano mai raggiunte pressioni oltre i limiti consentiti dall'operatività standard, e le altre posizionate nelle tubature atte al trasporto dei gas, onde evitare eventuali accumuli di pressione e scongiurare esplosioni improvvise.

Per offrire la massima flessibilità di produzione, l'impianto è dotato di un PLC (Programmable Logic Controller" che elabora la serie di segnali digitali ottenuti dai sensori dislocati in punti strategici di controllo sull'intero impianto per offrire in real-time una serie di correzioni/customizzazioni di processo. Per esempio, sul BST-05 Pro sono installate 4 termocoppie in grado di rilevare la temperatura all'ingresso e all'uscita della fornace, nei punti di ingresso e di uscita dei gas esausti/biogas e così via. In questo caso, l'operatore è in grado di personalizzare l'afflusso di combustile all'interno della camera di combustione (e quindi la temperatura di combustione), la velocità di rotazione dell'inner barrel (e quindi stimare la densità del biochar), la frequenza del draft fan (ergo la portata di biogas all'interno del reattore e la velocità di scambio acqua-vapore), oltre a poter scegliere configurazioni standard prestabilite. Il PLC è dotato infine di un sistema di allarme qualora un guasto elettrico imponesse un malfunzionamento a qualsiasi componente dell'impianto.

10. Analisi del modello d'analisi adottato

10.1. Casi ITALIA: Analisi sulla biomassa in input al reattore

L'obiettivo è stato quello di andare a stimare la biomassa disponibile annuale da pirolizzare b_y^{av} e se questa saturasse o meno la capacità in input annuale del reattore b_y^{cap}, valore ottenuto moltiplicando la capacità oraria di assorbimento biomassa in input b_h^{plant} come segue:

$$b_y^{cap} = b_h^{plant} * 24\ hd^{-1} * 360\ dy^{-1}$$

La biomassa annuale disponibile è stata dedotta sommando quella presente nei due plant di raccolta b_y^{TO} e b_y^{Gatt} rispettivamente, ottenendo:

$$b_y^{av} = b_y^{TO} + b_y^{Gatt-TO}$$

dove:

- b_y^{TO}, biomassa di scarto pallettizzata derivante dal processo di torrefazione del caffè presente nello stabilimento di Torino, pari a 1250 $t\ y^{-1}$;
- $b_y^{Gatt-TO}$, biomassa di scarto pallettizzata derivante dal processo di torrefazione del caffè presente nello stabilimento di Gattinara e da trasportare a Torino, pari a 1075 $t\ y^{-1}$.

Il confronto tra b_y^{cap} e b_y^{av} determina se è necessario acquistare biomassa aggiuntiva per saturare la capacità del reattore (caso ITA 2) o se si debba considerare una production loss (caso ITA 1).

10.1.1. ITA 1. BST-05 Pro

Partendo dal caso ITA 1 BST-05, si ottiene $b_y^{cap} \geq b_y^{av}$ (utilization rate al 90% circa) portando ad una perdita di produzione di biochar pari al 30% della differenza (80 $t\ y^{-1}$):

$$Q_y^{Loss} = (b_y^{cap} - b_y^{av}) * 30\%$$

Se da una parte, dunque, non si è propeso per l'acquisto di biomassa aggiuntiva per andare a colmare la piena capacità del reattore, dall'altra comunque persiste la necessità di trasportare la biomassa presente nello stabilimento di Gattinara al sito produttivo installato a Torino, $b_w^{Gatt-TO}$:

$$b_w^{Gatt-TO} = \frac{b_y^{Gatt-TO}}{12\ weeks}$$

La quale necessita di $n_{trucks}^{Gatt.-TO}$, ovvero di 4 veicoli con capacità di trasporto di 25 t a settimana, calcolati come segue:

$$n_{trucks}^{Gatt.-TO} = \frac{b_w^{Gatt.-TO}}{Load_{truck}}$$

BIOMASS AVAILABLE TO PYROLYZE CASE ITA 1. BST-05 PRO		
2021	**Turin Plant**	**Gattinara Plant**
Coffee powder [t/Y]	1.737	1.815
- raw powder [t/y]	64	87,1
- roasting powder waste [t/y]	424	652,9
eligible for production (pellets) [t/y]	**1.250**	**1.075**
Coffee waste Biomass available [t/y]	**2.325**	
Week availables for transport [w/y]	12	
Coffee biomass to be transported Gatt-TO [t/w]	**89,6**	
Truck load capacity [t/truck]	25	
Number of truck [25 t] needed weekly Gatt-TO	**4,0**	
Biomass in input - Plant Capacity [t/y]	2592	
Utilization rate over 90%. No more Biomass needed		
Biochar Production Loss [t/y]	80,17	

Tabella 15. Caso ITA 1. BST-05 Pro: analisi della biomassa in input.

10.1.2. ITA 2. BST-10

Nel caso ITA 2 BST-10 si ottiene invece $b_y^{cap} \gg b_y^{av}$, il che conduce il project owner ad acquistare biomassa aggiuntiva poiché non sarebbe economicamente sostenibile accettare le perdite connesse alla production loss derivante. Nello specifico, la quantità di biomassa annuale da dover acquistare esternamente e trasportare al sito produttivo di Torino b_y^{x-TO} pari a 6315,2 $t\ y^{-1}$ si ottiene secondo:

$$b_y^{x-TO} = b_y^{cap} - b_y^{av}$$

Essendo l'impianto installato nei pressi di Torino ed assumendo una finestra temporale utile al suo

reperimento di tre mesi (dodici settimane), al fine di determinare i costi di trasporto della biomassa proveniente da Gattinara e da un'altra locazione (denotata con *x*), si è dovuta calcolare la biomassa da trasportare settimanalmente b_w^{x-TO} e $b_w^{Gatt-TO}$ come segue:

$$b_w^{x-TO} = \frac{b_y^{x-TO}}{12\ weeks} \quad \text{e} \quad b_w^{Gatt-TO} = \frac{b_y^{Gatt-TO}}{12\ weeks}$$

In questo modo è stato possibile determinare il numero di veicoli utili al trasporto di tale quantitativo di biomassa. Sfruttando una capacità di trasporto di 25 t per camion ($Load_{truck}$), si ottengono:

$$n_{trucks}^{x-TO} = \frac{b_w^{x-TO}}{Load_{truck}} \quad \text{e} \quad n_{trucks}^{Gatt.-TO} = \frac{b_w^{Gatt.-TO}}{Load_{truck}}$$

con n_{trucks}^{x-TO} pari a 22 veicola a settimana.

BIOMASS AVAILABLE TO PYROLYZE CASE ITA 2. BST-10		
2021	**Turin Plant**	**Gattinara Plant**
Coffee powder [t/Y]	1.737	1.815
- raw powder [t/y]	64	87,1
- roasting powder waste [t/y]	424	652,9
eligible for production (pellets) [t/y]	**1.250**	**1.075**
Coffee waste Biomass available [t/y]	**2.325**	
Week availables for transport [w/y]	12	
Coffee biomass to be transported Gatt-TO [t/w]	**89,6**	
Truck load capacity [t/truck]	25	
Number of truck [25 t] needed weekly Gatt-TO	**4,0**	
Biomass in input - Plant Capacity [t/y]	8640	
Biomass from supplier x near Turin [t/y]	**6315,2**	
Other - Biomass to be transported x-TO [t/w]	**526**	
Number of truck [25 t] needed weekly x-TO	**22,0**	

Tabella 16. Caso ITA 1. BST-10: analisi della biomassa in input.

10.1.3. La ricerca di nuova biomassa da poter pirolizzare: l'intervista all'Ente Nazionale Risi

Essendo la qualità e le caratteristiche chimico-fisiche del biochar strettamente dipendenti dal tipo di biomassa scelta in input, durante l'analisi è sorto il quesito su quale biomassa scegliere che garantisse al tempo stesso un effort economico contenuto per il suo acquisto e una resa ingegneristica in termini di %C per il biochar prodotto che andasse a compensare il ridotto carbon yield del biochar prodotto dagli scarti di torrefaione del caffè (65%) come analizzato nel capitolo 10.8 *Stima delle tonnellate di GHG emissions sequestrate tramite l'utilizzo del modello di Verra.* La prima ipotesi è ricaduta sia sugli scarti del raccolto della risicoltura, la cosiddetta paglia, e sia sugli scarti di prima lavorazione del riso (pula e lolla) data la diffusione della pratica agricola nella regione

Piemonte. Intervistando il Dott. Romani M., dirigente responsabile del Dipartimento di Agronomia del Centro Ricerche sul Riso di Ente Nazionale Risi (ENR), tale ipotesi si è rivelata errata poiché la paglia di riso difficilmente può essere pirolizzata dato il suo alto moisture content che richiederebbe un costoso processo di essicazione. Inoltre, tale scarto viene direttamente utilizzato dalle riserie come ammendante naturale in risaia al fine di aumentare la presenza di carbonio organico e micronutrienti e stimolare l'azione delle popolazioni microbiche da cui dipende la fertilità del campo. Per quanto riguarda la lolla, invece, essendo ritenuto uno scarto pregiato per l'industria dell'acciaio (ceneri di silice), il vivaismo e l'allevamento (lettiere), si registra un'alta dispendiosità d'acquisto data sia dall'elevata domanda concorrenziale (> \$100 t^{-1}), sia dalla scarsa offerta ad oggi presente (per ogni tonnellata di riso greggio raccolto, solo il 20% in peso è considerabile lolla). Lo stesso discorso vale per la pula (10% t^{-1} di riso semi-greggio) che è altamente richiesta per i suoi valori nutrizionali dall'industria cosmetica e dal settore mangimistico; inoltre, non risultano attivi test polita di pula pirolizzata al fine di produrre biochar data il suo basso contenuto in carbonio.

In conclusione, le riserie non sarebbero neanche interessate all'applicazione di biochar in risaia dal momento che quest'ultimo esacerberebbe la condizione fitotossica procreata dall'anossia del campo allagato. Pertanto, non sarebbe plausibili potenziali partnership *do ut des* di fornitura biomasse-biochar al fine di ridurre il prezzo d'acquisto delle prime.

Quest'incontro ha totalmente escluso l'ipotesi di poter sfruttare gli scarti di una delle pratiche agricole più diffuse nella regione e, pertanto, si è deciso di affidarsi all'acquisto degli scarti di prima lavorazione della frutta secca (in particolar modo delle nocciole dato il vasto quantitativo di tali coltivazioni) e del raccolto cerealicolo, i quali garantiscono alle temperature di pirolisi prescelte un biochar con alto contenuto in carbonio.

10.2. Casi BRASILE: Analisi sulla biomassa in input al reattore

10.2.1. BRA 3. 2xBST-10

Per quanto concerne l'analisi della biomassa in input per i casi brasiliani, il ragionamento adottato segue quanto è stato esposto per i due casi italiani. Indicando con *1* e *2* i due fornitori di biomassa, per il caso BRA 3 2xBST-10 si avrà un reattore per ciascun plant identificato. Perciò, le formule si modificheranno come segue:

$$b_y^{cap,1} = b_h^{plant,1} * 24\ hd^{-1} * 360\ dy^{-1}$$

$$b_y^{cap,2} = b_h^{plant,2} * 24\ hd^{-1} * 360\ dy^{-1}$$

con $b_h^{plant,1}$e $b_h^{plant,2}$ le capacità orarie di assorbimento biomassa in input dei due rettori.

La biomassa annuale disponibile presso il fornitore *1* si dimostra $b_y^{av,1} \cong b_y^{cap,1}$ (8257 $t\ y^{-1} \cong$ 8640 $t\ y^{-1}$), ovvero in grado di saturare la capacità in input del reattore e pertanto si è dedotta una production loss $Q_y^{Loss} = \emptyset$. Per il secondo impianto, invece, $b_y^{cap,2} \gg b_y^{av,2}$ inducendo il project owner ad acquistare biomassa aggiuntiva poiché non sarebbe economicamente sostenibile accettare le perdite connesse alla production loss derivante. Come nel caso ITA 2 BST-10, si deve calcolare la quantità di biomassa annuale da dover acquistare esternamente da un fornitore *x* e trasportare al sito produttivo *2* b_w^{x-2} pari a 4965 $t\ y^{-1}$. Nello specifico:

$$b_y^{x-2} = b_y^{cap,2} - b_y^{av,2}$$

Assumendo, anche in questo caso, una finestra temporale utile al reperimento della biomassa di tre mesi (dodici settimane), si è dovuta calcolare la biomassa da trasportare settimanalmente b_w^{x-2} al fine di determinare i costi di trasporto dal fornitore *x* al plant *2*:

$$b_w^{x-2} = \frac{b_y^{x-2}}{12\ weeks}$$

In questo modo è stato possibile determinare il numero di veicoli utili al trasporto di tale quantitativo di biomassa. Sfruttando una capacità di trasporto di 25 t per camion ($Load_{truck}$), si ottengono:

$$n_{trucks}^{x-2} = \frac{b_w^{x-2}}{Load_{truck}}$$

con n_{trucks}^{x-2} pari a 17 veicoli settimana.

BIOMASS AVAILABLE TO PYROLYZE CASE BRA 3. 2 x BST-10		
2021	**Brazilian Plant 1**	**Brazilian Plant 2**
Coffee Cascara + prunings waste avilable [t/y]	**8257**	**3675**
Each plant will have an installed pyrolyzer		
Biomass in input - Plant Capacity [t/y]	8640	8640
Biomass from supplier x near Plant [t/y]	**/**	**4965**
Week availables for transport [w/y]	12	
Coffee biomass to be transported x-2 [t/w]	**/**	**414**
Truck load capacity [t/truck]	25	
Number of truck [25 t] needed weekly x-2	**/**	**17**

Tabella 17. Caso BRA 3. 2xBST-10: analisi della biomassa in input.

10.2.2. BRA 4. BST-30

In questo caso, il reattore da installare possiede una capacità di pirolizzazione:

$$b_y^{cap} = b_h^{plant} * 24\ hd^{-1} * 360\ dy^{-1}$$

pari a 25920 $t\ y^{-1}$ (con b_h^{plant} capacità oraria di assorbimento biomassa in input di 3 $t\ h^{-1}$), assai maggiore rispetto alla biomassa disponibile presso i due fornitori (11932 $t\ y^{-1}$), calcolata come segue:

$$b_y^{av} = b_y^{av,1} + b_y^{av,2}$$

Pertanto, si è deciso di installare il reattore presso il fornitore *1* (maggiore disponibilità di biomassa, $b_y^{av,1} > b_y^{av,2}$) in modo tale da minimizzare i costi di trasporto. In ogni caso, essendo $b_y^{cap} \gg b_y^{av}$, il project owner deve obbligatoriamente acquistare biomassa da altri fornitori per un quantitativo pari a:

$$b_y^{x-1} = b_y^{cap} - b_y^{av}$$

con b_y^{x-1}= 13989 $t\ y^{-1}$. Seguendo lo stesso procedimento per il calcolo dei camion ($Load_{truck} = 25\ t$), si ottiene la biomassa da trasportare settimanalmente dal fornitore *2* al fornitore *1* dove è installato l'impianto e il corrispettivo numero di veicoli di trasporto necessari:

$$b_w^{2-1} = \frac{b_y^{av,2}}{12\ weeks}$$

$$n_{trucks}^{2-1} = \frac{b_w^{2-1}}{Load_{truck}}$$

con n_{trucks}^{2-1} = 13 veicoli settimana. Per quanto riguarda invece la biomassa da acquistare esternamente si procede come segue:

$$b_w^{x-1} = \frac{b_y^{x-1}}{12\ weeks}$$

$$n_{trucks}^{x-1} = \frac{b_w^{x-1}}{Load_{truck}}$$

ottenendo n_{trucks}^{x-1} = 47 veicoli settimana.

BIOMASS AVAILABLE TO PYROLYZE CASE BRA 4. BST-30		
2021	**Brazilian Plant 1**	**Brazilian Plant 2**
Coffee Cascara + prunings waste [T]	**8257**	**3675**
The pyrolyzer will be installed in plant 1		
Week availables for transport [w/y]	12	
Coffee biomass to be transported 2-1 [t/w]	**/**	**306**
Truck load capacity [t/truck]	25	
Number of truck [25 t] needed weekly 2-1	**/**	**13**
Coffee waste Biomass available after 2-1 [t/y]	**11932**	
Biomass in input - Plant Capacity [t/y]	25920	
Biomass from supplier x near Plant 1 [t/y]	**13989**	
Coffee biomass to be transported x-1 [t/w]	**1166**	
Number of truck [25 t] needed weekly x-1	**47**	

Tabella 18. Caso BRA 4. BST-30: analisi della biomassa in input.

10.3. Analisi dei costi capitali di start up

Il modello di ricavo dei costi di investimento iniziali è stato adottato per tutti i casi. L'obiettivo primario è quello di fornire l'ammontare dell'investimento iniziale da sostenere per l'avvio dell'attività I_{Inv}^{SC}. Il pedice superiore *SC* indica lo "Scenario", *Best Case* (*BC*) o *Worst Case* (*WC*), al fine di donare maggiormente consistenza alla stima. Pertanto, quest'ultimo è stato dedotto come segue:

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

dove:

- $\boldsymbol{I_{Plant}}$: investimento iniziale per l'acquisto del reattore in esame equipaggiato con tutti i componenti riassunti in Fig. 31 per il BST-05 e in Fig. 35 per il BST-10/30.

- $\boldsymbol{A_{Exp}^{SC}}$: additional expenditures relative all'acquisto di eventuali componenti aggiuntivi, affitto macchinari per l'installazione del dell'impianto (gru), preparazione dell'hangar industriale in cui si vuole installare il reattore, spese extra, ecc.

- $\boldsymbol{C_{Transp}^{CHN^{SC}}}$: stima del costo di trasporto dell'impianto da Qingdao (Cina) al sito di installazione finale. La seguente voce di costo è composta come segue:

  $$C_{Transp}^{CHN^{SC}} = c_{FOB}^{CHN} + other^{SC}$$

  dove c_{FOB}^{CHN} rappresenta il costo di trasporto a carico del venditore (Free On Board) mentre $other^{SC}$ è il costo da sostenere per il trasporto a destino e tasse doganali.

- $\boldsymbol{L_{Costs}^{SC}}$: Labour costs. L'installazione necessita del pagamento di prestazioni lavorative terze. Tale voce di costo è stata stimata con il seguente procedimento:

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

  dove:

  - L_{Beston}^{SC} è il costo da garantire ai tecnici Beston che affrontano una trasferta per supportare e guidare l'installazione del reattore. Tale costo è stato stimato come:

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

    ovvero sommando il costo dei biglietti aerei andata e ritorno alla paga da corrispondere all'azienda cinese per la prestazione del servizio di consulenza in loco (ottenuto moltiplicando la paga giornaliera richiesta w_B per il numero di giorni della trasferta). Tutto ciò deve essere moltiplicato per il numero n di tecnici Beston presenti durante la fase di installazione.

L_k^{SC} è il costo associato alla manodopera non-Beston, con *k* = {*Welders*, *Plumbers*, *Construction*} e viene calcolato moltiplicando la corrispettiva paga giornaliera w_k^{SC} per il numero di giorni impiegati), ovvero:

$$L_k^{SC} = n * w_k^{SC} * days$$

- $\boldsymbol{M_{Inst}^{SC}}$: costo relativo all'acquisto di materiali di costruzione, tubature per l'allacciamento dell'impianto alla rete idrica comune e simili.

- $\boldsymbol{I_{Verra}}$: investimento iniziale per far aderire il progetto di produzione biochar al VCS Program di Verra, la quale verifica che il progetto stesso sia conforme alle linee guida esposta nel documento *VM0044: Methodology for Biochar Utilization in Soil and Non-Soil Applications* emanato il 12/08/2022. Tale costo iniziale[33] si compone come segue:

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

dove:

- $Reg.Acc._{fee}$: Registration Account fee pari a $500 da sostenere per aprire un account presso il Registro Verra.
- $Reg._{fee}$: commissione inerente alla richiesta di registrazione ove quest'ultima sia richiesta con l'invio di un rapporto di verifica del quantitativo di $ER_y = tCO_2eq\ Removed$ (periodo di verifica di almeno un anno). La Registration fee si calcola come segue:

$$Reg._{fee} = \$0{,}1\ tCO_2eq^{-1} * ER_y$$

- $Proj.Cert._{fee}$: Project Certification fee pari a $2500.
- $other$: Verification and Validation body fee pari a $15'375 al fine di finanziare le procedure di validazione del progetto tramite l'intervento di tecnici, periti e consulenti.

- $\boldsymbol{C_{Permitting}^{SC}}$: costo relativo al finanziamento delle procedure di permitting (permessi antincendio, sicurezza del posto di lavoro e simili).

- $\boldsymbol{C_{Other}^{SC}}$: costi aggiuntivi e/o extra per affrontare le spese derivanti da necessità non previste.

Al costo capitale totale iniziale I_{Inv}^{SC} si è deciso di affiancare un programma di ammortamento lineare sulla vita utile degli impianti pari a 14 anni, ottenendo:

[33] Specifiche riportate al documento disponibile al seguente link: https://verra.org/wp-content/uploads/Program-Fee-Schedule_v4.1.pdf.

$$Depr._{lin.} = \frac{I_{inv}}{Useful\ Life}$$

10.3.1. ITA 1. BST-05 Pro: riepilogo costi capitali

CASE ITA 1. BST-05 Pro CAPITAL COSTS					
			BC		WC
Price		$	**74.690,00**	$	**74.690,00**
Addictional expenditures		$	**200.000,00**	$	**400.000,00**
Transportation Cost Qingdao to Genoa		$	**15.000,00**	$	**25.000,00**
Labour expenditures	Beston technician's salary online call [day]	$	50,00	$	50,00
	Time to install the system [day]		5		5
	Beston technician's salary	$	250,00	$	250,00
	Round -trip airtickets	$	-	$	-
	TOT Beston Technician labour cost	$	**250,00**	$	**250,00**
	Local welder salary [day]	$	150,00	$	250,00
	Number of local welder needed		1		1
	Time [day]		5		5
	TOT local welder cost	$	**750,00**	$	**1.250,00**
	Local plumber salary [day]	$	150,00	$	250,00
	Number of local plumber needed		1		1
	Time [day]		5		5
	TOT local plumber cost	$	**750,00**	$	**1.250,00**
	Local labor salary [day]	$	80,00	$	100,00
	Number of local worker needed		1		1
	Time [day]		5		5
	TOT local labor cost	$	**400,00**	$	**500,00**
Other	Other (forklift, equipment ...)	$	2.000,00	$	4.000,00
	Installation materials ready (foundation, ..)	$	10.000,00	$	20.000,00
	Permitting (environmental, firefighting, etc.)	$	10.000,00	$	20.000,00
TOTAL CAPITAL COSTS		$	**332.348,74**	$	**565.448,74**
Annual Depreciation		$	6.049,29	$	6.763,57

CASE ITA 1. BST-05 Pro VERRA CAPITAL COSTS		
Account Registration	$	500,00
Registration Fee for 1 tCO2eq	$	0,10
Registration Fee	$	133,74
Project Certification Fee	$	2.500,00
Other (Verification and Monitoring)	$	15.375,00
TOT Initial investment (Capital Cost)	**$**	**18.508,74**

Tabella 19. Caso ITA 1. BST-05 Pro: riepilogo dei Costi Capitali.

10.3.2. ITA 2. BST-10: riepilogo costi capitali

CASE ITA 2. BST-10 CAPITAL COSTS					
			BC		WC
Price		**$**	**200.000,00**	**$**	**200.000,00**
Addictional expenditures		**$**	**400.000,00**	**$**	**600.000,00**
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	$	2.000,00	$	4.000,00
	TOT Beston Technician labour cost	**$**	**16.000,00**	**$**	**18.000,00**
	Local welder salary [day]	$	150,00	$	250,00
	Number of local welder needed		2		2
	Time [day]		25		25
	TOT local welder cost	**$**	**7.500,00**	**$**	**12.500,00**
	Local plumber salary [day]	$	150,00	$	250,00
	Number of local plumber needed		1		1
	Time [day]		15		15
	TOT local plumber cost	**$**	**2.250,00**	**$**	**3.750,00**
	Local labor salary [day]	$	100,00	$	150,00
	Number of local worker needed		3		3
	Time [day]		8		8
	TOT local labor cost	**$**	**2.400,00**	**$**	**3.600,00**
Other	Other (forklift, equipment ...)	$	10.000,00	$	15.000,00
	Installation materials ready (foundation, ..)	$	30.000,00	$	60.000,00
	Permitting (environmental, firefighting, etc.)	$	10.000,00	$	20.000,00
TOTAL CAPITAL COSTS		**$**	**764.830,87**	**$**	**1.039.530,87**
Annual Depreciation		$	16.428,57	$	18.571,43

CASE ITA 2. BST-10 VERRA CAPITAL COSTS		
Account Registration	$	500,00
Registration Fee for 1 tCO2eq	$	0,10
Registration Fee	$	770,47
Project Certification Fee	$	2.500,00
Other (Verification and Monitoring)	$	15.375,00
TOT Initial investment (Capital Cost)	**$**	**19.145,47**

Tabella 20. Caso ITA 2. BST-10: riepilogo dei Costi Capitali.

10.3.3. BRA 3. 2xBST-10: riepilogo costi capitali

Caso BRA 3. 2xBST-10 CAPITAL COSTS			
		BC	WC
Price		**$ 400.000,00**	**$ 400.000,00**
Addictional expenditures		**$ 400.000,00**	**$ 600.000,00**
Transportation Cost from China		**$ 80.000,00**	**$ 120.000,00**
Labour expenditures	Beston technician's salary [day]	$ 1.400,00	$ 1.400,00
	Time to install the system [day]	40	40
	Beston technician's salary	$ 56.000,00	$ 56.000,00
	Round -trip airtickets	$ 8.000,00	$ 16.000,00
	TOT Beston Technician labour cost	**$ 64.000,00**	**$ 72.000,00**
	Local welder salary [day]	$ 25,43	$ 35,00
	Number of local welder needed	4	4
	Time [day]	25	25
	TOT local welder cost	**$ 2.542,86**	**$ 3.500,00**
	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.)	$ 10.000,00	$ 20.000,00
TOTAL CAPITAL COSTS		**$ 1.088.164,39**	**$ 1.377.868,11**
Annual Depreciation		$ 31.428,57	$ 32.857,14

Caso BRA 3. 2xBST-10 VERRA CAPITAL COSTS		
Account Registration	$	500,00
Registration Fee for 1 tCO2eq	$	0,10
Registration Fee	$	1.263,11
Project Certification Fee	$	2.500,00
Other (Verification and Monitoring)	$	15.375,00
TOT Initial investment (Capital Cost)	**$**	**19.638,11**

Tabella 21. Caso BRA 3. 2xBST-10: riepilogo dei Costi Capitali.

10.3.4. BRA 4. BST-30: riepilogo costi capitali

Caso BRA 4. BST-30 CAPITAL COSTS			
		BC	WC
Price		**$ 300.000,00**	**$ 350.000,00**
Addictional expenditures		**$ 250.000,00**	**$ 350.000,00**
Transportation Cost from China		**$ 50.000,00**	**$ 75.000,00**
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	$ 2.000,00	$ 4.000,00
	TOT Beston Technician labour cost	**$ 16.000,00**	**$ 18.000,00**
	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	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]	15	15
	TOT local labor cost	**$ 1.144,29**	**$ 1.575,00**
Other	Other (forklift, equipment ...)	$ 10.000,00	$ 15.000,00
	Installation materials ready (foundation, ..)	$ 30.000,00	$ 60.000,00
	Permitting (environmental, firefighting, etc.)	$ 10.000,00	$ 20.000,00
TOTAL CAPITAL COSTS		**$ 719.011,18**	**$ 942.064,04**
Annual Depreciation		$ 23.571,43	$ 29.285,71

Caso BRA 4. BST-30 VERRA CAPITAL COSTS		
Account Registration	$	500,00
Registration Fee for 1 tCO2eq	$	0,10
Registration Fee	$	1.839,04
Project Certification Fee	$	2.500,00
Other (Verification and Monitoring)	$	15.375,00
TOT Initial investment (Capital Cost)	**$**	**20.214,04**

Tabella 22. Caso BRA 4. BST-30: riepilogo dei Costi Capitali.

10.3.5. Confronto dei costi capitali

Come mostrato in Tab. 19., per l'impianto BST-05 Pro si deve sostenere un investimento iniziale che oscilla nel range k$332 (BC) e k$566 (WC). Le componenti di costo che hanno maggior peso sono rispettivamente i costi addizionali A_{Exp}^{SC} per la messa a punto finale dell'impianto stesso, assunte nel range k$200-k$400, e la spesa I_{Plant} per l'acquisto dell'impianto stesso (k$75). Per quanto concerne l'impianto BST-10 (Tab. 20), invece, i costi di investimento iniziale all'incirca duplicano (+100%) attestandosi nel range k$765 (BC) - k$1040 (WC). Questo è da imputare sia per l'aumento logico del prezzo richiesto per l'acquisto dell'impianto stesso (k$200) e per le spese addizionali (k$400 (BC) - k$600 (WC)) di messa a punto, sia per le spese di installazione, frutto di quaranta giorni di lavoro e dell'assunzione di manodopera. Quest'ultime, per il BST-05 Pro, sono completamente assenti poiché sono richiesti solo cinque giorni per la sua installazione completa mentre, per i tecnici Beston, si paga la consulenza fornita da remoto risultando così in una spesa irrisoria.

Osservando i casi brasiliani, invece, si può notare che l'installazione di due impianti BST-10 richiede un investimento iniziale totali pari a k$1080 (BC) e k$1380 (WC), ovvero un +30%-40% rispetto al secondo caso italiano nonostante nel terzo caso si installino due reattori BST-10 e nel terzo si acquisti un reattore con capacità di produzione triplicata rispetto a quest'ultimo. Questa asimmetria è giustificata dal minor costo di mercato della manodopera e dei materiali da costruzione nella nazione sudamericana riportati in Tab. 21 e in Tab. 22. Questo si può evincere anche nel caso si acquistasse un impianto BST-30, operazione che risulterebbe in un investimento iniziale totale pari a k$720 (BC) - k$942 (WC), ovvero 5%-7% inferiore rispetto ad acquistare un impianto di scala ridotta in Italia.

Infine, per i costi di certificazione si è calcolata una voce di costo compresa tra i k$18 e i k$20 per tutti i casi.

10.4. Analisi dell'Annual Cost of Good Sold (COGS)

Si è scelto di scorporare i costi per produrre il bene venduto dai costi operativi annuali d'esercizio OPEX per semplicità analitica e per fornire al lettore un prospetto più chiaro sui costi direttamente imputabili al sostentamento della produzione.

Per quanto concerne l'analisi del $COGS_y^{TOT}$, essa si compone annualmente come quanto segue:

$$\boldsymbol{COGS_y^{TOT} = C_y^{Biom.Tr.} + C_y^{Biom.} + C_y^{Fuel} + C_y^{En} + C_y^{H_2O} + H_{Stock} + Soil_{Test} + Pkg)} \\ * \left(\mathbf{1} + \boldsymbol{r^{infl}}\right)^{(y-y_0)}$$

dove:

- $\boldsymbol{C_y^{Biom.Tr.}}$: costo totale annuale per il trasporto della biomassa al sito di produzione del biochar. Per determinare le singole componenti di questa voce, si è moltiplicato la somma tra il prodotto costo al kilometro c_{km} per i chilometri da percorrere ($km * c_{km}$) e il compenso fisso $extra_{fee}$ di $200 da corrispondere per veicolo impiegato (utile a coprire costi aggiuntivi quali il ritorno a vuoto e costi assicurativi). Si sottolinea che in Italia il costo per percorrere un kilometro con un camion a carico pieno è ${c_{km}}^{ITA} = 2{,}5\ \$km^{-1}$ circa[34], mentre in Brasile è circa ${c_{km}}^{BRA} = 1{,}09\ \$\ km^{-1}$ [35]. La risultante è stata poi moltiplicata per il numero di veicoli impiegati n_{trucks}^{x-x} e per il numero di settimane utili ($weeks = 12$).

    - Caso ITA 1 BST-05 Pro:

    Nel caso dell'impianto di piccola scala, $C_y^{Biom.Tr.}$ corrisponde al costo per trasportare la biomassa da Gattinara alla sede di Torino ($km^{Gatt-TO}$= 100 km) come segue:

    $$C_y^{Biom.Tr.} = c_y^{Gatt.-TO} = \left[\left(km^{Gatt-TO} * {c_{km}}^{ITA}\right) + extra_{fee}\right] * n_{trucks}^{Gatt.-TO} * weeks$$

    - Caso ITA 2 BST-10:

    In questo caso, $C_y^{Biom.Tr.}$ sarà composto dalle voci di costo del trasporto di biomassa da Gattinara a Torino e dalla locazione di uno o più fornitori *x* a Torino (*x-TO*). Per semplicità, si assume che i chilometri da percorrere nel secondo caso sono: $km^{x-TO} = 300\ km$. Pertanto:

[34] Tabella erogata dal Ministero Delle Infrastrutture E Dei Trasporti (MIMS) riepilogativa dei costi al km per categoria di veicolo adottata. Disponibile al link: https://www.tuservice.it/public/files/MIMS_Tabella_costi_km_unitario_gennaio2022.pdf.

[35] Costo dedotto dalla media tra i costi riportati in Table 8. Monthly Brazilian soybean export truck transportation cost index. I costi vengono riportati in $\$\ t^{-1}100miles^{-1}$ e sono stati trasformati in $\$\ km^{-1}$ moltiplicando per il carico del camion da trasportare (25 t) e dividendo per 161 km (ovvero 100 miglia). Disponibile al link: https://www.ams.usda.gov/services/transportation-analysis/brazil-datasets.

$$C_y^{Biom.Tr.} = c_y^{Gatt.-TO} + c_y^{x-TO}$$

dove:

$$c_y^{Gatt.-TO} = \left[(km^{Gatt-TO} * {c_{km}}^{ITA}) + extra_{fee}\right] * n_{trucks}^{Gatt.-TO} * weeks$$

e

$$c_y^{x-TO} = \left[(km^{x-TO} * {c_{km}}^{ITA}) + extra_{fee}\right] * n_{trucks}^{x-TO} * weeks$$

- Caso BRA 3 2xBST-10:

In questo caso, poiché il reattore installato presso il fornitore di biomassa *1* non necessità di biomassa aggiuntiva, $C_y^{Biom.Tr.}$ sarà composto solo dalla voce di costo del trasporto di biomassa da uno o più fornitori *x* al *plant 2* (*x-2*) come segue:

$$C_y^{Biom.Tr.} = c_y^{x-2} = \left[(km^{x-2} * {c_{km}}^{BRA}) + extra_{fee}\right] * n_{trucks}^{x-2} * weeks$$

- Caso BRA 4 BST-30:

Qui, il costo annuale per trasportare la biomassa al reattore $C_y^{Biom.Tr.}$ risulterà dalla somma di c_y^{2-1} (costo per trasportare la biomassa del fornitore *2* al *plant 1* percorrendo km^{2-1}= 400 km circa) e c_y^{x-1} (costo per trasportare la biomassa del fornitore *x* al *plant 1*), ovvero:

$$C_y^{Biom.Tr.} = c_y^{2-1} + c_y^{x-1}$$

dove:

$$c_y^{2-1} = \left[(km^{2-1} * {c_{km}}^{BRA}) + extra_{fee}\right] * n_{trucks}^{2-1} * weeks$$

e

$$c_y^{x-1} = \left[(km^{x-1} * {c_{km}}^{BRA}) + extra_{fee}\right] * n_{trucks}^{x-1} * weeks$$

- $\boldsymbol{C_y^{Biom.}}$: costo annuale per l'acquisto di biomassa calcolato come prodotto tra il prezzo per acquistarne una tonnellata (c_b) e l'ammontare di biomassa da acquistare b_y come segue:

  - Caso ITA 1 BST-05 Pro: $C_y^{Loss} = Q_y^{Loss} * P^{M_p}$
    Per questo caso, il costo della biomassa è soppiantato dal costo derivante dalla production loss annuale di biochar Q_y^{Loss} valutata al Middle Price Scenario P^{M_p}.

  - Per gli altri casi (ITA 2 BST-10, BRA 3 2xBST-10, Caso BRA 4 BST-30): $C_y^{Biom.} = c_b * b_y^{x-plant}$

In questo frangente, per i casi brasiliani, si è assunto che la biomassa disponibile presso i due fornitori in esame sia concessa gratuitamente sulla base di un probabile (ma non certo) accordo tra le parti: i fornitori di biomasse dispongono delle piantagioni da cui ottengono il raccolto e lo scarto; quest'ultimo viene ceduto per produrre biochar in cambio di un prezzo di favore sulla vendita del prodotto finito pirolizzato.

- $\boldsymbol{C_y^{Fuel}}$: costo relativo al consumo di natural gas e benzina (nei casi sia presente anche un biotrituratore alimentato con un motore a scoppio) per alimentare i reattori durante la combustione. Questo costo è in parte ammortizzato dall'utilizzo di tar come combustibile (Q_y^{Tar}).

$$C_y^{Fuel} = \left(c_{ng}^{ITA/BRA} * ng_y\right) + \left(c_{gaz}^{ITA/BRA} * gaz_y\right)$$

L'ultimo termine non è presente per il caso ITA 1 BST-05 Pro poiché non dispone di un crusher a scoppio; $c_{ng}^{ITA} = 1{,}35\ \$\ m^{3^{-1}}$ [36], $c_{ng}^{BRA} = 1{,}24\ \$\ m^{3^{-1}}$ [37], $c_{gaz}^{ITA} = 1{,}7\ \$\ L^{-1}$ e $c_{gaz}^{BRA} = 1\ \$\ L^{-1}$ rappresentano il costo al metro cubo di gas naturale e il costo di benzina al litro in Italia e Brasile rispettivamente. Invece ng_y è il fabbisogno di natural gas calcolato per tutti i casi come:

$$ng_y = (ng[m^3\ w^{-1}]_{Plant} * 2 * 52[wy^{-1}]) - Q_y^{Tar}, \quad \text{con } Q_y^{Tar} = 3\% * b_y$$

mentre gaz_y indica il fabbisogno di carburante del crusher.

- $\boldsymbol{C_y^{En}}$: costo associato al consumo di energia elettrica rinnovabile calcolato come

$$C_y^{En} = c_{en}^{ITA/BRA} * en_y$$

dove $c_{en}^{ITA} = 0{,}35\ \$\ kWh^{-1}$ [38] e $c_{en}^{ITA} = 0{,}25\ \$\ kWh^{-1}$ [39] rappresentano i costi per il consumo di un chilowattora in Italia e Brasile rispettivamente, mentre en_y rappresenta il fabbisogno dell'impianto installato.

[36] Costo al metro cubo calcolato tramite offerta Sorgenia per Aziende: PSV medio: 1 $/m3 +0,35 fisso = 1,35 $/m3
https://luce-gas.it/business/offerte/costo-kwh-aziende.

[37] Il costo per il consumo di gas naturale in Brasile si attesta intorno ai 0,118 $/kWh (https://www.globalpetrolprices.com/Brazil/natural_gas_prices/) e adoperando la trasformazione 1 m3 = 10.55 kWh
(https://learnmetrics.com/m3-gas-to-kwh/) si ottiene il consumo $/m3 desiderato.

[38] Costo al chilowattora calcolato tramite offerta Sorgenia per Aziende: Energia rinnovabile mercato libero, PUN medio: 0,3 $/kwh che comporta una tariffa di 0,3+0,04 = 0,35 $/kwh. https://luce-gas.it/business/offerte/costo-kwh-aziende.

[39] Disponibile al link:
https://www.globalpetrolprices.com/Brazil/electricity_prices/#:~:text=Business%2C%20kWh&text=Brazil%2C%20June%202022%3A%20The%20price,of%20power%2C%20distribution%20and%20taxes.

- $\boldsymbol{C_y^{H_2O}}$: costo associato al consumo idrico, ovvero:

$$C_y^{H_2O} = c_{H_2O}^{ITA/BRA} * H_2O_y$$

dove $c_{H_2O}^{ITA} = 3{,}09\ \$\ m^{3^{-1}}$ [40] e $c_{H_2O}^{BRA} = 1\ \$\ m^{3^{-1}}$ sono i costi idrici al metro cubo in Italia e Brasile rispettivamente mentre H_2O_y rappresenta il fabbisogno dell'impianto.

- $\boldsymbol{H_{Stock}}$: costo del safety stock che si è deciso di trattenere a magazzino al fine di coprire oscillazioni della domanda. Tale ammontare di prodotto finito è stato valutato al prezzo appartenente al Middle Price Scenario P^{Mp} come segue:

$$H_{Stock} = \% * Q_y^{Biochar} * P^{Mp}$$

Si vuole far notare che nei casi italiani, dove la profittabilità del progetto è maggiormente legata al volume di vendita B2B-B2C raggiunto durante l'anno, $\% * Q_y^{Biochar}$ è stato fissato al 2% del volume di biochar prodotto mentre, in Brasile, dove la profittabilità dei progetti dipende più dal valore d'emissione dei crediti al carbonio, tale livello di stock è stato diminuito al 0,5%.

- $\boldsymbol{Pkg}$: costo associato al packaging sia del quantitativo di biomassa $b_{tot}^{x-plant}$ da trasportare dai fornitori *x* al plant di produzione, sia dell'ammontare di biochar da spedi al cliente. In tutti i casi sono stati presi in considerazione sacchi da 50 kg ($Load_{pkg}^{u}$) per un costo unitario di 0,3 \$ (c_{pkg}^{u})
Il costo annuale per l'imballaggio viene dunque calcolato come:

$$Pkg = \frac{\left[\left(b_{tot}^{x-plant} + Q_y^{Biochar}\right) * 1000\right]}{Load_{pkg}^{u}} * c_{pkg}^{u}$$

- $\boldsymbol{\left(1 + r^{infl}\right)^{(y-y_0)}}$: termine che tiene conto dell'aggiustamento dei prezzi dovuti ad un tasso inflattivo YoY medio $r^{infl} = 4{,}50\%$.

[40] Tariffa fissa 2,373600 \$/mc + Tariffa fognatura (tutto il consumo) 0,278640 \$/mc + Tariffa depurazione (tutto il consumo) 0,433440 \$/mc. La Quota Accesso Servizio Acqua: 72,24 \$/y, la Quota Accesso Servizio Fognatura 17,54 \$/y e la Quota Accesso Servizio Depurazione 33,00 \$/y sono state aggiunte alla spesa idrica totale annua e non figurano in quella al mc. Disponibile al link: https://ccam.it/tariffe-vigore-01012019.

10.4.1. ITA 1. BST-05 Pro: riepilogo COGS annuali

CASE ITA 1. BST-05 Pro ANNUAL COGS			
hp: 360 days/yr		360	
		DAILY COGS	ANNUAL COGS
Transportation cost		$	**14.400,00**
Utilization Rate	Capacity in Input [T]		2592
	Biomass in Input [T]		2.325
	Biochar Production Loss [T]	90%	80
	Production Loss = Cost (t*Mp)	$	**52.111,29**
Fuel cost	Natural Gas cost [m^3]	$ 1,35	
	Needed [m^3]	34,29	24685,7
	TOT Fuel Cost	**$ 46,29**	**$ 33.325,71**
Energy cost	Energy cost [KWh]	$ 0,35	
	Needed [KWh]	720	259200
	TOT Energy cost	**$ 252,00**	**$ 90.720,00**
Water Cost	Water cost [m^3]	$ 2,78	
	Needed [m^3]	0,3	108
	TOT Water cost	**$ 0,83**	**$ 212,85**
Other	**Safety Stock - Warehouse**	2%	**$ 9.066,57**
	Soil Test Promotion	$	**10.000,00**
	Packaging	$	**18.133,15**
TOTAL ANNUAL COGS			**$ 228.753,66**

Transport Cost Gatt-TO for Case 1. BT-05 PRO		
Model	Truck	
Gattinara-Torino [hr]		1,2
Km		100
Transport Cost each Km	$	2,50
Load Capacity per Truck [T]		25
Biomass to transport weekly [T]		89,6
# Truck Needed		4,0
Extra Fee per Truck	$	200,00
Transport Cost Weekly	$	1.200,00
Week		12
Total Transport Cost	**$**	**14.400,00**

COGS	Pure Cost	$/tonbiochar	% of Total Ann. Cost
- Production Loss	**$ 52.111,29**	**$ 74,72**	**8,5%**
- Energy Cost	**$ 90.720,00**	**$ 130,08**	**14,8%**
- Fuel Cost	$ 33.325,71	$ 47,78	5,5%
- Packaging Cost	$ 18.133,15	$ 26,00	3,0%
- Transport Cost	$ 14.400,00	$ 20,65	2,4%
- Water Cost	$ 212,85	$ 0,31	0,03%
Total COGS	**$ 228.753,66**	**$ 328,00**	**37,4%**

Tabella 23. Caso ITA 1. BST-05 Pro: riepilogo dei COGS annuali.

10.4.2. Caso ITA 2. BST-10: riepilogo COGS annuali

CASE ITA 2. BST-10 ANNUAL COGS			
hp: 360 days/yr		360	
		DAILY COGS	ANNUAL COGS
Transportation cost		**$**	**272.400,00**
Biomass Cost	Biomass cost [$/T]		$ 100,00
	Needed [T]		6.315
	TOT Biomass Cost	**$**	**631.523,74**
Fuel cost	Natural Gas cost [m^3]	$ 1,35	
	Needed [m^3]	51,4	18255,1
	TOT Fuel Cost	$ 69,43	**$ 33.728,59**
Energy cost	Energy cost [KWh]	$ 0,35	
	Needed [KWh]	1440	518400
	TOT Energy cost	$ 504,00	**$ 181.440,00**
Water Cost	Water cost [m^3]	$ 3,09	
	Needed [m^3]	1	360
	TOT Water cost	**$ 3,09**	**$ 1.235,18**
Other	**Safety Stock - Warehouse**	2%	**$ 33.696,00**
	Soil Test Promotion	**$**	**30.000,00**
	Packging	**$**	**53.443,42**
TOTAL ANNUAL COGS			**$ 1.293.152,95**

Transport Cost Gatt-TO for Case 2. BST-10		
Model		Truck
Gattinara-Torino [hr]		1,2
Km		100
Transport Cost each Km	$	2,50
Load Capacity per Truck [T]		25
Biomass to transport weekly [T]		89,6
# Truck Needed		4,0
Extra Fee per Truck	$	200,00
Transport Cost Weekly	$	1.800,00
Weeks		12
Total Transport Cost	**$**	**21.600,00**

Transport Cost Other place to TO for Case 2. BST-10		
Model		Truck
Km place 1 - TO		300
Transport Cost each Km	$	2,50
Load Capacity per Truck [T]		25
Biomass to transport weekly [T]		526,3
# Truck Needed		22,0
Extra Fee per Truck	$	200,00
Transport Cost Weekly	$	20.900,00
Weeks		12
Total Transport Cost	**$**	**250.800,00**

COGS	Pure Cost	$/tonbiochar	% of Total Ann. Cost
- Biomass Cost	**$ 631.523,74**	**$ 243,64**	**29,0%**
- Energy Cost	$ 181.440,00	$ 70,00	8,3%
- Fuel Cost	$ 33.728,59	$ 13,01	1,5%
- Packaging Cost	$ 53.443,42	$ 20,62	2,5%
- Transport Cost	**$ 272.400,00**	**$ 105,09**	**12,5%**
- Water Cost	$ 1.235,18	$ 0,48	0,06%
Total COGS	**$ 1.293.152,95**	**$ 498,90**	**59,3%**

Tabella 24. Caso ITA 2. BST-10: riepilogo dei COGS annuali.

10.4.3. BRA 3. 2xBST-10: riepilogo COGS annuali

Caso BRA 3. 2xBST-10 ANNUAL COGS			
hp: 360 days/yr		360	
		DAILY COGS	ANNUAL COGS
Transportation cost		**$**	**$ 129.495,65**
Biomass Cost	Biomass cost [$/T]		$ 100,00
	Needed [T]		4.965
	TOT Biomass Cost	**$**	**$ 496.500,00**
Fuel cost	Natural Gas cost [m^3]	$ 1,24	
	Needed [m^3]	102,9	36510,2
	TOT Fuel Cost	$ 128,05	**$ 53.712,02**
Energy cost	Energy cost [KWh]	$ 0,25	
	Needed [KWh]	1440	518400
	TOT Energy cost	$ 360,00	**$ 129.600,00**
Water Cost	Water cost [m^3]	$ 1,00	
	Needed [m^3]	1	360
	TOT Water cost	$ 1,00	**$ 482,78**
Other	**Safety Stock - Warehouse**	1%	**$ 5.598,72**
	Soil Test Promotion	**$**	**$ 30.000,00**
	Packging	**$**	**$ 40.596,00**
TOTAL ANNUAL COGS			**$ 925.854,51**

Transport Cost for Case BRA 3. 2xBST-10		
Modello	Truck	
Km	**400**	
Transport Cost each km	$ 1,09	
Load Capacity per Truck [T]	25	
Biomass to transport weekly [T]	414	
# Truck Needed	17,0	
Extra Fee per Truck	$ 200,00	
Transport Cost Weekly	$ 10.791,30	
Week	12	
Toatal Annual Transport Cost	**$ 129.495,65**	

COGS	Colonna1	Colonna2	% of Total Ann. Cost
- Biomass Cost	**$ 496.500,00**	**$ 95,78**	**30,9%**
- Energy Cost	$ 129.600,00	$ 25,00	8,1%
- Fuel Cost	$ 53.712,02	$ 10,36	3,3%
- Packaging Cost	$ 40.596,00	$ 7,83	2,5%
- Transport Cost	$ 129.495,65	$ 24,98	8,0%
- Water Cost	$ 482,78	$ 0,09	0,03%
Total COGS	**$ 925.854,51**	**$ 178,60**	**57,5%**

Tabella 25. Caso BRA 3. 2xBST-10: riepilogo dei COGS annuali.

10.4.4. BRA 4. BST-30: riepilogo COGS annuali

Caso BRA 4. BST-30 ANNUAL COGS					
hp: 360 days/yr			360		
			DAILY COGS		ANNUAL COGS
Transportation cost			**$**		**580.216,17**
Biomass Cost	Biomass cost [$/T]			$	50,00
	Needed [T]				13.989
	TOT Biomass Cost		**$**		**699.425,00**
Fuel cost	Natural Gas cost [m^3]		$	1,24	
	Needed [m^3]			68,6	23908,1
	TOT Fuel Cost		$	85,36	**$ 42.435,21**
Energy cost	Energy cost [KWh]		$	0,25	
	Needed [KWh]			2160	777600
	TOT Energy cost		$	540,00	**$ 194.400,00**
Water Cost	Water cost [m^3]		$	3,09	
	Needed [m^3]			1,5	540
	TOT Water cost		$	4,64	**$ 2.625,68**
Other	**Safety Stock - Warehouse**			1%	**$ 8.398,08**
	Soil Test Promotion		**$**		**30.000,00**
	Packging		**$**		**124.416,00**
TOTAL ANNUAL COGS					**$ 1.757.602,37**

Transport Cost for Case BRA 4. BST-30				
Type	Truck			
Km		400		600
Transport Cost each Km	$	1,09	$	1,09
Load Capacity per Truck [T]		25		25
Biomass to transport weekly [T]		306		1166
# Truck Needed		13,0		47,0
Extra Fee per Truck	$	200,00	$	201,00
Transport Cost Weekly	$	8.252,17	$	40.099,17
Week		12		12
Toatal Annual Transport Cost	**$**	**99.026,09**	**$**	**481.190,09**

COGS	Colonna1	Colonna2	% of Total Ann. Cost
- Biomass Cost	**$ 699.425,00**	**$ 89,95**	**31,3%**
- Energy Cost	$ 194.400,00	$ 25,00	8,7%
- Fuel Cost	$ 42.435,21	$ 5,46	1,9%
- Packaging Cost	$ 124.416,00	$ 16,00	5,6%
- Transport Cost	**$ 580.216,17**	**$ 74,62**	**25,9%**
- Water Cost	$ 2.625,68	$ 0,34	0,12%
Total COGS	**$ 1.757.602,37**	**$ 226,03**	**78,6%**

Tabella 26. Caso BRA 4. BST-30: riepilogo dei COGS annuali.

10.4.5. Confronto dei COGS annuali

In Tab. 23, Tab. 24, Tab. 25 e Tab. 26 sono riportati i COGS annuali, la deduzione dei costi di trasporto e il peso specifico che tali costi esercitano su una singola tonnellata di biochar prodotta, nonché la percentuale di composizione della voce di Costo Totale annuale, evidenziando in grassetto le voci di costo a cui corrisponde un maggior effort economico.

Come si può notare fin da subito, per tutti i casi ad eccezione di ITA 1, siano locati in Italia o in Brasile, le voci di costo a cui è associato un esborso economico maggiore sono quelle relative all'acquisto di biomassa e al suo trasporto all'impianto, indipendentemente dai costi unitari $\$\ t^{-1}$ e $\$\ km^{-1}$ scelti.

Per quanto concerne l'impianto BST-05 Pro (Tab. 23), i COGS medi annuali ammontano a k$230, rappresentando il 37,4% dei costi totali da sostenere. Considerando una produzione media di circa 700 t di biochar anno, i COGS pesano per circa $328 t^{-1} di biochar prodotto. Ad impennare tali costi, a differenza degli altri scenari dove la dispendiosità dei COGS è da imputare appunto all'acquisto di biomassa e al suo trasporto, sono i costi relativi al dispendio energetico necessari ad alimentare il reattore, pari a k$91 ($130 t^{-1}) per l'energia elettrica e k$33,5 ($48 t^{-1}) per il gas naturale, rappresentando insieme circa il 20% dei Costi Totali annuali. Inoltre, essendo il progetto in Italia maggiormente legato alla vendita diretta di biochar rispetto ai ritorni derivanti dalla vendita di carbon credits, si registra un non trascurabile impatto delle perdite relative alla production loss (k$50).

Discorso opposto, invece, per l'impianto BST-10 e BST-30 che, indipendentemente dalla locazione geografica di installazione, riescono grazie agli effetti di scala ad ammortizzare nel tempo le spese energetiche. Al contempo, però, soprattutto nei casi ITA 2 e BRA 4, la necessità di andare a saturare la capacità in input del reattore obbliga il project owner a sostenere elevati costi per l'acquisto di biomassa e il suo trasporto.

Per il caso ITA 2 BST-10 infatti (Tab. 24), a fronte di un COGS complessivo di k$1300, corrispondente al 60% dei costi totali annuali da dover sostenere e pesando per circa $500 t^{-1}di prodotto finito realizzato dovendo reperire 6315 $t\,y^{-1}$ di biomassa e stimando un costo di $100 t^{-1}, si dovrà sostenere un costo annuale pari a k$630 per il suo acquisto e k$270 per il trasporto, ovvero il 40% dei costi totali annuali d'esercizio e pesando per circa $348 t^{-1} di biochar prodotto.

Per il caso BRA 3 (Tab. 25), invece, è il costo della biomassa (k$496, $100 t^{-1} di biochar realizzato) a gonfiare i COGS (50% rispetto a quest'ultimo, 30% rispetto ai costi annuali d'esercizio). Per quanto riguarda i costi di traporto essi si riducono intorno a $25 t^{-1} di biochar realizzato (8% dei costi totali) rispetto al caso BRA 4 per via della mole minore da dover acquistare e trasportare. In totale i COGS per il caso BRA 3 si attestano intorno ai k$925, circa il 35% in meno rispetto al caso ITA 2 nonostante vengano utilizzati due reattori. Questo denota una forte correlazione tra la differenza dei prezzi di mercato Italia-Brasile e la determinazione seguente dei costi.

Infine, i COGS relativi al caso BRA 4 (Tab. 26) confermano quanto detto prima, dove addirittura i costi per l'acquisto di biomassa sul mercato rappresentano circa il 31% dei costi totali annuali (k$700 per circa 14 kt annue, pensando per circa $90 t^{-1} di biochar realizzato). Ovviamente, anche il trasporto subisce un'impennata di costo, rappresentando a sua volta il 25% dei costi totali annuali e pesando per circa $75 t^{-1} di biochar realizzato. In totale, BRA 4 è il caso dove i COGS raggiungono il valore più alto tra i casi analizzati, ovvero pari a $1,75 mln (circa l'80% dei Costi Totali d'esercizio) anche se essi non riescono a catturare la stessa porzione di valore rispetto ai ricavi per tonnellata di biochar prodotta grazie agli effetti di scala.

10.5. Analisi dei Costi Operativi annuali d'esercizio

I costi operativi (OPEX) non sono fissi poiché la voce spese di marketing $MKT_{Rev,y}^{P_{Sc}}$ subisce variazioni a seconda dello scenario di prezzo analizzato P_{Sc}: {Best Price Scenario (B_P), Middle Price Scenario (M_P), Worst Price Scenario (W_P)} e del modello di revenues *Rev*: {Biochar only, By products} in esame. Gli OPEX vengono calcolati come:

$$\boldsymbol{OC_{Rev,y}^{P_{Sc}} = \left(C_y^{Rent} + L_y^{Plant} + E_y^{Tr} + MKT_{Rev,y}^{P_{Sc}} + C_{VCU_y}^{E} + MRO_y + MNT_{8th\ y}^{Special}\right) * \left(1 + r^{infl}\right)^{(y-y_0)}}$$

dove:

- $\boldsymbol{C_y^{Rent}}$: costo associato all'affitto annuale del capannone industriale. Tutti gli impianti devono essere installati al coperto onde evitare che gli eventi atmosferici velocizzino l'usura dell'impianto e ne compromettano il funzionamento.

- $\boldsymbol{L_y^{Plant}}$: costo del lavoro, sia tecnico, sia manageriale per garantire il corretto svolgimento delle intere mansioni richieste all'interno di una struttura di business. Pertanto, questa voce si compone nel seguente modo:

$$L_y^{Plant} = L_y^{Tech} + L_y^{SM} + L_y^{CEO}$$

  dove:
  - L_y^{Tech} rappresenta il costo del lavoro del personale tecnico a cui sono delegate le mansioni tecniche d'esercizio, dalla gestione della biomassa in arrivo in sede al packaging del biochar, compresa la manutenzione dell'impianto. Dovendo curare l'esercizio di impianti *always full heated*, si è dovuto dimensionare l'organico di lavoro su tre turni lavorativi di 8h. Per il BST-05 Pro, data la piccola dimensione dell'impianto, sono stati ipotizzati $n^{tech} = 3$, mentre per gli altri due impianti sono necessari almeno $n^{tech} = 5$.
  - L_y^{SM} è il costo del lavoro associato all'assunzione di un Sales Manager ($n^{SM} = 1$ per ogni impianto) il cui compito è quello di stringere partnership di fornitura biomassa e vendita biochar.
  - L_y^{CEO} è il costo del CEO/Key Account Manager a cui sono delegati le mansioni di rappresentanza del business all'interno del settore (partecipando a fiere e congressi, stipulando accordi e partnership con altre attività e così via) e a cui è demandato il compito di garantire la conformità del progetto alle norme dettate dall'ente certificatore Verra. Per ogni impianto $n^{CEO} = 1$.

  Tutte le sottovoci del costo di lavoro sono state calcolate moltiplicando il numero di individui richiesti per il *job*: {*Tech*, *SM*, *CEO*} in esame per la RAL^{job} (riportate per ogni singolo caso nelle tabelle sottostanti) da elargire annualmente:

$$L_y^{job} = n^{job} * RAL^{job}$$

- $\boldsymbol{E_y^{Tr}}$: costo associato alle trasferte di servizio per ferie, congressi al fine di sponsorizzare il business all'interno del settore e pubblicizzare il prodotto offerto al mercato.

- $\boldsymbol{MKT_{Rev,y}^{P_{Sc}}}$: spese di marketing che, come anticipato, dipendono dallo scenario di prezzo analizzato e dal modello di revenues adottato.

$$MKT_{Rev,y}^{P\ Sc} = \%RT_{Rev,y} * RT_{Rev,y}^{Sc\ P}$$

Tali spese "catturano" una porzione delle revenues annuali $\%RT_{Rev,y}$ al fine di sponsorizzare i prodotti sul mercato B2C-B2B e favorirne la penetrazione. Per i progetti italiani, dove il business è maggiormente incentrato sulla vendita di biochar, il $MKT_{Rev,y}^{P\ Sc}$ del BST-10 risulta maggiore con $\%RT_y = 20\%$ e $\%RT_{prod,y} = 18\%$ nel caso di revenues derivanti dalla sola vendita di biochar o dall'offerta di biochar e wood vinegar in bundling rispettivamente, rispetto al BST-05 Pro, dove la diminuzione degli effetti positivi della scala obbliga una riduzione delle spese di marketing al 15%. Per i casi brasiliani invece si sono assunte spese di marketing inferiori dal momento che la vendita di biochar e wood vinegar dovrebbe essere assicurata ex-ante tramite accordi di fornitura-vendita con i fornitori di biomassa ($\%RT_y = 10\%$ e $\%RT_{prod,y} = 8\%$).

- $\boldsymbol{C_{VCU_y}^{E}}$: rappresenta il costo di emissione indicato nella metodologia Verra[41]. Considerando che $1\ VCU = 1\ tCO_2eq\ Removed = ER_y$ (dato riportato nel Cap. 10.8 *Stima delle tonnellate di GHG emissions sequestrate tramite l'utilizzo del modello di Verra*), si ha che:

$$C_{VCU_y}^{E} = c_{VCU}^{e} * (-ER_y) + V_{fee_y}$$

Se il numero di VCU emessi rientra nell'intervallo [1,10k], allora $c_{VCU}^{e} = \$0{,}05\ tCO_2eq^{-1}$, se invece il volume di emissione rientra nell'intervallo (10k,1M], allora $c_{VCU}^{e} = \$0{,}14\ tCO_2eq^{-1}$. Durante l'analisi sono stati considerati solo questi due intervalli di prezzo poiché il volume di tCO_2eq rimosse non eccede 1M. $V_{fee_y} = 2500\ \$\ y^{-1}$, invece, rappresenta il costo da corrispondere a Verra per il validation/verification process.

- $\boldsymbol{MRO_y}$: Maintenance, Repair and Operation costs annuali dell'impianti, stimati all'1% del valore medio dell' I_{Inv}^{SC} coem segue:

$$MRO_y = 1\% * \left(\frac{I_{Inv}^{BC} + I_{Inv}^{WC}}{2}\right)$$

- $\boldsymbol{MNT_{8th\ y}^{Special}}$: costo associato alla manutenzione speciale sul reattore da realizzare all'ottavo anno di vita utile al fine di prolungare quest'ultima di ulteriori sei. Questa voce è stata stimata al 70% del prezzo di compravendita dell'impianto pattuito con Beston (I_{Plant}), ovvero:

[41] *Program Fee Shedule V4.1* (Verra, 2020), disponibile al link: https://verra.org/wp-content/uploads/Program-Fee-Schedule_v4.1.pdf.

$$MNT_{8th\,y}^{Special} = 70\% * I_{Plant}$$

- $\left(\mathbf{1} + \boldsymbol{r^{infl}}\right)^{(y-y_0)}$: termine che tiene conto dell'aggiustamento dei prezzi dovuti ad un tasso inflattivo YoY medio $r^{infl} = 4{,}50\%$.

10.5.1. ITA 1. BST-05 Pro: riepilogo dei Costi Operativi annuali

CASE ITA 1. BST-05 Pro ANNUAL OPERATING COSTS				
Industrial Covered Hangar - 500 mq		$		36.000,00
Labor Cost	Technicians RAL (needed)	$		105.000,00
	Sales Manager	$		35.000,00
	CEO	$		45.000,00
	Labor cost (tot)	$		185.000,00
Marketing - Transfers, Industry Exhibitions		$		3.000,00
Marketing Biochar only (15% Revenues)	18%	Best Price Scenario	$	130.136,86
		Middle Price Scenario	$	104.096,37
		Worst Price Scenario	$	78.055,88
VERRA Emission Fee		$		2.566,87
Other		$		20.000,00
Annual MRO		1%	$	4.488,99
>> Special Maintanance 8th year <<		70%	$	52.283,00
TOT OC - Biochar Only	Best Price Scenario		$	398.346,39
	Middle Price Scenario		$	371.134,08
	Worst Price Scenario		$	343.921,76

Operating Cost	Pure Cost	$/tonbiochar	% of Total Ann. Cost
- Industrial Hangar rent	$ 36.000,00	$ 51,62	5,9%
- Labour Cost	**$ 185.000,00**	**$ 265,26**	**30,3%**
- Marketing			
'- Best Price Scenario	**$ 130.136,86**	**$ 186,60**	**21,3%**
'- Middle Price Scenario	**$ 104.096,37**	**$ 149,26**	**17,0%**
'- Worst Price Scenario	**$ 78.055,88**	**$ 111,92**	**12,77%**
Tot Operating Cost			**% of Total Ann. Cost**
'- Best Price Scenario	**$ 400.378,02**	**$ 574,08**	**62,7%**
'- Middle Price Scenario	**$ 373.165,71**	**$ 535,06**	**61,0%**
'- Worst Price Scenario	**$ 345.953,40**	**$ 496,04**	**59,2%**

Tabella 27. Caso ITA.1 BST-05 Pro: riepilogo dei Costi Operativi annuali.

10.5.2. ITA 2. BST-10: riepilogo dei Costi Operativi annuali

CASE ITA 2. BST-10 ANNUAL OPERATING COSTS				
Industrial Covered Hangar - 1000 mq			$	96.000,00
Labor Cost	Technicians RAL (needed)		$	175.000,00
	Sales Manager		$	70.000,00
	CEO		$	45.000,00
	Labor cost (tot)		$	290.000,00
Marketing - Transfers, Industry Exhibitions			$	3.000,00
Marketing Biochar only (X% Revenues)	20%	Best Price Scenario	$	537.394
		Middle Price Scenario	$	429.861
		Worst Price Scenario	$	319.995
Marketing By Products (X% Revenues)	18%	Best Price Scenario	$	581.166
		Middle Price Scenario	$	469.759
		Worst Price Scenario	$	356.254
VERRA Emission Fee			$	2.885,23
Other			$	20.000,00
Annual MRO		1%	$	9.021,81
>> Special Maintanance 8th year <<		70%	$	140.000,00

TOT OC - Biochar Only	Best Price Scenario	$	1.001.424,77
	Middle Price Scenario	$	889.052,78
	Worst Price Scenario	$	774.243,01
TOT OC - By Products	Best Price Scenario	$	1.047.166,12
	Middle Price Scenario	$	930.746,47
	Worst Price Scenario	$	812.132,82

Operating Cost	Pure Cost	$/tonbiochar	% of Total Ann. Cost
- Industrial Hangar rent	$ 96.000,00	$ 37,04	4,4%
- Labour Cost	**$ 290.000,00**	**$ 111,88**	**13,3%**
- Marketing			
'- Best Price Scenario	**$ 537.394,18**	**$ 207,33**	**24,7%**
'- Middle Price Scenario	**$ 429.861,17**	**$ 165,84**	**19,7%**
'- Worst Price Scenario	**$ 319.995,36**	**$ 123,46**	**14,68%**
Tot Operating Cost			
'- Best Price Scenario	**$ 998.386,91**	**$ 385,18**	**43,6%**
'- Middle Price Scenario	**$ 886.014,92**	**$ 341,83**	**40,7%**
'- Worst Price Scenario	**$ 771.205,15**	**$ 297,53**	**37,4%**

Tabella 28. Caso ITA 2. BST-10: riepilogo dei Costi Operativi annuali.

10.5.3. BRA 3. 2xBST-10: riepilogo dei Costi Operativi annuali

Caso BRA 3. 2xBST-10 ANNUAL OPERATING COSTS				
Industrial Covered Hangar - 1000 mq			$	192.000,00
Labor Cost	Technicians RAL (needed)		$	200.000,00
	Sales Manager		$	60.000,00
	CEO		$	40.000,00
	Labor cost (tot)		$	300.000,00
Marketing - Transfers, Industry Exhibitions			$	3.000,00
Marketing Biochar only (X% Revenues)	10%	Best Price Scenario	$	159.631
		Middle Price Scenario	$	129.971
		Worst Price Scenario	$	97.603
Marketing Biochar only (X% Revenues)	8%	Best Price Scenario	$	156.568
		Middle Price Scenario	$	128.507
		Worst Price Scenario	$	98.278
VERRA Emission Fee			$	3.368,35
Other			$	20.000,00
Annual MRO		1%	$	12.330,16
>> Special Maintanance <<		70%	$	280.000,00
TOT OC - Biochar Only		Best Price Scenario	$	721.394,33
		Middle Price Scenario	$	690.400,04
		Worst Price Scenario	$	656.575,22
TOT OC - By Products		Best Price Scenario	$	718.193,57
		Middle Price Scenario	$	688.869,29
		Worst Price Scenario	$	657.280,59

Operating Cost	Pure Cost	$/tonbiochar	% of Total Ann. Cost
- Industrial Hangar rent	$ 192.000,00	$ 37,04	11,9%
- Labour Cost	**$ 300.000,00**	**$ 57,87**	**18,6%**
- Marketing			
'- Best Price Scenario	$ 159.630,99	$ 30,79	9,9%
'- Middle Price Scenario	$ 129.971,38	$ 25,07	8,1%
'- Worst Price Scenario	$ 97.603,13	$ 18,83	6,07%
Tot Operating Cost			
'- Best Price Scenario	**$ 714.394,38**	**$ 137,81**	**43,6%**
'- Middle Price Scenario	**$ 683.400,09**	**$ 131,83**	**42,5%**
'- Worst Price Scenario	**$ 649.575,27**	**$ 125,30**	**41,2%**

Tabella 29. Caso BRA 3. 2xBST-10: riepilogo dei Costi Operativi annuali.

10.5.4. BRA 4. BST-30: : riepilogo dei Costi Operativi annuali

Caso BRA 4. BST-30 ANNUAL OPERATING COSTS				
Industrial Covered Hangar - 1000 mq		$		96.000,00
Labor Cost	Technicians RAL (needed)	$		100.000,00
	Sales Manager	$		60.000,00
	CEO	$		40.000,00
	Labor cost (tot)	$		200.000,00
Marketing - Transfers, Industry Exhibitions		$		3.000,00
Marketing Biochar only (X% Revenues)	10%	Best Price Scenario	$	159.631
		Middle Price Scenario	$	129.971
		Worst Price Scenario	$	97.603
Marketing Biochar only (X% Revenues)	8%	Best Price Scenario	$	156.568
		Middle Price Scenario	$	128.507
		Worst Price Scenario	$	98.278
VERRA Emission Fee		$		4.174,66
Other		$		20.000,00
Annual MRO		1%	$	8.305,38
>> Special Maintanance <<		70%	$	210.000,00
TOT OC - Biochar Only	Best Price Scenario		$	513.211,02
	Middle Price Scenario		$	482.216,73
	Worst Price Scenario		$	448.391,91
TOT OC - By Products	Best Price Scenario		$	510.010,26
	Middle Price Scenario		$	480.685,98
	Worst Price Scenario		$	449.097,28

Operating Cost	Pure Cost	$/tonbiochar	% of Total Ann. Cost
- Industrial Hangar rent	$ 96.000,00	$ 12,35	4,3%
- Labour Cost	$ 200.000,00	$ 25,72	8,9%
- Marketing			
'- Best Price Scenario	$ 159.630,99	$ 20,53	7,1%
'- Middle Price Scenario	$ 129.971,38	$ 16,71	5,8%
'- Worst Price Scenario	$ 97.603,13	$ 12,55	4,36%
Tot Operating Cost			
'- Best Price Scenario	**$ 509.574,38**	**$ 65,53**	**22,5%**
'- Middle Price Scenario	**$ 478.580,09**	**$ 61,55**	**21,4%**
'- Worst Price Scenario	**$ 444.755,27**	**$ 57,20**	**20,2%**

Tabella 30. Caso BRA 4. BST-30: riepilogo dei Costi Operativi annuali.

10.5.5. Confronto dei Costi Operativi annuali

In Tab. 27, Tab. 28, Tab. 29 e Tab. 30 sono raffigurati i Costi Operativi annuali per i casi ITA 1 BST-05 Pro, ITA 2 BST-10, BRA 3 2xBST-10 e BRA 4 BST-30 rispettivamente[42]. Inoltre, viene riportato il peso specifico che tali costi esercitano su una singola tonnellata di biochar prodotta, nonché la percentuale di composizione della voce di Costo Totale annuale, evidenziando in grassetto le voci di costo a cui corrisponde un maggior effort economico. Non sono invece riportati gli Operative Costs dei casi basati sul modello di ricavi By products data la loro estrema somiglianza. Da sottolineare che gli OC dipendono direttamente dallo scenario di prezzo in esame poiché le spese di marketing sono state desunte come percentuale dei ricavi totali ottenuti.

Per quanto concerne l'impianto BST-05 Pro (Tab. 27), gli OC medi annuali ammontano a circa k$340-k$400 a seconda dello scenario di prezzo, pesando per circa \$500 t^{-1} (*Wp*) - \$570 t^{-1} (*Bp*) di biochar prodotto e rappresentando approssimativamente il 60% dei costi totali d'esercizio da sostenere. Il caso ITA 1 è l'unico ad avere OC > COGS poiché il contenuto rateo produttivo genera costi inferiori rispetto alle spese di marketing (18% dei ricavi) e alle spese di manodopera messi insieme. Quest'ultime pesano ampiamente sulla profittabilità del progetto stesso poiché pesano per \$265 t^{-1} (k$185, 30% dei CT annuali).

Discorso opposto, invece, per l'impianto BST-10 (Tab. 28) che, grazie agli effetti di scala, riesce ad ammortizzare nel tempo le spese relative alla manodopera generando OC annuali inferiori ai COGS pari a k$770 (*Wp*) – \$1 mln (*Bp*) pesando per \$298 t^{-1} (*Wp*) - \$385 t^{-1} (*Bp*) di biochar prodotto e rappresentando circa il 40% dei CT annui.

Per i casi brasiliani invece, BRA 3 (Tab. 29) mantiene lo stesso livello di OC rispetto al caso ITA 2 (nonostante i due reattori) pari a 40% dei CT annui a causa delle alte spese di manodopera da dover sostenere per il corretto funzionamento degli impianti. In totale si registrano OC pari a k$649 (*Wp*) – k$714 (*Bp*) che, però, erodono meno valore sulla tonnellata di biochar prodotta a causa degli effeti di scala.

Infine, gli OC relativi al caso BRA 4 (Tab. 30) confermano quanto detto prima, dove i costi di manodopera si riducono sensibilmente dovendo gestire un solo reattore. In questo caso gli OC annuli ammontano a circa k$480 rappresentando circa il 20% dei CT d'esercizio. Si vuole far notare che, in generale, nei casi brasiliani gli OC rappresentano la componente di costo minore poiché sono state ridotte sensibilmente le spese di marketing, non dovendo sostenere economicamente la penetrazione delle vendite di biochar all'interno del mercato dal momento in cui si è assunto che quest'ultime rientrino in schemi di partnership *do ut des* con i fornitori di biomassa.

[42] Nei Costi Operativi è inclusa la voce di marketing, dedotta come percentuale dei ricavi. Per semplicità, il peso specifico dei Costi Operativi annuali su una tonnellata di biochar prodotto è stato calcolato sulla base del modello di ricavo Biochar only.

10.6. Analisi dei Costi Totali annuali d'esercizio

I Costi Totali annuali di progetto vengono calcolati come la somma lineare tra i costi annuali direttamente imputabili alla produzione del bene finale $COGS_y^{TOT}$ e i costi operativi annuali $OC_{Rev_Y}^{P_{Sc}}$.

$$\boldsymbol{CT_{Rev_Y}^{PSc} = COGS_y^{TOT} + OC_{Rev_Y}^{P_{Sc}}}$$

Il confronto per i Costi Totali annuali tra i casi viene rimandato al Cap. 10.7.7 *Confronto dei Ricavi Totali e dei Costi Totali annuali.*

10.7. Analisi del modello di ricavi

Per tutti i casi analizzati, ad eccezione di ITA 1 BST-05 Pro, sono stati presi in considerazione due modelli di ricavi, il primo dimensionato sulla vendita di solo biochar (casi X.MAIUSC.a/b/c/d/e), il secondo sull'offerta in bundling di biochar con wood vinegar (casi X.MAIUSC.aprod/ *Bp*rod/ cprod/ dprod/eprod). Nel primo caso ci riferiremo ai ricavi con la sigla $RT_{b,Y}^{P\,Sc}$, nel secondo con la dicitura $RT_{prod_y}^{PSc}$. Si ricorda che l'apice PSc: {Best Price Scenario, Middle Price Scenario, Worst Price Scenario}, mentre *b* sta per {biochar} e *prod* per {by-products}.

10.7.1. Modello di ricavi basato sulla vendita di solo biochar

Il calcolo dei Ricavi Totali rispetta il seguente procedimento:

$$\boldsymbol{RT_{b,Y}^{PSc} = (R_{b,B2B_y}^{PSc} + R_{b,B2C_y}^{PSc}) * \left(1 + r^{infl}\right)^{(y-y_0)}}$$

dove:

- $\boldsymbol{R_{b,B2B_y}^{PSc}}$: ricavi derivanti dalla vendita B2B di biochar dedotti da $R_{b,B2C_y}^{PSc}$.
- $\boldsymbol{R_{b,B2C_y}^{PSc}}$: ricavi derivanti dalla vendita B2C di biochar, stimati come:

$$R_{b,B2C_y}^{PSc} = (S_{b,B2C_y} * P_{b,B2C}^{PSc})$$

Ipotizzando un tasso di crescita della domanda B2C pari a $d_g = 10\%$ da applicare alla porzione di partenza di biochar destinato a tale mercato (1% nei casi italiani, 0,5% nei casi brasiliani, per comodità viene prima calcolato $S_{b,B2C_y}$ ovvero la quantità di biochar venduta (Sales) B2C, per poi dedurla dalla quantità di biochar prodotta annualmente $Q_{b,y}$ al fine di trovare le vendite B2B annuali $R^{PSc}_{b,B2B_y}$. Nello specifico:

$$S_{b,B2C_y} = Q_{b,y} * \left[1\% * \left(1 + d_g\right)^{(y-y_0)}\right]$$

Da cui:

$$S_{b,B2B_y} = Q_{b,y} - S_{b,B2C_y}$$

per poi ottenere:

$$R^{PSc}_{b,B2B_y} = S_{B2B_y} * P^{PSc}_{B2B}$$

10.7.2. Modello di ricavi basato sulla vendita di biochar e wood vinegar in bundling

In questo frangente, si riutilizzano $R^{PSc}_{b,B2C_y}$e $R^{PSc}_{b,B2B_y}$ per determinare in egual maniera $RT^{PSc}_{b,Y}$ (il termine $\left(1 + r^{infl}\right)^{(y-y_0)}$che tiene conto dell'aggiustamento dei prezzi a causa del tasso di inflazione viene conteggiato solo nel calcolo finale dei Ricavi Totali).

Allo stesso modo si otterrà:

$$\boldsymbol{RT^{PSc}_{prod_y} = (RT^{PSc}_{b,Y} + R^{PSc}_{WV_Y}) * \left(1 + r^{infl}\right)^{(y-y_0)}}$$

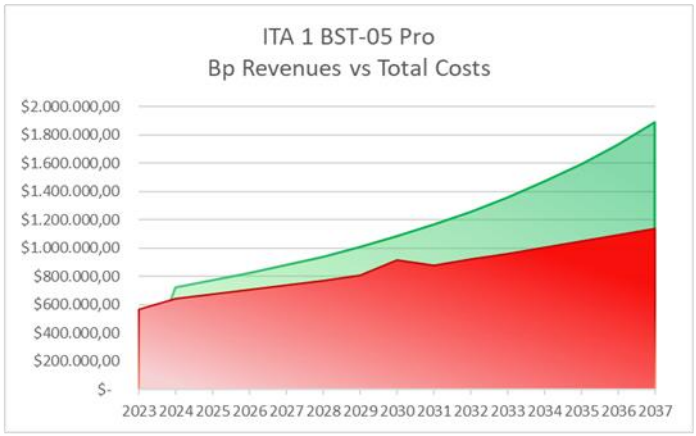
dove:

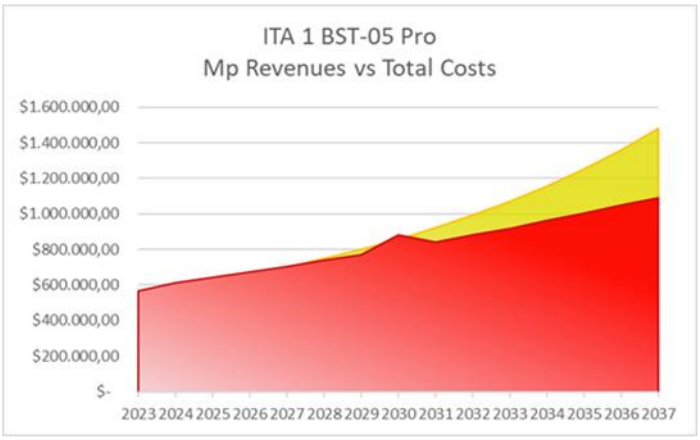
$$R^{PSc}_{WV_y} = Q_{wv,y} * P^{PSc}_{WV}$$

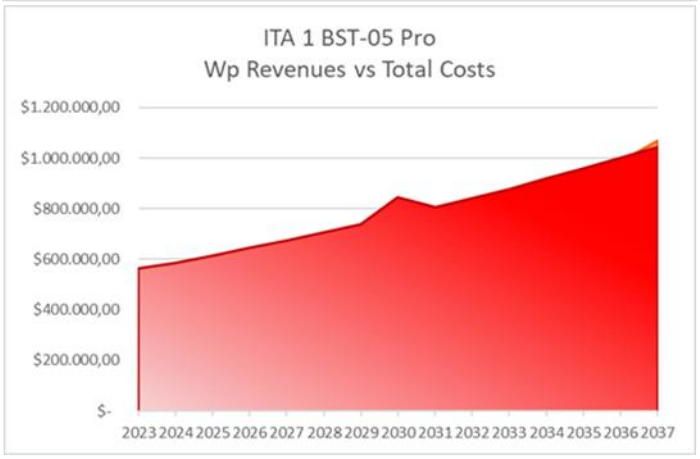
Rappresenta il calcolo dei ricavi derivanti dalla vendita di wood vinegar, ottenuto moltiplicando il prezzo di scenario in esame per la quantità prodotta uguale a:

$$Q_{wv,y} = 6\% * b_y$$

10.7.3. ITA 1. BST-05 Pro: riepilogo dei Ricavi Totali vs. Costi totali



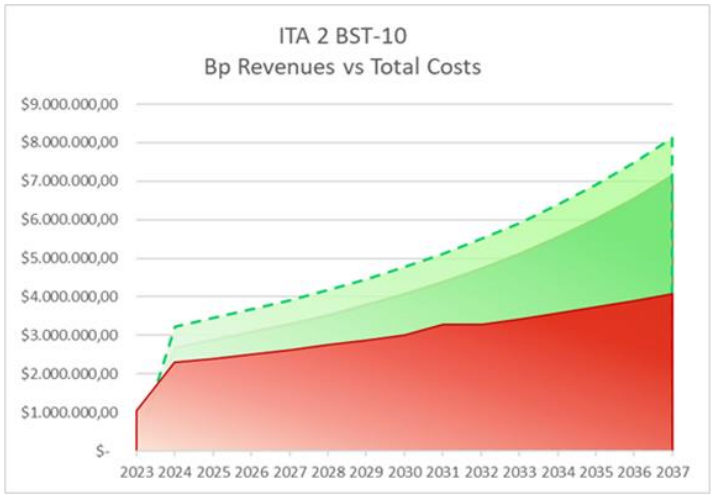


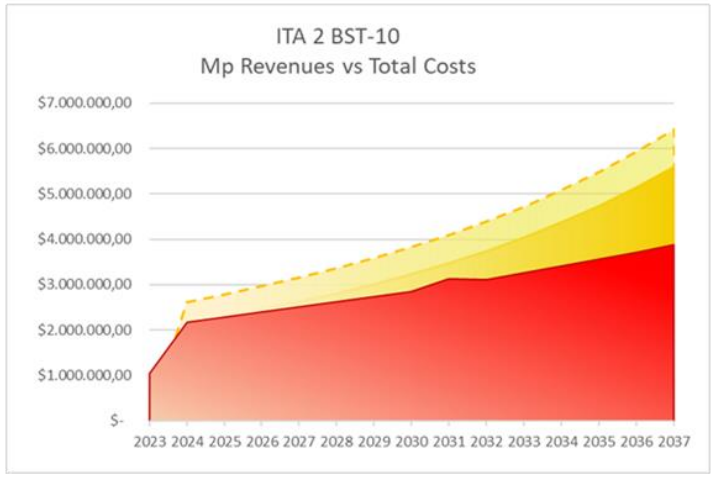


Total Annual Cost	Pure Cost	$/tonbiochar
'- Best Price Scenario	$ 638.606,23	$ 915,66
'- Middle Price Scenario	$ 611.393,92	$ 876,64
'- Worst Price Scenario	$ 584.181,60	$ 837,62

Tabella 31. Caso ITA 1. BST-05 Pro: Grafici Ricavi Totali vs. Costi Totali (rosso) per ogni scenario di prezzo in esame.

10.7.4. ITA 2. BST-10: riepilogo dei Ricavi Totali vs. Costi totali

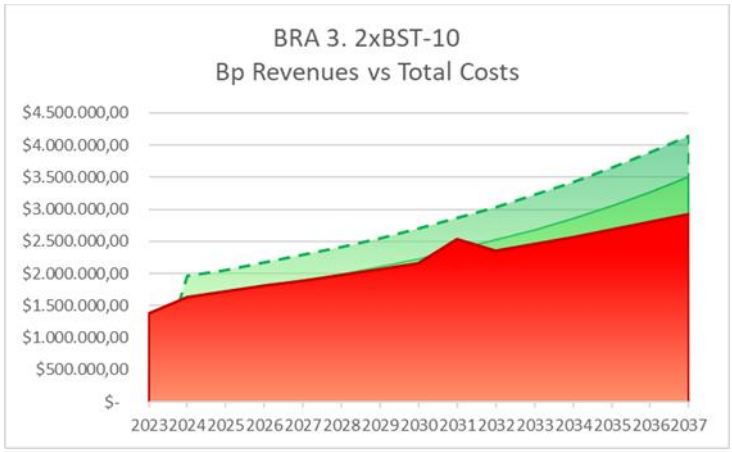


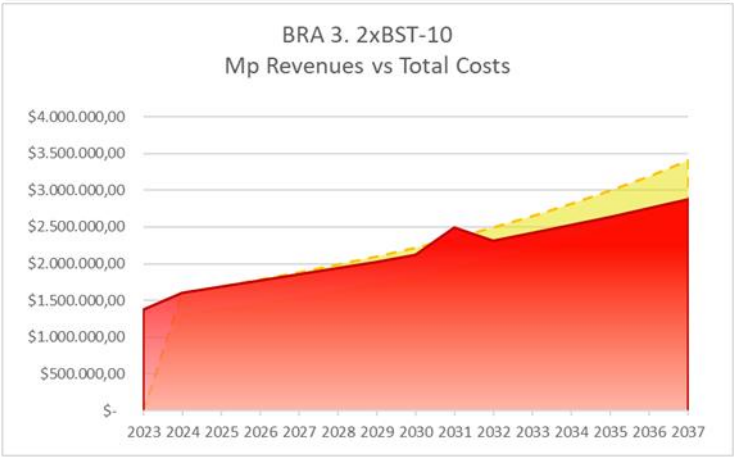


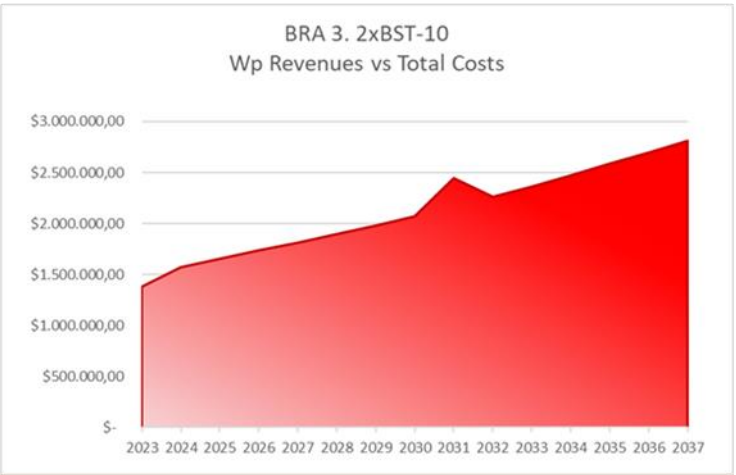
Total Annual Cost	Pure Cost	$/tonbiochar
'- Best Price Scenario	$ 2.291.539,86	$ 884,08
'- Middle Price Scenario	$ 2.179.167,87	$ 840,73
'- Worst Price Scenario	$ 2.064.358,10	$ 796,43

Tabella 32. Caso ITA 2. BST-10: Grafici Ricavi Totali vs. Costi Totali (rosso) per ogni scenario di prezzo in esame.

10.7.5. BRA 3. 2xBST-10: riepilogo dei Ricavi Totali vs. Costi totali



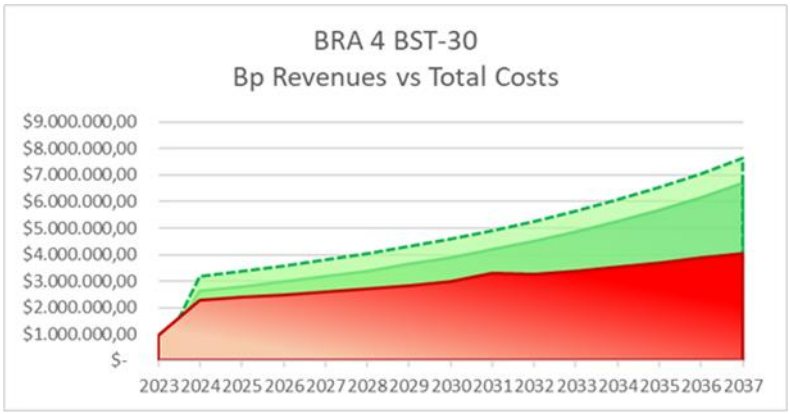


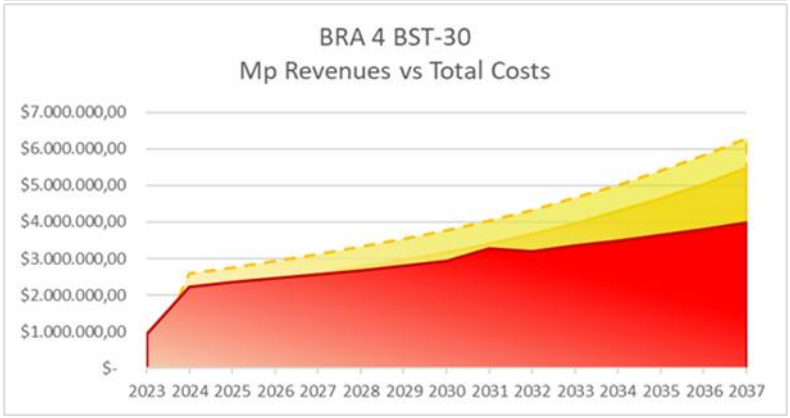


Total Annual Cost	Pure Cost	$/tonbiochar
'- Best Price Scenario	$ 1.640.248,89	$ 316,41
'- Middle Price Scenario	$ 1.609.254,60	$ 310,43
'- Worst Price Scenario	$ 1.575.429,78	$ 303,90

Tabella 33. Caso BRA 3. 2xBST-10: Grafici Ricavi Totali vs. Costi Totali (rosso) per ogni scenario di prezzo in esame.

10.7.6. BRA 4. BST-30: riepilogo dei Ricavi Totali vs. Costi totali





Total Annual Cost	Pure Cost	$/tonbiochar
'- Best Price Scenario	$ 2.267.176,76	$ 291,56
'- Middle Price Scenario	$ 2.236.182,47	$ 287,57
'- Worst Price Scenario	$ 2.202.357,65	$ 283,23

Tabella 34. Caso BRA 4. BST-30: Grafici Ricavi Totali vs. Costi Totali (rosso) per ogni scenario di prezzo in esame.

10.7.7. Confronto dei Ricavi Totali vs. Costi totali

In Tab. 31, Tab. 32, Tab. 33 e Tab. 34 vengono riportati i grafici che mettono a confronto l'andamento dei Ricavi Totali (biochar only linea continua, by products linea tratteggiata) con la progressione dei Costi Totali per i casi ITA 1 BST-05 Pro, ITA 2 BST-10, BRA 3 2xBST-10 e BRA 4 BST-30 rispettivamente. Inoltre, al fondo di ogni tabella, viene riportato il volume di Costo Totale registrato per ogni scenario di prezzo e il peso specifico che tali costi esercitano su una singola tonnellata di biochar prodotta.

Nel caso ITA 1. BST-05 Pro (Tab. 31), per tutti gli scenari di prezzo si è stimato che il 99% del biochar prodotto venga venduto all'ingrosso (690 $t\ y^{-1}$) mentre le restanti 7 $t\ y^{-1}$ vengono assorbite dal mercato hobbistico (1%). Si vuole ricordare che le vendite B2C sono destinate a crescere grazie alle spese di marketing investite influenzando notevolmente la profittabilità progettuale di scenario data la marginalità superiore ricavabile rispetto alle vendite B2B. Nello specifico, per lo scenario *Bp*, la vendita all'ingrosso ha generato ricavi annuali per un totale di k$577,3, mentre quelle del mercato hobbistico k$145,8, ovvero il 20% dei ricavi complessivi annui, i quali si attestano intorno a k$723. Tuttavia, gran parte del valore catturato dalle vendite viene assorbito dal Costo Totale annuale, il quale oscilla tra k$584 (*Wp*) e k$638,6 (*Bp*) il che significa che la produzione di biochar costa in media tra \$838 t^{-1} (*Wp*) e \$916 t^{-1} (*Bp*) di biochar prodotta. Come si può notare in Tab. 31, infatti, i RT annui superano di circa k$100 i CT al primo anno, grazie, appunto, alla superiore marginalità di ricavo delle vendite B2C.

Nello scenario *Mp* invece, le vendite B2B non riescono a coprire i CT per intero e solo all'ottavo anno d'esercizio, a causa dell'espansione delle vendite B2C, i RT riescono a sopra valicare le voci di costo totale. Nello scenario *Wp* questo fenomeno non verrà mai registrato. In questi ultimi due scenari di prezzo per il caso ITA 1, il progetto risulterà poco se non profittevole (complice anche la scarsa redditività imputabile ai crediti al carbonio).

Nel caso ITA. 2 BST-10 (Tab. 32), per lo scenario *Wp* si possono riproporre le stesse considerazioni fatte per il *Wp* del caso ITA 1 dove neanche il modello di ricavi by products riesce a sostenere il peso dei costi d'esercizio. Al contrario, si registra un netto miglioramento per gli scenari di prezzo superiori. Per lo scenario di prezzo *Bp*, senza contare la revenue stream derivante dalla vendita di wood vinegar, le vendite B2B di biochar (2566 tonnellate) registrano un fatturato di \$2,14 mln, mentre le vendite B2C di k$541,7, imputando a 26 tonnellate di biochar destinate alla vendita al dettaglio il 25% dei ricavi totali. Dunque, il fatturato totale si attesta di \$2,7 mln, registrando per il primo anno d'esercizio un +15% sui CT. Questo delta positivo è principalmente imputabile a piccoli, se pur evidenti, effetti di scala dovuti all'aumentando del throughput produttivo. Il secondo caso italiano, infatti, denota costi del 5% inferiori, registrando CT tra \$2,06 mln (*Wp*) e \$2,29 mln (*Bp*) circa, pesando tra i \$796 t^{-1} (*Wp*) e \$884 t^{-1} (*Bp*) di biochar prodotto. A limitare gli effetti di scala, nonostante una ratio produttiva 1:3 rispetto al caso ITA 1, è l'aggiunta del biotrituratore che comporta un aumento dei costi energetici annuali e di investimento e i costi d'acquisto di biomassa e i conseguenti costi di trasporto. I ricavi totali *Bp*, invece, derivanti dalla vendita in bundling di biochar e wood vinegar sono pari a \$3,23 mln, registrando un ulteriore surplus del 18% rispetto al modello di vendite solo biochar che comporta una maggiore profittabilità.

Nello scenario *Mp*, invece, data la differenza di prezzo, si osserva una flessione generale dei ricavi con un fatturato B2B di \$1,74 mln e B2C di k$406,3 per un totale complessivo pari a circa \$2,15 mln. Se per il modello di ricavi biochar only si registrano RT annuali inferiori ai CT fino al quarto anno, il modello di ricavi by products riesce a generare entrate maggiori delle uscite fin da subito grazie al surplus del 18% ottenuto vendendo wood vinergar, arrivando a \$2,61 mln al primo anno.

Per quanto concerne i casi brasiliani, invece, essendo la profittabilità progettuale direttamente legata alla vendita di carbon credits ed essendo gli scenari di prezzo adattati all'inferiore wtp dei farmers brasiliani, i ricavi registrati risultano maggiori dei CT d'esercizio (Tab. 33 e Tab. 34) solo per lo scenario *Bp* (BRA 3) e per gli scenari *Bp*, *Mp* (BRA 4). Nello specifico, per il caso BRA 3 2xBST-10 si registrano CT d'esercizio pari a $1,57 mln (*Wp*) e $1,64 mln (*Bp*), ovvero, $303 t^{-1} (*Wp*) e $316,5 t^{-1} (*Bp*) di biochar prodotto. I RT subiscono il peso generato dai costi gestione dei due impianti installati, dal momento che il loro rateo produttivo di 5'184 $t\ y^{-1}$ di biochar genera solamente circa $1,6 mln, relegando la crescita dei ricavi alle sole vendite B2C. Se si considera invece la vendita di wood vinegar, i RT di $1,95 mln riescono a registrare una marginalità accettabile sui CT.

Nel caso BRA 4. BST-30 viene riportata una flessione del 7% dei CT imputabili ad una tonnellata di biochar prodotta rispetto al primo caso brasiliano dato il maggior volume prodotto (7776 $t\ y^{-1}$), riscontrando CT annuali di circa $22 mln (*Wp*) - $22,67 mln (*Bp*) che si traducono in $283 t^{-1} (*Wp*) e $291 t^{-1} (*Bp*). Si vuole far notare l'influenza dei prezzi di mercato tra Italia e Brasile e di come quest'ultimi portino i CT ad essere, nonostante l'aumento di scala che si traduce in costi aggiuntivi, tre volte inferiori rispetto ai casi italiani. In questo caso, sia il Best Price scenario, sia il Middle Price scenario (per le sole vendite in bundling) rilevano RT positivi e superiori ai CT di esercizio, ovvero $2,6 mln (*Bp*, biochar only) – $3,17 mln (*Bp*, by products) e $2,6 mln (*Mp*, by products) rispettivamente. Per gli altri scenari invece, la pressione dei CT annuali non viene sufficientemente ripagata dai RT che subiscono gli effetti della diminuzione del prezzo di vendita.

10.8. Stima delle tonnellate di GHG emissions sequestrate tramite l'utilizzo del modello di Verra

La metodologia VM0044 di Verra prevede che la quantificazione delle emissioni di CO2e sia dedotta con la seguente formula [68]:

$$\boldsymbol{ER_y = \left(ER_{SS,y} - ER_{PS,y} - ER_{AS,y}\right) - LE_y}$$

- $\boldsymbol{ER_y}$: net GHG emissions reduction nell'anno *y* [tCO2e]. Questa voce indica quanti VCU verranno emessi dall'ente certificatore. Ai fini della valutazione economica del progetto per una grande azienda produttrice di caffè tostato piemontese, il valore di tali VCU verrà conteggiato come entrata positiva.
- $\boldsymbol{ER_{SS,y}}$: riduzione delle emissioni di gas serra nella fase di approvvigionamento nell'anno *y* [tCO2e]
- $\boldsymbol{ER_{PS,y}}$: rimozioni delle emissioni di gas serra nella fase di produzione nell'anno *y* [tCO2e]
- $\boldsymbol{ER_{AS,y}}$: emissioni di gas serra nella fase di applicazione nell'anno *y* [tCO2e]
- $\boldsymbol{LE_y}$: rilocalizzazione delle emissioni di carbonio totali nell'anno *y* [tCO2e]. Quest'ultima si verifica quando c'è un aumento delle emissioni di gas serra a seguito di una riduzione delle emissioni da parte di un'impresa/attività (per esempio i progetti proposti causeranno un'emissione aggiuntiva e non programmata di veicoli atto al trasporto di biomassa in input e di biochar in output)

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

- $\boldsymbol{ER_{SS,y}}$: riduzione delle emissioni di gas serra nella fase di approvvigionamento biomassa nell'anno y [tCO2e], assunto $ER_{SS,y} = \emptyset$.
- $\boldsymbol{BE_{SS,y}}$: emissioni di riferimento nella fase di approvvigionamento biomassa nell'anno *y*; predefinito $BE_{SS,y} = \emptyset$ [tCO2e].
- $\boldsymbol{PE_{SS,y}}$: Emissioni del progetto nella fase di approvvigionamento nell'anno *y*; predefinito $PE_{SS,y} = \emptyset$ [tCO2e], in quanto il materiale di scarto di origine biogenica è da considerarsi biomassa rinnovabile.

$$\boldsymbol{ER_{PS,y} = \sum_{t,k,p} (CC_{t,k,p} * \frac{44}{12}) - PE_{PS,t,p,y}}$$

- $\boldsymbol{ER_{PS,y}}$: rimozioni delle emissioni di gas serra nella fase di produzione nell'anno y [tCO2e].
- $\boldsymbol{CC_{t,k,p}}$: contenuto di carbonio organico calcolato sul peso a secco di biochar prodotto di tipo *t,* utilizzato per soddisfare la domanda *k* nell'anno *y* [t].
- $\boldsymbol{PE_{PS,t,p,y}}$: emissioni di progetto per la produzione di biochar di tipo *t* per l'impianto di produzione *p* nell'anno *y* [tCO2e].
- $\frac{\mathbf{44}}{\mathbf{12}}$: coefficiente di conversione del carbonio organico da [t] in [tCO2e].

$$\boldsymbol{CC_{t,k,y} = M_{t,k,p,y} * F_{Cp,t,p} * PR_{de,k}}$$

- $\boldsymbol{CC_{t,k,y}}$: contenuto di carbonio organico calcolato sul peso a secco di biochar di tipo *t* utilizzato per soddisfare la domanda *k* nell'anno *y* [t]. La tipologia di biochar *t* è strettamente correlata (dipende) dalla materia prima d'origine utilizzata.
- $\boldsymbol{M_{t,k,p,y}}$: massa a secco di biochar di tipo *t* utilizzata per l'applicazione di tipo *k* prodotta all'impianto di produzione *p* nell'anno *y* [t].
- $\boldsymbol{F_{Cp,t,p}}$: contenuto di carbonio organico del biochar di tipo *t* prodotto nell'impianto di produzione *p* per tonnellata di biochar, presa sulla base del peso secco [%]. Per gli high technology pyrolyzer, questo parametro è definito attraverso l'analisi in laboratorio del biochar stesso.
- $\boldsymbol{PR_{de,k}}$: fattore di aggiustamento della permanenza di carbonio nel suolo dovuto al decadimento del contenuto di carbonio organico per tipo di applicazione *k*. In questo case study, è stato assunto un $PR_{de,k} = \emptyset$.

Come riportato nello studio *Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects*[43] (Tomczyk, A., 2020), attraverso l'analisi della *Table 2. Biochar characteristic in different temperature from fruits and vegetables* biomass è stato stimato il contenuto di carbonio organico %C per ogni tipo di biochar prodotto tramite pirolisi a 600 °C come segue:

- Biochar prodotto da scarti del caffè: $F_{Cp,coffee} = 65\%$ (Domingues et al., 2017).
- Biochar prodotto da scarti dei raccolti cerealicoli $F_{Cp,wheat} = 83\%$ (Zama et al., 2017).
- Biochar prodotto da gusci di frutta secca: $F_{Cp,wheat} = 87\%$ (Ahmad et al., 2012).

$$\boldsymbol{PE_{PS,t,p,y} = \sum_{t} [(P_{ED,p,y} + P_{EP,p,y} + P_{EC,p,y}) * \left(\frac{M_{t,k,p,y}}{\sum M_{x,p,y}}\right)]}$$

- $\boldsymbol{PE_{PS,t,p,y}}$: emissioni di progetto esalate durante la fase di produzione nell' impianto *p* per il biochar di tipo *t* nell'anno *y* [tCO2e].
- $\boldsymbol{P_{ED,p,y}}$: emissioni associate al pretrattamento della biomassa di scarto in produzione nell'impianto *p* nell'anno *y* [tCO2e].
- $\boldsymbol{P_{EP,p,y}}$: emissioni esalate per la conversione della biomassa di scarto in biochar nell'impianto di produzione *p* nell'anno *y* [tCO2e]. Per gli impianti di produzione ad alta tecnologia, le emissioni nette sono considerate *de minimis* in quanto, seguendo la definizione di impianto di produzione ad alta tecnologia, l'elevata efficienza termica di combustione e il recupero/riuso di gas pirolitici limitano le emissioni di metano in atmosfera. Pertanto, $P_{EP,p,y} = \emptyset$.
- $\boldsymbol{P_{EC,p,y}}$: emissioni dovute all'utilizzo di energia ausiliaria per alimentare il processo di pirolisi per l'impianto di produzione *p* nell'anno *y* [tCO2e].
- $\boldsymbol{M_{t,k,p,y}}$: massa a secco di biochar di tipo *t* destinato all'applicazione di tipo *k* e prodotto nell'impianto *p* nell'anno *y* [t].

[43] Tomczyk, A., Sokołowska, Z. & Boguta, P. *Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects*. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 19, 191–215 (2020).

- $\sum \boldsymbol{M_{x,p,y}}$: massa a secco totale di biochar prodotta nell'impianto *p* in anno *y* [t].

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

- $\boldsymbol{P_{ED,p,y}}$: emissioni associate al pretrattamento della materia prima presso l'impianto di produzione *p* nell'anno *y* [tCO2e].
- $\boldsymbol{P_{EDE,p,y}}$: emissioni associate all'utilizzo di energia elettrica utilizzata per il pretrattamento della biomassa di scarto presso l'impianto di produzione *p* nell'anno *y* [tCO2e]. $P_{EDE,p,y}$ deve essere calcolato secondo le disposizioni contenute nel *CDM Methodological Tool 05: Baseline, project and/or leakage emissions from electricity consumption and monitoring of electricity generation*[44]. In questo caso, si è assunto $P_{EDE,p,y} = \emptyset$ poiché l'impianto acquista sul mercato libero energia prodotta da fonti rinnovabili.
- $\boldsymbol{P_{EDF,p,y}}$: emissioni associate alla combustione di combustibili fossili utilizzati per il pretrattamento di biomassa di scarto nell'impianto di produzione *p* nell'anno *y* [tCO2e]. $P_{EDF,p,y}$ deve essere calcolato come indicato sul *CDM Methodological Tool 03: Tool to calculate project or leakage CO2 emissions from fossil fuel combustion*[45]. Il coefficiente di conversione $[tCO2\ L^{-1}]$ $COEF_{i,y}$ adottato per il consumo di benzina da imputare al biotrituratore a scoppio è $2{,}34\ kgCO_2\ L^{-1}$ [46].

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

- $\boldsymbol{P_{EC,p,y}}$: emissioni dovute all'utilizzo di energia ausiliaria ai fini della pirolisi per l'impianto di produzione *p* nell'anno *y* [tCO2e].
- $\boldsymbol{P_{ECE,p,y}}$: emissioni associate all'utilizzo dell'energia elettrica per l'avviamento del reattore presso l'impianto di produzione *p* nell'anno *y* [tCO2e]. $P_{ECE,p,y}$ deve essere calcolato come indicato sul *CDM Methodological Tool 05: Baseline, project and/or leakage emissions from electricity consumption and monitoring of electricity generation.* È stato assunto un $P_{ECE,p,y} = \emptyset$ poiché l'impianto acquista sul mercato libero energia prodotta da fonti rinnovabili.
- $\boldsymbol{P_{ECF,p,y}}$: emissioni associate alla combustione dei combustibili fossili utilizzati per l'avviamento del reattore presso l'impianto di produzione *p* nell'anno *y* [tCO2e]. $P_{ECF,p,y}$ deve essere calcolato come indicato sul *CDM Methodological Tool 03: Tool to calculate project or leakage CO2 emissions from fossil fuel combustion*. Il coefficiente di conversione $[tCO2\ m^{3^{-1}}]$ $COEF_{i,y}$ adottato per il consumo di gas naturale da imputare all'avviamento del processo di combustione all'interno del reattore è 1,96 $kgCO_2\ m^{3^{-1}}$ [47].

$$\boldsymbol{ER_{AS,y} = \sum_{k,t} [(-1) * (E_{p,t,k,y} + E_{ap,t,k,y})]}$$

[44] Disponibile al link: https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-05-v3.0.pdf.
[45] Op. Cit.
[46] Disponibile al link: https://www.tcs.ch/mam/Digital-Media/PDF/Booklets/FAQ-diossido-di-carbonio-CO2.pdf.
[47] Disponibile al link: https://www.mite.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/emission_trading/tabella_coefficienti_standard_nazionali_2011_2013_v1.pdf.

- $\boldsymbol{ER_{AS,y}}$: emissioni di gas serra esalate durante la fase di applicazione nel suolo del biochar nell'anno *y* [tCO2e]. Dal calcolo è stato dedotto $ER_{AS,y} = \emptyset$.
- $\boldsymbol{E_{p,t,k,y}}$: emissioni derivanti dalla preparazione del biochar di tipo t per il tipo di applicazione k nell'anno y [tCO2e]. In questo caso si è assunto un $E_{p,t,k,y} = \emptyset$ poiché non sono state previste tali lavorazioni antecedenti l'applicazione nel suolo (ad esempio sizing, macinazione, setacciatura).
- $\boldsymbol{E_{ap,t,k,y}}$: emissioni derivanti dall'utilizzo di biochar di tipo t per il tipo di applicazione k nell'anno y [tCO2e]. Emissioni di gas serra derivanti dalla combustione di combustibili fossili o dalla miscelazione di biochar con prodotti fertilizzanti sono considerati trascurabili. Quindi $E_{ap,t,k,y} = \emptyset$.

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

- $\boldsymbol{LE_y}$: rilocalizzazione delle emissioni di carbonio totali nell'anno *y* [tCO2e].
- $\boldsymbol{LE_{as,y}}$: rilocalizzazione delle emissioni di carbonio dovuta allo spostamento dell'attività agricola nell'anno *y* per far spazio ad un'attività agricola il cui scopo è quello di fornire biomassa per la produzione di biochar [tCO2e]. La perdita dovuta allo spostamento dell'attività è $LE_{as,y} = \emptyset$ poiché l'uso di biomassa appositamente coltivata per la produzione di biochar non è consentito.
- $\boldsymbol{LE_{bd,y}}$: rilocalizzazione delle emissioni di carbonio dovuta ad altro utilizzo della biomassa rispetto al suo utilizzo originario (diversione della biomassa) nell'anno *y* [tCO2e]. La diversione è considerata trascurabile poiché è possibile utilizzare solo la biomassa che sarebbe stata bruciata o abbandonata in decomposizione.
- $\boldsymbol{LE_{ts,y}}$: rilocalizzazione delle emissioni di carbonio dovuta al trasporto di biomassa di scarto per l'approvvigionamento del reattore di produzione nell'anno *y* [tCO2e]. Come indicato sul *CDM Methodological Tool 16: Project and leakage emissions from biomass*[48], tali emissioni devono essere conteggiate solo se la distanza di trasporto è superiore a 200 km. Per il calcolo di tali emissioni il proponente del progetto deve utilizzare *CDM Methodological Tool 12: Project and leakage emissions from transportation of freight*[49] come segue:

$$LE_{ts,y} = \frac{\left[\sum_i \left(km^{x_i - plant} * n_{trucks}^{x_i - plant}\right) * \frac{kgCO_2eq}{km}\right]}{1000}$$

- $\boldsymbol{LE_{tap,y}}$: rilocalizzazione delle emissioni di carbonio dovute al trasporto di biochar dall'impianto di produzione a il sito di fine applicazione nell'anno *y* [tCO2e]. Come indicato sul *CDM Methodological Tool 16: Project and leakage emissions from biomass*, le emissioni di gas serra devono essere contabilizzate solo se la distanza di trasporto è superiore a 200 km. Per il calcolo di tali emissioni il proponente del progetto deve utilizzare *CDM Methodological Tool 12: Project and leakage emissions from transportation of freight* come segue:

[48] Disponibile al link: https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-16-v4.pdf.
[49] Disponibile al link: https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-12-v1.1.0.pdf.

$$LE_{tap,y} = \frac{\left[\sum_i \left(km^{plant-x_i} * n_{trucks}^{plant-x_i}\right) * \frac{kgCO_2eq}{km}\right]}{1000}$$

10.9. Stima della valorizzazione economica dei VCU generati

Il valore attribito ai carbon credits si ottiene moltiplicando le tonnellate nette di anidride carbonica equivalente rimosse ER_y calcolate tramite il modello Verra per ogni caso analizzato per la stima del valore di mercato conferito ad un credito di carbonio Verra. Pertanto si ottiene:

$$\boldsymbol{V_{VCU,Y}^{SC} = ER_y * \left[v_0^{ITA/BRA} * \left(1 + v_g^{SC}\right)^{(y-y_0)}\right]}$$

Il valore dei crediti al carbonio è stato calcolato moltiplicando il valore base di partenza $v_0^{ITA/BRA}$ per la crescita stimata (BC-WC) del valore stesso v_g^{SC}, determinata dalla crescita del VCM come descritto nel Cap. 7. Si ricorda che $v_g^{BC} = \$5{,}04\ tCO2eq^{-1}y^{-1}$ mentre $v_g^{BC} = \$2{,}18\ tCO2eq^{-1}y^{-1}$. Inoltre, si vuole evidenziare come il valore base $v_0^{ITA/BRA}$ dipende fortemente dalla locazione geografica in cui il progetto è situato poiché in economie come quella europea, ampiamente sviluppate, è maggiormente difficile dimostrare l'addizionalità dei crediti emessi sul mercato determinando quindi un valore base più basso, stimato come $v_0^{ITA} = \$4{,}50\ tCO2eq^{-1}$.

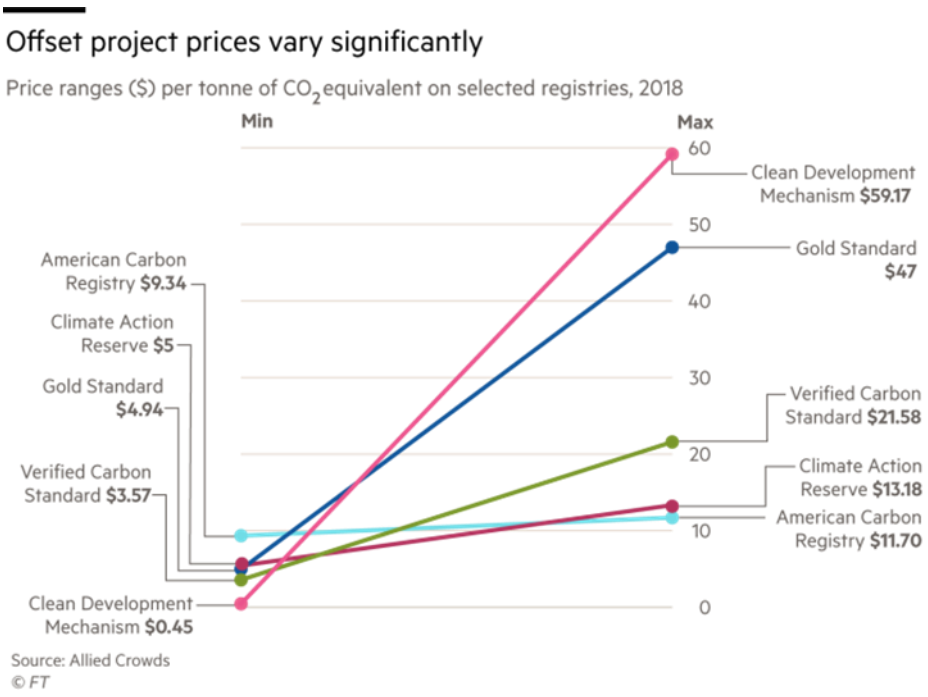


Figura 39. Range di prezzo dei crediti al carbonio per ente certificatore [80].

Anche se, come si può osservare in Fig. 39, il valore per i VCU oscilla tra $\$3{,}57\ tCO2eq^{-1}$ e $\$21{,}58\ tCO2eq^{-1}$, il valore medio è più vicino al lower boud di tale range, compreso tra $\$4\ tCO2eq^{-1}$ e $\$6\ tCO2eq^{-1}$ circa [80] [81] e, dunque, si è scelto di adottare una stima conservativa onde evitare una sopravvalutazione dell'impatto dell'entrate positive generate dalla vendita di carbon credits. In Brasile, al contrario, è stato scelto un valore base $v_0^{BRA} = \$80\ tCO2eq^{-1}$, decisamente più alto rispetto al caso italiano. In quest'ottica, tale disparità di valore è spiegabile osservando come il business di alcuni produttori di biochar situati in paesi in via di sviluppo (ad esempio NetZero in Brasile o HUSK Ventures in Cambogia) debba essere incentrato maggiormente sulla redditività derivante dalla vendita di carbon credits, poiché questi sono obbligati ad offrire il loro biochar a prezzi fortemente scontati in adeguamento alla wtp dei farmers locali. Gli enti certificatori come Puro.Earth ne sono consapevoli e, a fronte di un'addizionalità maggiore e verificata, sostengono questi progetti nell'aumentare considerevolmente il prezzo di vendita dei crediti al carbonio emessi attraverso le loro organizzazioni. Infatti, a titolo esemplificativo, si riporta il caso di Puro.Earth, un marketplace che elenca circa 23 progetti biochar, il quale offre una gamma di carbon credits il cui valore oscilla tra $\$98\ tCO2eq^{-1}$ e $\$524\ tCO2eq^{-1}$ [82]. Anche in questo caso, però, si è scelta una stima conservativa di v_0^{BRA}, inferiore rispetto ai valori riportati dal marketplace di Puro.Earth e più adiacente rispetto al lower bound del range di prezzo indicato in Fig. 40.

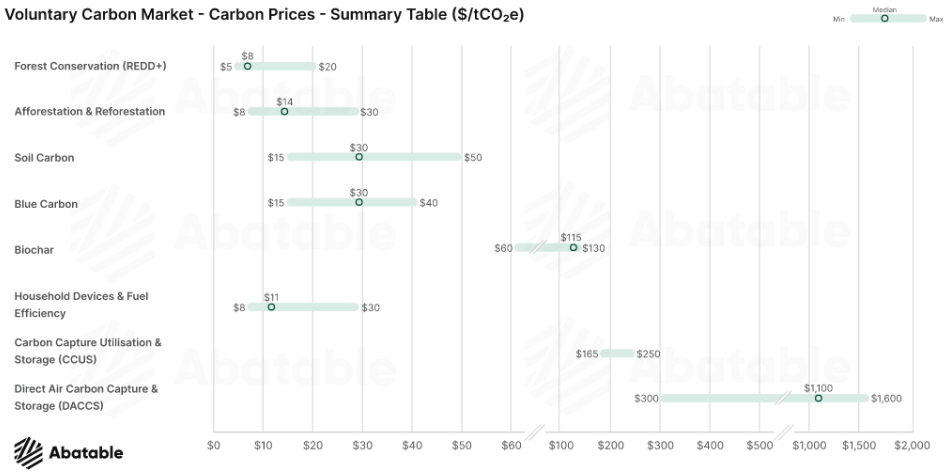


Figura 40. Prezzi minimi, mediani e massimi del carbonio per categorie di progetti certificati [83].

In generale, i prezzi associati ai carbon credits nei casi italiani non generano introiti degni di nota, riuscendo a coprire solamente il 2%-3% dei CT. Rimane comunque riguardevole il ritorno in termini ambientali dei due casi, dove la produzione di biochar per l'impianto di piccola scala riesce a stoccare 1340 tonnellate di CO2 anno per un totale di 18'720 tonnellate al quatrodicemo ed ultimo anno d'esercizio, mentre l'aumento di scala migliora notevolmente la capacità di sequestro, attestandosi annualmente a 7710 tonnellate di CO2 per un totale complessivo di 108'000 tonnellate.

Per i casi brasiliani BRA 3 e BRA 4, invece, la valorizzazione superiore dei crediti al carbonio riesce a coprire annualmente il 65% e il 70% dei CT totali rispettivamente, contribuendo in maniera cospicua alla profittabilità progettuale finale. Per il caso BRA 3, i due reattori BST-10 riescono a stoccare annualmente 12631 tonnellate di CO2 per un totale di 176'836 tonnellate a fine vita utile, generando circa $1 mln di ricavi annuali ed equiparando il 60% circa dei ricavi totali annuali ottenuti dalla

vendita di biochar. Per quanto riguarda il caso BRA 4, l'impianto di maggiore scala garantisce performance migliore, riuscendo a sequestrare annualmente circa 18'390 tonnellate di CO2 per un totale in quattordici anni di 257'500 tonnellate. I ritorni annuali si attestano dunque intorno ai $1,5 mln i quali corrispondono al 75% dei ricavi totali ottenuti vendendo biochar.

10.10. Discounted Free Cash Flow Analysis

Al fine di determinare la profittabilità dei vari scenari, è stata adottato il metodo di analisi economica più diffuso e maggiormente affidabile nel mondo finanziario per la stima di:

- $\boldsymbol{NPV_{Caso}}$: Net Present Value calcolato per un determinato scenario.
- $\boldsymbol{IRR_{Caso}}$: Internal Rate of Return (IRR) calcolato per un determinato scenario.
- $\boldsymbol{ROI_{Caso}^{Avg}}$: Avg. Return on Investment (ROI). Quest'ultimo è stato infatti calcolato per ogni anno d'esercizio (dal 2024 al 2037) per poi ricavarne la media come:

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

- $\boldsymbol{ROS_{Caso}^{Avg}}$: Avg. Return on Sales (ROS), ovvero la media dei singoli ROS annui.

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

Infine, si è assunto un livello di pressione fiscala standard pari a $T_c = 20\%$ da detrarre all'$EBIT_{Case}$ (per gli anni in cui essi si presentano positivi) senza contare tutti i vantaggi che deriverebbero in questo senso dall'essere riconosciuti come start-up innovativa (detrazioni fiscali su Irpef ed Ires) o dallo scudo fiscale generato dalla contrazione di capitale di debito. Inoltre, il valore di recupero dell'impianto è stato assunto nullo.

Qui di seguito la concettualizzazione teorica del modello:

$$\boldsymbol{EBITDA_{Case_Y} = RT_{rev_Y}^{PSc} + V_{VCU_Y}^{SC} - CT_{Rev_Y}^{PSc}}$$

$$\boldsymbol{EBIT_{Case_Y} = EBITDA_{Case} + Depr._{lin.}}$$

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

$$FCF_{Case_Y} = NOPAT_{Case_Y}$$

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

$$DFCF_{Case_Y} = FCF_{Case_Y} * DF_{Case_Y}$$

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

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

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

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

11. Analisi dei risultati ottenuti

Le analisi conclusive su NPV, IRR e Avg. ROI verranno riportate caso per caso nei seguenti paragrafi e verranno basate sull'osservazione dei primi due parametri mentre l'Avg. ROI viene riportato comunque per completezza e potenziale confronto poiché l'IRR è stata scelta come voce principale su cui determinare le valutazioni sotto riportate in quanto parametro maggiormente preciso allo scopo preposto.

11.1. ITA 1. BST-05 Pro

La Tab. 35 riporta l'NPV, l'IRR e l'Avg. ROI misurati per i tre scenari di prezzo analizzati *Bp*, *Mp*, *Wp*, nel caso sia presente l'emissione di crediti o meno (*novcu*). Si ricorda che per il BST-05 Pro non è prevista la raccolta di wood vinegar e quindi non è stato possibile misurare gli effetti del modello di revenues by products.

Bp - Biochar	NPV	IRR	Avg. ROI
1.Bp.a	$ 1.965.237	32,4%	48,4%
1.Bp.b	$ 1.385.505	18,1%	24,1%
1.Bp.c	$ 1.481.142	28,2%	38,1%
1.Bp.d	$ 1.580.823	18,9%	26,5%
1.Bp.e	$ 1.252.619	16,7%	22,4%
Avg. 1.Bp.	**$ 1.533.065**	**23%**	**32%**

Mp - Biochar	NPV	IRR	Avg. ROI
1.Mp.a	$ 556.166	9,7%	18,2%
1.Mp.b	$ 165.136	2,4%	8,7%
1.Mp.c	$ 258.767	5,2%	12,0%
1.Mp.d	$ 170.204	2,4%	8,7%
1.Mp.e	$ 30.497	0,5%	7,0%
Avg. 1.Mp.	**$ 236.154**	**4%**	**11%**

Wp - Biochar	NPV	IRR	Avg. ROI
1.Wp.a	$ -995.854	0,0%	-12,0%
1.Wp.b	$ -1.186.813	0,0%	-6,7%
1.Wp.c	$ -1.115.797	0,0%	-14,2%
1.Wp.d	$ -1.406.098	0,0%	-9,0%
1.Wp.e	$ -1.343.271	0,0%	-8,3%
Avg. 1.Wp.	**$ -1.209.566**	**0%**	**-10%**

Bp - Biochar - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
1.Bp.a - novcu	$ 1.647.535	29,5%	43,6%
1.Bp.b - novcu	$ 1.116.762	15,6%	21,2%
1.Bp.c - novcu	$ 1.345.285	27,1%	36,9%
1.Bp.d - novcu	$ 1.419.586	17,7%	25,0%
1.Bp.e - novcu	$ 1.116.762	15,6%	21,2%
Avg. 1.Bp - novcu	**$ 1.329.186**	**21%**	**30%**

Mp - Biochar - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
1.Mp.a - novcu	$ 228.385	4,4%	11,7%
1.Mp.b - novcu	$ -112.873	-1,8%	5,3%
1.Mp.c - novcu	$ 115.135	2,5%	9,2%
1.Mp.d - novcu	$ 980	0,0%	6,7%
1.Mp.e - novcu	$ -112.873	-1,8%	5,3%
Avg. 1.Mp - novcu	**$ 23.751**	**1%**	**8%**

Wp - Biochar - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
1.Wp.a - novcu	$ -1.378.662	0,0%	-20,3%
1.Wp.b - novcu	$ -1.512.366	0,0%	-10,6%
1.Wp.c - novcu	$ -1.284.942	0,0%	-18,5%
1.Wp.d - novcu	$ -1.605.382	0,0%	-11,7%
1.Wp.e - novcu	$ -1.512.366	0,0%	-10,6%
Avg. 1.Wp - novcu	**$ -1.458.744**	**0%**	**-14%**

Tabella 35. Caso ITA 1. BST-05 Pro: riepilogo delle performances finanziarie (NPV, IRR e ROI) per ogni scenario analizzato.

Nello scenario *Bp - vcu*, l'Avg. NPV presenta un valore medio di $1,53 mln ($1,25 mln - $1,96 mln), l'Avg. IRR del 23% (16,7% - 32,4%). Lo scenario *Bp* si presenta perciò come il più redditizio dei tre e i risultati suggeriscono che investire nella produzione di biochar in questo scenario di prezzo potrebbe generare rendimenti finanziari accettabili senza ritorni negativi (si faccia riferimento al riquadro in evidenza in Tab. 35). Per gli altri due scenari invece, l'assenza degli effetti positivi di scala sui costi totali d'esercizio e l'assenza del supporto delle entrate generate dalla vendita di VCU determinando una contrazione dell'NPV *Mp* di circa l'80%-85% con conseguenti IRR relativamente troppo bassi (nel *Mp* del 4%, nel *Wp* negativo) per attrarre potenziali investitori a sostenere la realizzazione del progetto. Infatti, osservando Tab. 36, si può osservare come la cumulata dei FDCF nel tempo (rette gialle e rosse) rimangano costantemente negative per quasi tutta la durata del progetto nello scenario *Mp* e del tutto per lo scenario *Wp*. Sebbene i valori *Bp* si presentino positivi, gli alti costi totali registrati ($850-$930 t^{-1} di biochar prodotto) erodono complessivamente i ricavi generati dalle vendite B2B portando la redditività del progetto a dipendere esclusivamente dal successo delle vendite B2C dove si registrano alte marginalità. Questo comporta che, nel caso in cui il valore associato ai VCU rimanga stabile intorno ai $4,50 per credito emesso, il prezzo minimo di vendita B2B debba essere fissato a valori maggiori dello scenario *Bp* di $800 t^{-1} registrando così un

disallineamento a rialzo del 100% o superiore con la consumers' wtp teorica ipotizzata nel capitolo 8.2.2. In questo modo il progetto rischia di andare incontro ad un potenziale deficit da mancate vendite.

Nel caso in cui sia assente l'emissione VCU tramite l'ente Verra, si può osservare il peso specifico residuale che il valore portato dall'emissione dei crediti genera sulle principali voci in esame, contraendo l'NPV di circa il 15%-18% e l'IRR di appena due punti percentuali nel Best Price Scenario. In ogni caso, la mancata riscossione dei crediti aggrava ulteriormente un quadro finanziario tutt'altro che solido.

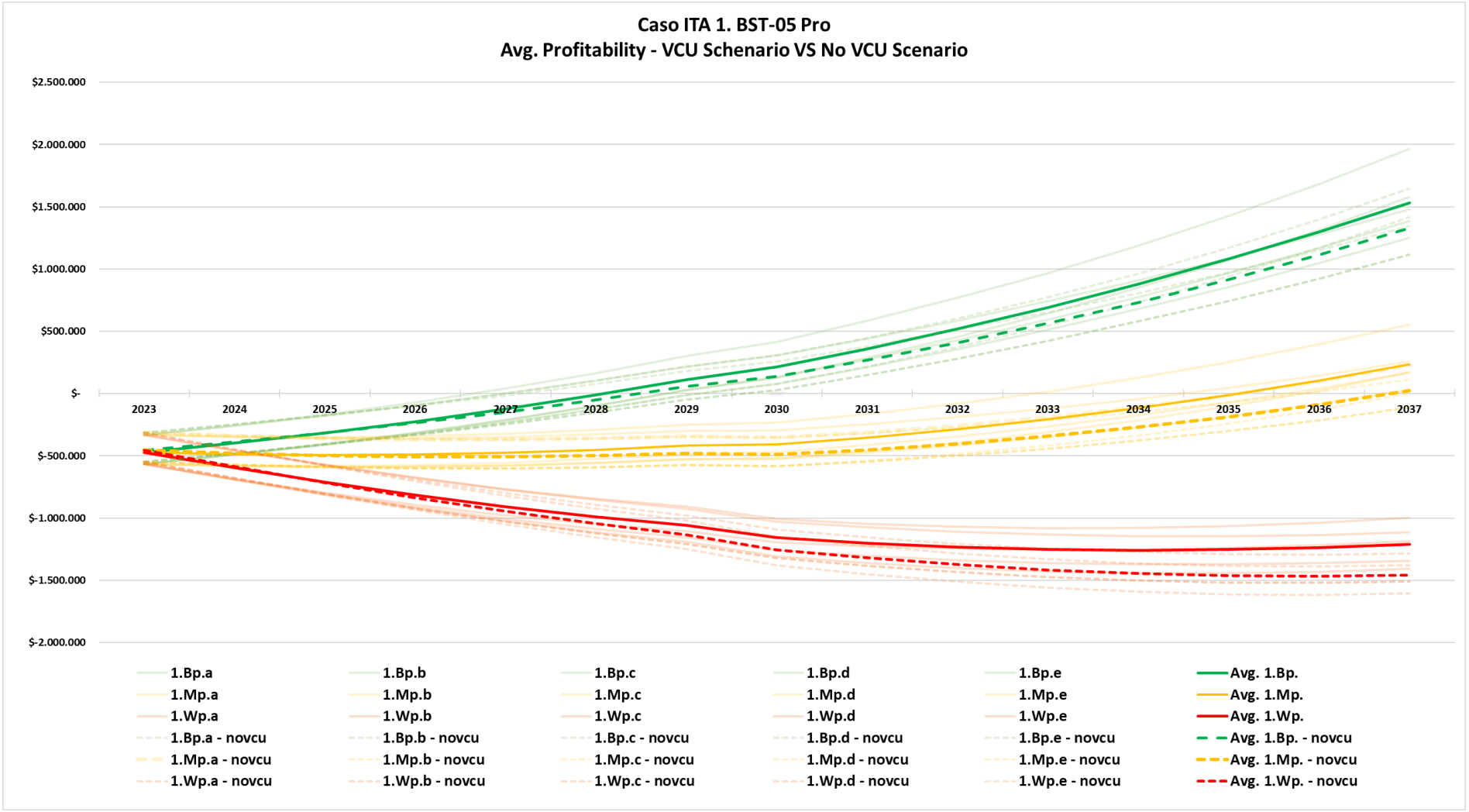


Tabella 36. Caso ITA 1. BST-05 Pro: grafico delle curve cumulate FDCFs per ogni scenario analizzato.

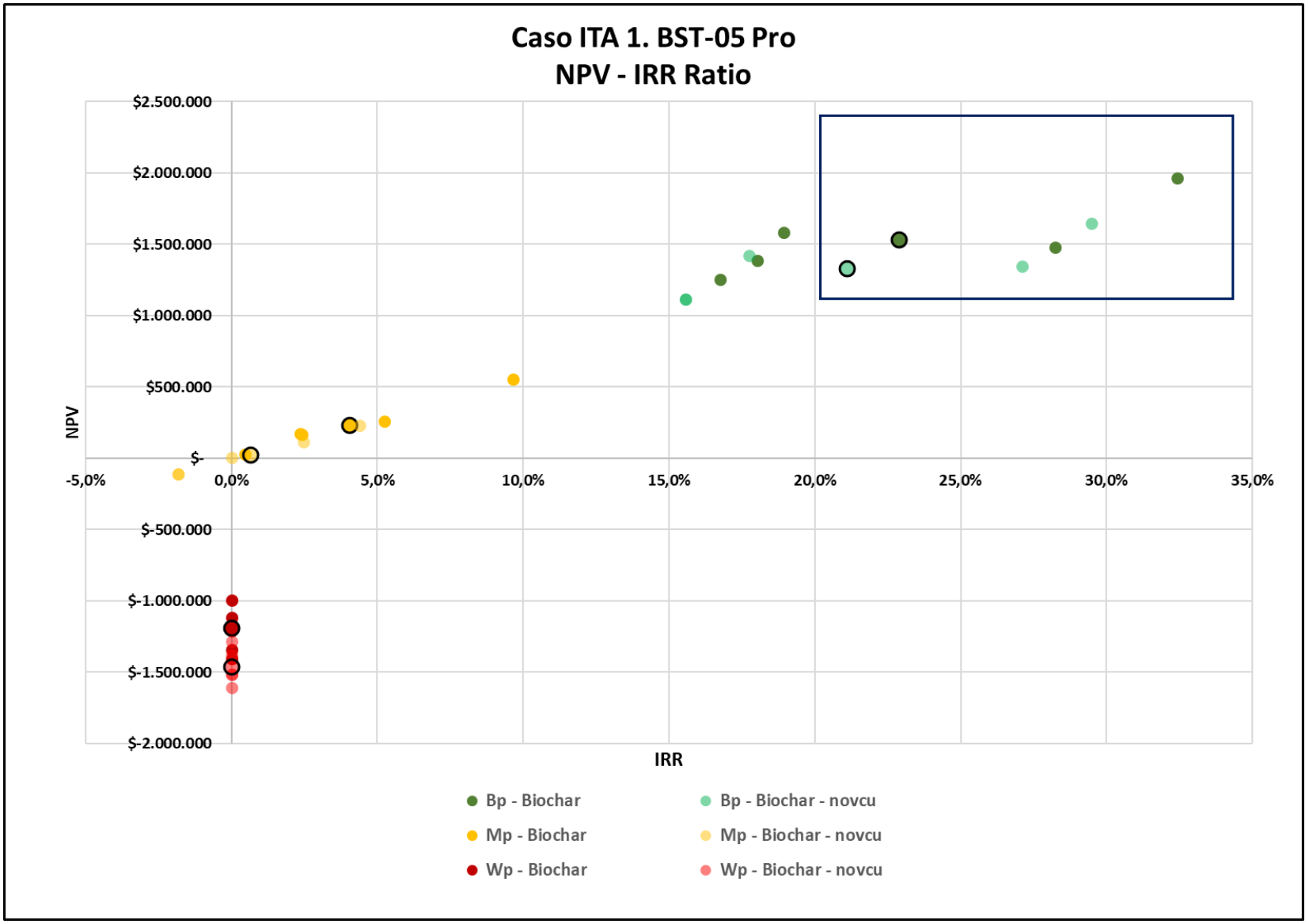


Tabella 37. Caso ITA 1. BST-05 Pro: grafico NPV-IRR per ogni scenario analizzato.

11.2. ITA 2. BST-10

Bp - Biochar	NPV	IRR	Avg. ROI
2.Bp.a	$ 9.880.529	60,5%	98,3%
2.Bp.b	$ 8.024.644	44,2%	61,5%
2.Bp.c	$ 7.410.680	53,5%	75,4%
2.Bp.d	$ 8.591.102	43,6%	65,3%
2.Bp.e	$ 7.149.711	41,0%	55,5%
Avg. 2.Bp.	$ 8.211.333	48,6%	71,2%

Mp - Biochar	NPV	IRR	Avg. ROI
2.Mp.a	$ 4.691.024	27,0%	49,8%
2.Mp.b	$ 3.533.142	19,3%	30,6%
2.Mp.c	$ 2.919.178	20,1%	33,4%
2.Mp.d	$ 3.401.597	17,6%	29,6%
2.Mp.e	$ 2.658.210	15,4%	24,6%
Avg. 2.Mp.	$ 3.440.630	20%	34%

Wp - Biochar	NPV	IRR	Avg. ROI
2.Wp.a	$ -2.334.280	0,0%	-12,5%
2.Wp.b	$ -2.509.670	0,0%	-8,7%
2.Wp.c	$ -3.312.924	0,0%	-20,0%
2.Wp.d	$ -3.836.238	0,0%	-16,3%
2.Wp.e	$ -3.570.460	0,0%	-14,7%
Avg. 2.Wp.	$ -3.112.714	0%	-14%

Bp - Biochar - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
2.Bp.a - novcu	$ 7.833.968	51,7%	81,0%
2.Bp.b - novcu	$ 6.279.547	37,2%	50,3%
2.Bp.c - novcu	$ 6.540.515	48,9%	68,8%
2.Bp.d - novcu	$ 7.574.721	39,8%	59,2%
2.Bp.e - novcu	$ 6.279.547	37,2%	50,3%
Avg. 2.Bp - novcu	$ 6.901.659	43%	62%

Mp - Biochar - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
2.Mp.a - novcu	$ 2.641.941	16,9%	31,3%
2.Mp.b - novcu	$ 1.785.964	10,9%	18,8%
2.Mp.c - novcu	$ 2.046.537	14,7%	25,8%
2.Mp.d - novcu	$ 2.383.096	13,0%	22,9%
2.Mp.e - novcu	$ 1.785.964	10,9%	18,8%
Avg. 2.Mp - novcu	$ 2.128.700	13%	24%

Wp - Biochar - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
2.Wp.a - novcu	$ -4.856.116	0,0%	-32,6%
2.Wp.b - novcu	$ -2.509.670	0,0%	-8,7%
2.Wp.c - novcu	$ -4.405.417	0,0%	-29,1%
2.Wp.d - novcu	$ -5.111.500	0,0%	-23,8%
2.Wp.e - novcu	$ -4.662.952	0,0%	-21,2%
Avg. 2.Wp - novcu	$ -4.309.131	0%	-23%

Bp - By Prod.	NPV	IRR	Avg. ROI
2.Bp.aprod	$ 14.505.290	103,3%	141,5%
2.Bp.bprod	$ 12.081.487	74,4%	89,3%
2.Bp.cprod	$ 11.467.523	96,0%	113,3%
2.Bp.dprod	$ 13.215.863	74,8%	97,0%
2.Bp.eprod	$ 11.206.555	71,5%	83,3%
Avg. 2.Bp.prod	$ 12.495.343	84,0%	104,9%

Mp - By Prod.	NPV	IRR	Avg. ROI
2.Mp.aprod	$ 8.595.836	57,7%	86,3%
2.Mp.bprod	$ 6.958.446	41,8%	54,1%
2.Mp.cprod	$ 6.344.482	50,6%	65,4%
2.Mp.dprod	$ 7.306.409	40,9%	56,4%
2.Mp.eprod	$ 5.217.117	33,5%	42,2%
Avg. 2.Mp.prod	$ 6.884.458	44,9%	60,9%

Wp - By Prod.	NPV	IRR	Avg. ROI
2.Wp.aprod	$ 1.188.893	10,2%	17,2%
2.Wp.bprod	$ 596.711	4,8%	10,5%
2.Wp.cprod	$ -25.850	-0,3%	6,1%
2.Wp.dprod	$ -108.024	-1,0%	5,6%
2.Wp.eprod	$ -285.901	-2,8%	4,5%
Avg. 2.Wp.prod	$ 273.166	2,2%	8,7%

Bp - By Prod. - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
2.Bp.aprod - novcu	$ 12.458.729	96,1%	125,3%
2.Bp.bprod - novcu	$ 10.336.390	68,4%	78,7%
2.Bp.cprod - novcu	$ 10.597.359	92,5%	107,6%
2.Bp.dprod - novcu	$ 12.199.482	71,5%	91,6%
2.Bp.eprod - novcu	$ 10.336.390	68,4%	78,7%
Avg. 2.Bp.prod - novcu	$ 11.185.670	79%	96%

Mp - By Prod. - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
2.Mp.aprod - novcu	$ 6.549.276	48,4%	68,7%
2.Mp.bprod - novcu	$ 5.213.349	34,3%	42,8%
2.Mp.cprod - novcu	$ 5.474.318	45,7%	58,6%
2.Mp.dprod - novcu	$ 6.290.028	36,8%	50,2%
2.Mp.eprod - novcu	$ 4.346.953	29,2%	36,7%
Avg. 2.Mp.prod - novcu	$ 5.574.785	39%	51%

Wp - By Prod. - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
2.Wp.aprod - novcu	$ -946.643	-13,3%	-2,1%
2.Wp.bprod - novcu	$ -1.228.940	-15,9%	-1,7%
2.Wp.cprod - novcu	$ -970.388	-14,9%	-2,3%
2.Wp.dprod - novcu	$ -1.203.281	-14,3%	-1,6%
2.Wp.eprod - novcu	$ -1.228.940	-15,9%	-1,7%
Avg. 2.Wp.prod - novcu	$ -1.115.638	-15%	-2%

Tabella 38. Caso ITA 2. BST-10: riepilogo delle performances finanziarie (NPV, IRR e ROI) per ogni scenario analizzato.

Data l'impossibilità di stimare il tasso di penetrazione delle vendite di biochar nei mercati di riferimento B2B e B2C, si è assunto che la quantità di biochar prodotto durante l'anno rimasta invenduta sia nulla (nonostante siano state stanziate ingenti risorse per il marketing al fine di bilanciare l'irrealisticità di tale assunzione). Questo ha comportato una cospicua contrazione temporale del payback time influenzando positivamente i risultati ottenuti sia nello scenario di emissione crediti sia in quello in cui sia assente. In Tab. 39, infatti, dove vengono raffigurate le cumulata nel tempo dei FDCF degli scenari basati su un modello di ricavi biochar only, si può notare che le curve *Bp* (verdi) e *Mp* presentano una finestra temporale "negativa" contratta di circa soli due anni e cinque anni rispettivamente. Cambiando modello di ricavi, invece, la vendita aggiuntiva di wood vinegar esacerba in maniera ancora più marcata tale fenomeno (Tab. 40).

Per quanto concerne il caso ITA 2, dunque, si ha un netto miglioramento di tutti i parametri dovuti principalmente all'efficienza di scala, la quale porta ad una flessione del 5% circa del CT d'esercizio annuali ($800-$880 t^{-1} di biochar prodotto), e all'aumento considerevole del volume di biochar vendibile (si passa da 700 $t\ y^{-1}$ a 2600 $t\ y^{-1}$ circa) il quale genera di conseguenza un più alto volume di ricavi. In generale, per lo scenario *Bp* – biochar only, si registra un Avg. NPV pari a $8,2 mln ($7,15 mln – $9,9 mln) ed un Avg. IRR pari al 48% (41% - 60,5%). Per quanto riguarda lo scenario senza emissione di VCUs, la flessione dell'Avg. NPV e dell'Avg. IRR si attesta al -15% e -5% rispettivamente risulta più marcata dato il più alto volume di crediti emessi. Anche in questo caso, sia con emissione sia senza, gli scenari di prezzo inferiori *Mp* e *Wp* non garantiscono una solidità adeguata al progetto anche se l'NPV e l'IRR risultano positivi, complice il basso valore ottenibile dalla vendita di VCUs.

Considerando il modello di ricavi basato sul bundling, si registra un generale netto miglioramento di tutti i parametri in esame per qualsiasi scenario di prezzo considerato. Per lo scenario *Bp*, un incremento del 18% dei ricavi dato dalle vendite di wood vinegar, innalza l'Avg. NPV del 45% il quale raggiunge valori pari a $12,5 mln ($11,21 mln – $14,51 mln). L'IRR invece duplica le proprie

performances, attestandosi a valori intorno l'80%. L'assenza di emissione dei VCUs non conduce a grandi oscillazioni dei parametri potendo, così, essere presa in considerazione. In conclusione, questo modello di ricavi permetterebbe di poter abbassare il prezzo di vendita del biochar al fine di diminuire la distanza prezzo-customers' wtp e ridurre quindi le probabilità di rimanere a fine esercizio annuale con prodotto finito invenduto. Infatti, lo scenario di prezzo *Mp* registra Avg. NPV e IRR accettabili pari a $6,5 mln ($5,2 mln – $8,6 mln) e 45% (33,5% - 57,7%) rispettivamente. Per il Middle Price scenario si consiglia invece di certificare il progetto per assicurarsi, se pur minimo, una seconda entrata che controbilanci la forte discesa del prezzo di vendita B2B e B2C.

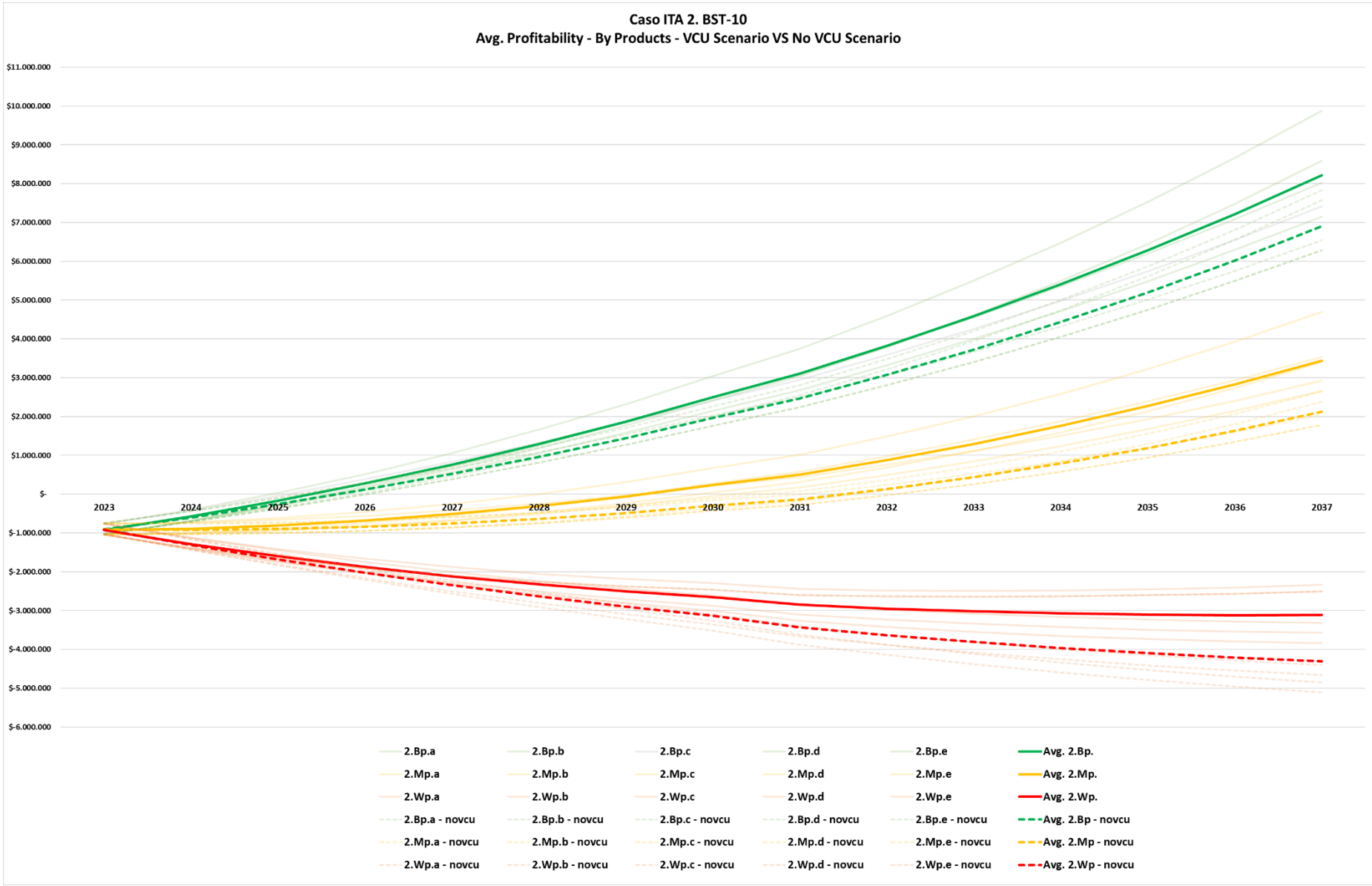


Tabella 39. Caso ITA 2. BST-10: grafico delle curve cumulate FDCFs per ogni scenario analizzato che sia basato sul modello di ricavi "biochar only".

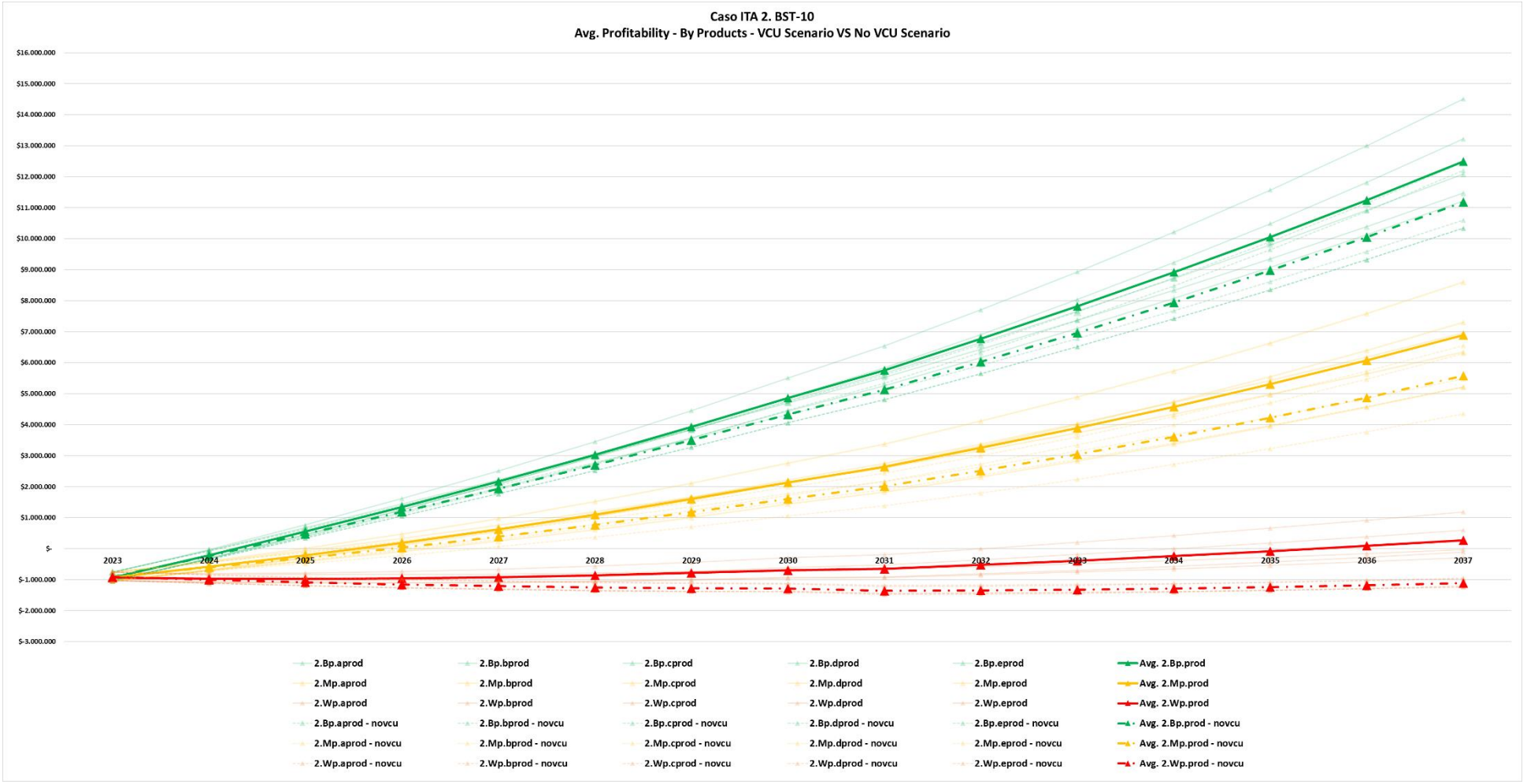


Tabella 40. Caso ITA 2. BST-10: grafico delle curve cumulate FDCFs per ogni scenario analizzato che sia basato sul modello di ricavi "by products".

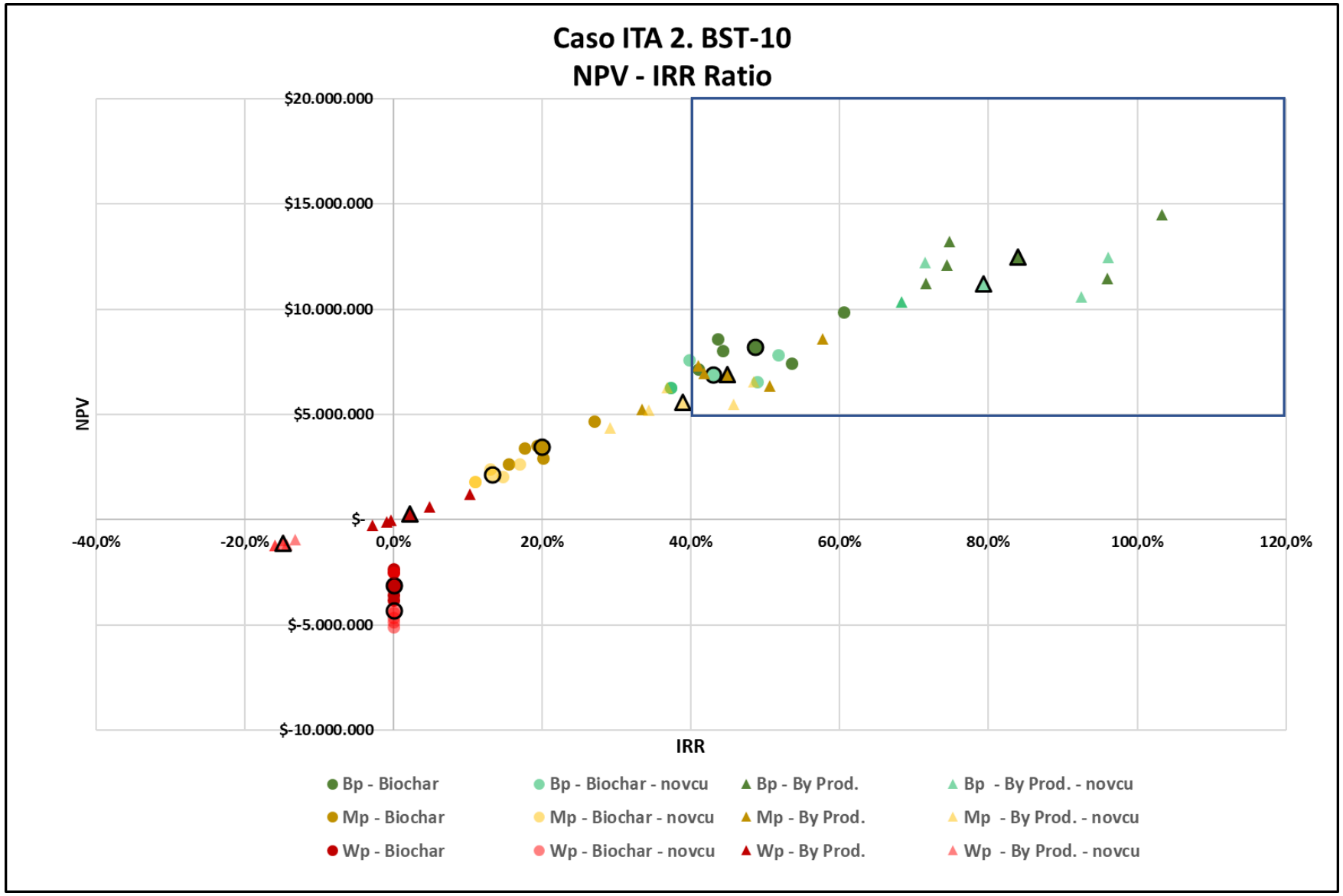


Tabella 41. Caso ITA 2. BST-10: grafico NPV-IRR per ogni scenario analizzato.

11.3. Analisi conclusiva dei risultati ottenuti per i casi italiani

In generale, per i casi italiani, la variabile prezzo risulta determinante nella profittabilità e realizzabilità del progetto stesso poiché il business, come più volte anticipato, è strettamente legato al successo delle vendite. Da una parte, i soli scenari finanziariamente profittevoli per il BST-05 Pro sono risultati quelli appartenenti al Best Price scenario dove l'investimento iniziale è stato assunto nella forma BC (*1.Bp.a/.c vcu/novcu* rientrano nel riquadro di best profitability in Tab. 37), in disallineamento con la vincolante necessità di ricercare, per quanto sia possibile, il match tra prezzo di offerta e customers' wtp. Per il BST-10, invece, il delta di prezzo tra offerta e wtp sembrerebbe ridursi dal momento che, oltre a tutti gli scenari *Bp* biochar only (IRR > 40%), by products (IRR > 85%), gli scenari *2.Mp.a* e *2.Mp.aprod/Bprod/cprod/dprod* presentano un ottimo trade off tra profittabilità di progetto (IRR>40%) e probabilità di successo delle vendite (rientrano nel riquadro di scenari evidenziati in Tab. 41). Se si volesse diminuire il prezzo di vendita B2B del biochar pur mantenendo all'incirca le stesse performance in termini di Avg. NPV e Avg.IRR del Best Price scenario, si dovrebbe cercare di meglio valorizzare i VCUs emessi come riportato nella sensitivity analysis in Tab. 42 che, mettendo in relazione il prezzo di emissione con il prezzo di offerta, simula gli Avg. NPV per ogni combinazione lineare esistente. Come si può intravedere, disponendo di un quantitativo limitato di VCUs emessi annualmente (7'705), per ottenere Avg. NPV simili allo scenario *Bp* (in rosso) con un livello di prezzo inferiore, è necessario vendere i crediti ad un prezzo relativamente troppo alto (prezzi in grassetto) per la locazione geografica in esame dove il rischio di scarsa addizionalità tende a valorizzare meno i crediti stessi.

	NPV	VCU PRICE [$/VCU]						
	$ 9.504.593,02	**$ 4,50**	$ 20,00	$ 40,00	$ 60,00	$ 80,00	$ 100,00	$ 120,00
PRICE (%/ton)	$ 300,00	$ -3.678.680,29	$ -3.109.745,68	$ -2.376.079,03	$ -1.648.214,79	$ -920.350,54	$ -192.486,29	$ 527.398,34
	$ 400,00	$ -815.672,23	$ -256.276,56	$ 453.690,23	$ 1.153.661,94	$ 1.832.805,45	$ 2.444.649,61	$ 3.040.763,67
	$ 500,00	$ 1.930.468,84	$ 2.458.532,34	$ 3.117.667,21	$ 3.729.018,50	$ 4.325.132,56	$ 4.921.246,62	$ 5.517.360,68
	$ 600,00	$ 4.541.825,57	$ 5.013.387,39	$ 5.609.501,45	$ 6.205.615,51	$ 6.801.729,57	**$ 7.397.843,64**	**$ 7.993.957,70**
	$ 700,00	$ 7.027.996,01	$ 7.489.984,40	**$ 8.086.098,47**	**$ 8.682.212,53**	**$ 9.278.326,59**	**$ 9.874.440,65**	**$ 10.470.554,71**
	$ 800,00	**$ 9.504.593,02**	$ 9.966.581,42	$ 10.562.695,48	$ 11.158.809,54	$ 11.754.923,60	$ 12.351.037,67	$ 12.947.151,73

Tabella 42. Caso ITA 2. BST-10: NPV sensitivity analysis, VCU price [$/VCU] – biochar price [$/ton].

Inoltre, se si volesse abbattere il prezzo di offerta B2B, si potrebbe andare ad agire su una voce di costo corposa come quella per l'acquisto di biomassa: quest'ultima pesa \$234 t^{-1} di biochar prodotto alle condizioni di prezzo e quantità assunte. In Tab. 43 si può osservare che diminuendo il prezzo \$ t^{-1} fino a \$20-\$40 t^{-1} si potrebbero mantenere le stesse performances finanziarie dello scenario *Bp* adottando un prezzo B2B limite per il biochar di \$600 t^{-1} diminuendo così le probabilità di possedere a fine anno un magazzino di prodotto finito invenduto cospicuo.

	NPV	BIOMASS COST [$/ton]					
	$ 9.504.593,02	20	40	60	80	**100**
PRICE (%/ton)	$ 300,00	1894630,438	547258,5268	-835145,8454	-2251591,96	-3678680,294
	$ 400,00	4509897,009	3228475,129	1912549,64	566117,5362	-815672,2292
	$ 500,00	6997636,808	5766928,1	4525861,291	3245812,09	1930468,843
	$ 600,00	**9474233,822**	**8243525,115**	7012816,407	5782107,699	4541825,573
	$ 700,00	**11950830,84**	**10720122,13**	**9489413,422**	**8258704,714**	7027996,006
	$ 800,00	14427427,85	13196719,14	11966010,44	10735301,73	**9504593,021**

Tabella 43. Caso ITA 2. BST-10: NPV sensitivity analysis, biomass cost [$/ton] – biochar price [$/ton].

Per quanto concerne le variabili WC -BC prese in considerazione (Investimento Iniziale, WACC e Annual VCU Price Growth), la voce WC che maggiormente influenza la redditività degli scenari analizzati è l'investimento iniziale; in quest'ottica, se si mettono a confronto NPV ed IRR per i singoli scenari e se si volesse riportare una classifica a seconda della profittabilità mostrata, si otterrebbe sempre il seguente ordine di scenari per entrambi i modelli di ricavo analizzati, sia in un contesto di certificazione, sia in sua assenza: .a (best case ever), .c, .d, .b, .e (worst case ever). Questo dimostra che l'oscillazione di valore WC – BC della voce di costo di investimento iniziale ha un forte effetto sulla profittabilità complessiva del progetto (nello scenario .c è BC). Se poi, in aggiunta, si considera anche un valore del WACC dell'8,5% (WC), allora si genere un effetto negativo sinergico, decretando una profittabilità ultima in flessione (scenario .b)

In conclusione, in Italia, si consiglia di adottare una scala maggiore al fine di ammortizzare il più possibile il costo energetico, il costo comportato dall'acquisto di biomassa e il suo trasporto, il costo della manodopera, i costi (necessari ed imprescindibili) di marketing e l'assenza di ricavi secondari dati dalla vendita dei VCUs emessi.

11.4. BRA 3. 2xBST-10

Bp - Biochar	NPV	IRR	Avg. ROI
3.Bp.a	$ 10.087.803	73,2%	71,9%
3.Bp.b	$ 8.372.066	54,9%	62,6%
3.Bp.c	$ 7.218.243	64,9%	53,2%
3.Bp.d	$ 8.119.515	53,2%	48,0%
3.Bp.e	$ 6.937.694	50,4%	42,0%
Avg. 3.Bp.	**$ 8.147.064**	**59,3%**	**55,5%**

Mp - Biochar	NPV	IRR	Avg. ROI
3.Mp.a	$ 7.385.309	55,0%	54,1%
3.Mp.b	$ 6.012.916	40,7%	37,2%
3.Mp.c	$ 4.859.093	46,2%	37,7%
3.Mp.d	$ 5.417.021	37,9%	34,0%
3.Mp.e	$ 4.578.544	35,4%	29,8%
Avg. 3.Mp.	**$ 5.650.576**	**43,0%**	**38,6%**

Wp - Biochar	NPV	IRR	Avg. ROI
3.Wp.a	$ 4.218.827	34,4%	33,3%
3.Wp.b	$ 3.258.839	24,3%	22,9%
3.Wp.c	$ 2.105.016	24,3%	19,6%
3.Wp.d	$ 2.250.539	19,2%	17,6%
3.Wp.e	$ 1.824.466	17,0%	15,5%
Avg. 3.Wp.	**$ 2.731.537**	**24%**	**22%**

Bp - Biochar - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
3.Bp.a - novcu	$ -175.475	-1,5%	4,6%
3.Bp.b - novcu	$ -628.289	-5,2%	2,8%
3.Bp.c - novcu	$ -348.394	-3,3%	3,6%
3.Bp.d - novcu	$ -454.184	-3,4%	3,6%
3.Bp.e - novcu	$ -628.289	-5,2%	2,8%
Avg. 3.Bp - novcu	**$ -446.926**	**-4%**	**3%**

Mp - Biochar - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
3.Mp.a - novcu	$ -3.307.805	0,0%	-13,5%
3.Mp.b - novcu	$ -3.375.524	0,0%	-9,6%
3.Mp.c - novcu	$ -3.097.172	0,0%	-12,2%
3.Mp.d - novcu	$ -3.584.750	0,0%	-10,6%
3.Mp.e - novcu	$ -3.375.524	0,0%	-9,6%
Avg. 3.Mp - novcu	**$ -3.348.155**	**0%**	**-11%**

Wp - Biochar - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
3.Wp.a - novcu	$ -7.263.987	0,0%	-34,6%
3.Wp.b - novcu	$ -6.816.550	0,0%	-24,1%
3.Wp.c - novcu	$ -6.538.289	0,0%	-30,6%
3.Wp.d - novcu	$ -7.540.814	0,0%	-27,3%
3.Wp.e - novcu	$ -6.816.550	0,0%	-24,1%
Avg. 3.Wp - novcu	**$ -6.995.238**	**0%**	**-28%**

Bp - By Prod.	NPV	IRR	Avg. ROI
3.Bp.aprod	$ 13.481.794	97,9%	94,2%
3.Bp.bprod	$ 11.349.278	74,0%	64,9%
3.Bp.cprod	$ 10.195.454	89,8%	72,7%
3.Bp.dprod	$ 11.513.506	73,3%	65,6%
3.Bp.eprod	$ 9.914.905	70,1%	57,5%
Avg. 3.Bp.prod	**$ 11.290.988**	**81,0%**	**71,0%**

Mp - By Prod.	NPV	IRR	Avg. ROI
3.Mp.aprod	$ 10.258.601	75,8%	73,0%
3.Mp.bprod	$ 8.533.370	56,8%	50,3%
3.Mp.cprod	$ 7.379.547	67,5%	54,3%
3.Mp.dprod	$ 8.290.313	55,3%	48,9%
3.Mp.eprod	$ 6.880.766	51,4%	41,7%
Avg. 3.Mp.prod	**$ 8.268.519**	**61,4%**	**53,6%**

Wp - By Prod.	NPV	IRR	Avg. ROI
3.Wp.aprod	$ 6.566.142	51,6%	48,8%
3.Wp.bprod	$ 5.317.905	37,9%	33,6%
3.Wp.cprod	$ 4.164.082	42,6%	33,2%
3.Wp.dprod	$ 4.597.854	34,8%	29,7%
3.Wp.eprod	$ 3.883.532	32,3%	26,2%
Avg. 3.Wp.prod	**$ 4.905.903**	**39,9%**	**34,3%**

Bp - By Prod. - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
3.Bp.aprod - novcu	$ 3.238.072	24,8%	27,3%
3.Bp.bprod - novcu	$ 2.365.553	16,8%	18,5%
3.Bp.cprod - novcu	$ 2.646.102	22,5%	23,5%
3.Bp.dprod - novcu	$ 2.958.670	19,0%	21,5%
3.Bp.eprod - novcu	$ 2.365.553	16,8%	18,5%
Avg. 3.Bp.prod - novcu	**$ 2.714.790**	**20%**	**22%**

Mp - By Prod. - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
3.Mp.aprod - novcu	$ 2.155	0,0%	5,7%
3.Mp.bprod - novcu	$ -461.170	-4,0%	3,7%
3.Mp.cprod - novcu	$ -180.769	-1,8%	4,7%
3.Mp.dprod - novcu	$ -277.074	-2,2%	4,5%
3.Mp.eprod - novcu	$ -683.557	-6,1%	2,5%
Avg. 3.Mp.prod - novcu	**$ -320.083**	**-3%**	**4%**

Wp - By Prod. - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
3.Wp.aprod - novcu	$ -4.329.844	0,0%	-19,0%
3.Wp.bprod - novcu	$ -4.242.717	0,0%	-13,2%
3.Wp.cprod - novcu	$ -3.964.457	0,0%	-16,8%
3.Wp.dprod - novcu	$ -4.606.671	0,0%	-14,9%
3.Wp.eprod - novcu	$ -4.242.717	0,0%	-13,2%
Avg. 3.Wp.prod - novcu	**$ -4.277.281**	**0%**	**-15%**

Tabella 44. Caso BRA 3. 2xBST-10: riepilogo delle performances finanziarie (NPV, IRR e ROI) per ogni scenario analizzato.

In Brasile, essendo la redditività del progetto legata fortemente alle vendite di crediti di carbonio, il caso BRA 3 2xBST-10 presenta generalmente rendimenti positivi in contesti di certificazione e negativi in sua assenza (come mostrato in Tab. 44) e, pertanto, verranno solamente analizzati i primi.

Considerando gli scenari basati su un modello di vendite solo biochar, per lo scenario *Bp*, si registra un Avg. NPV pari a $8,2 mln ($6,9 mln – $10,08 mln) ed un Avg. IRR del 59% (50% - 73%). Anche lo scenario *Mp* registra buoni risultati dove una flessione del prezzo d'offerta B2B di biochar del 19% non preclude ottenere un Avg. NPV pari a $6,65 mln ($4,57 mln – $7,38 mln) ed un Avg. IRR del 43% (55% - 35,4%). Tali performances possono essere riscontrate visivamente anche in Tab. 45, dove le cumulate dei FDCF per entrambi gli scenari di prezzo (curva verde, curva gialla) restano al di sopra alla retta delle ascisse per l'intera durata del progetto. Non è consigliato, invece, scendere al di sotto del Middle Price scenario poiché, se pur i parametri di performance risultino positivi, non è assicurata una solida profittabilità agli investitori.

È curioso notare come l'assenza dell'emissione di VCUs renda praticamente irrealizzabile il progetto (curve tratteggiate) poiché, in assenza della valorizzazione dei crediti al carbonio che risarcisce annualmente il 65% dei CT totali, il mancato versamento di circa $1 mln (il 60% dei ricavi totali annuali generati dalla vendita di biochar) impone un tracollo finanziario irreversibile.

Come per i casi italiani, allo stesso modo, il modello di ricavi by products incrementa complessivamente le performances misurate. Per lo scenario *Bp* si registra un incremento del 27% circa per l'Avg NPV, pari a $11,3 mln ($9,91 mln – $13,48 mln), e del 21% per l'Avg. IRR il quale raggiunge valori intorno all'81%. Catturando il valore delle vendite di wood vinegar, il Middle Price scenario risulta avere i medesimi indicatori di redditività dello scenario *Bp* basato sulle sole vendite di biochar, e così per il *Wp* scenario. Questo fenomeno può essere ravvisato anche in Tab. 46, dove tutte le curve cumulate dei FDCF registrano valori strettamente positivi (curve verdi, gialle e rosse continue).

Anche per questo scenario di vendite vale lo stesso discorso proposto nel paragrafo precedente dove, in assenza dei ricavi dai VCUs, i CT erodono complessivamente il valore generato dalle vendite di biochar determinando una situazione finanziaria non favorevole.

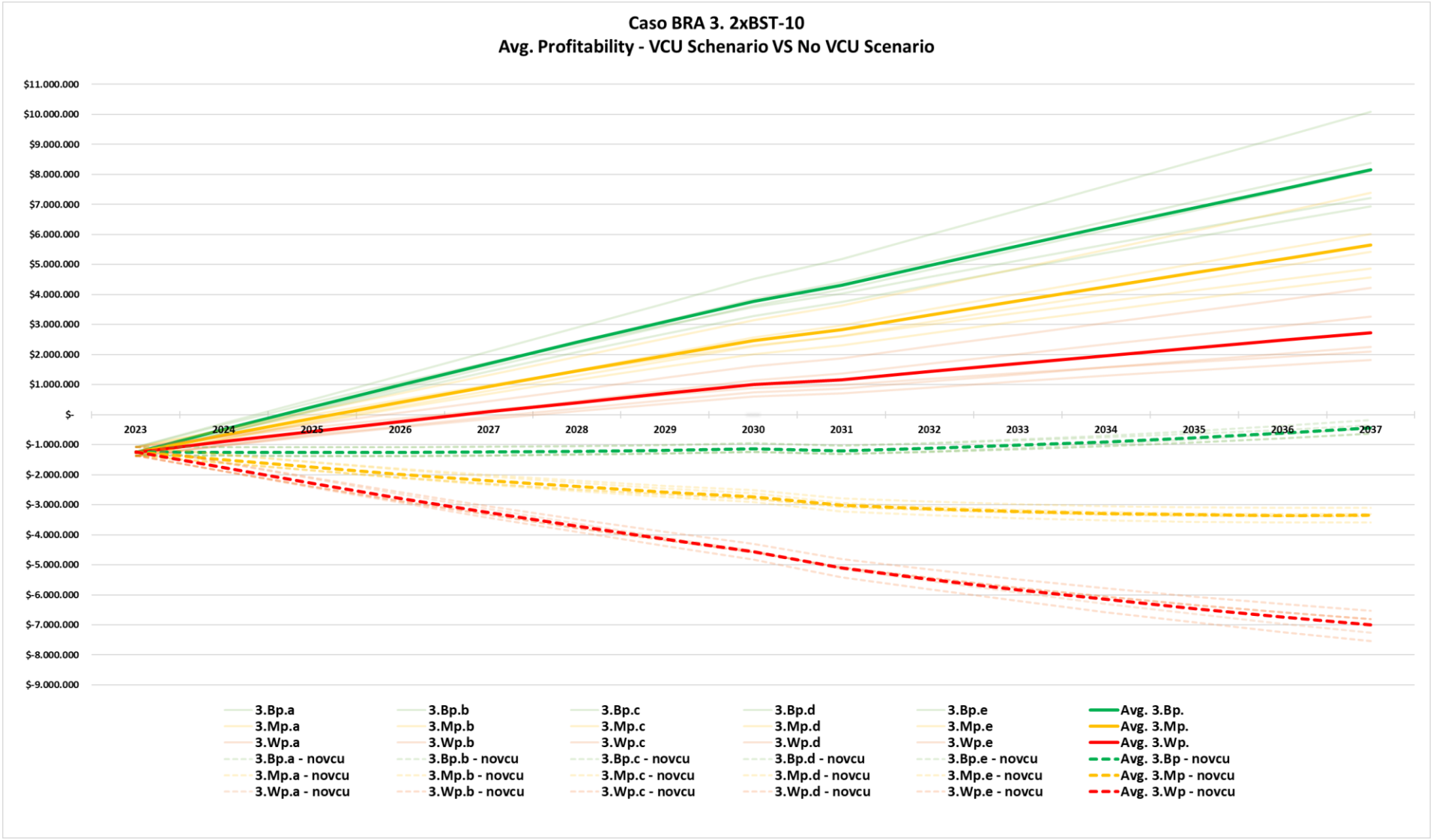


Tabella 45. Caso BRA 3. 2xBST-10: grafico delle curve cumulate FDCFs per ogni scenario analizzato che sia basato sul modello di ricavi "biochar only".

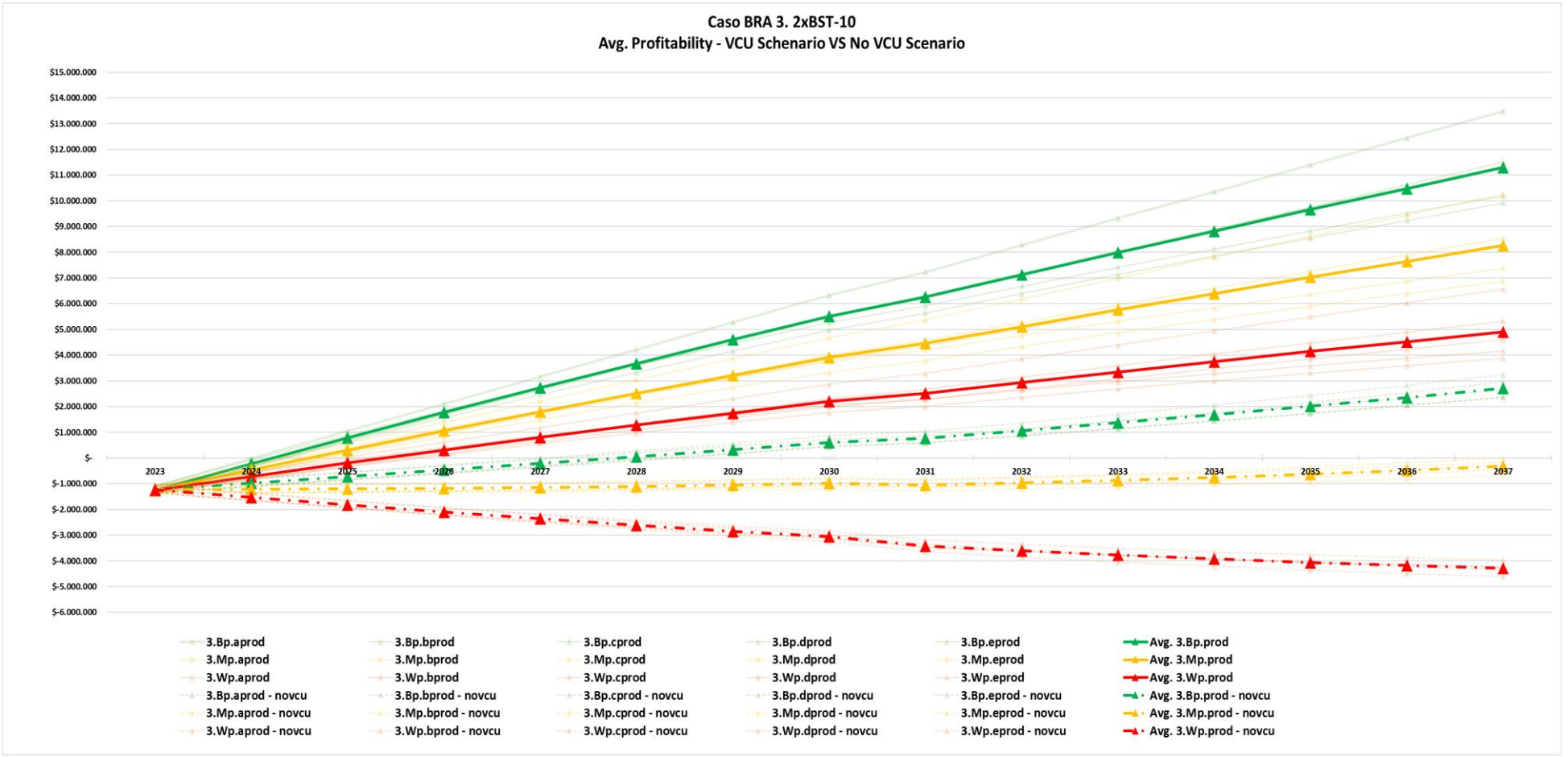


Tabella 46. Caso BRA 3. 2xBST-10: grafico delle curve cumulate FDCFs per ogni scenario analizzato che sia basato sul modello di ricavi "by products".

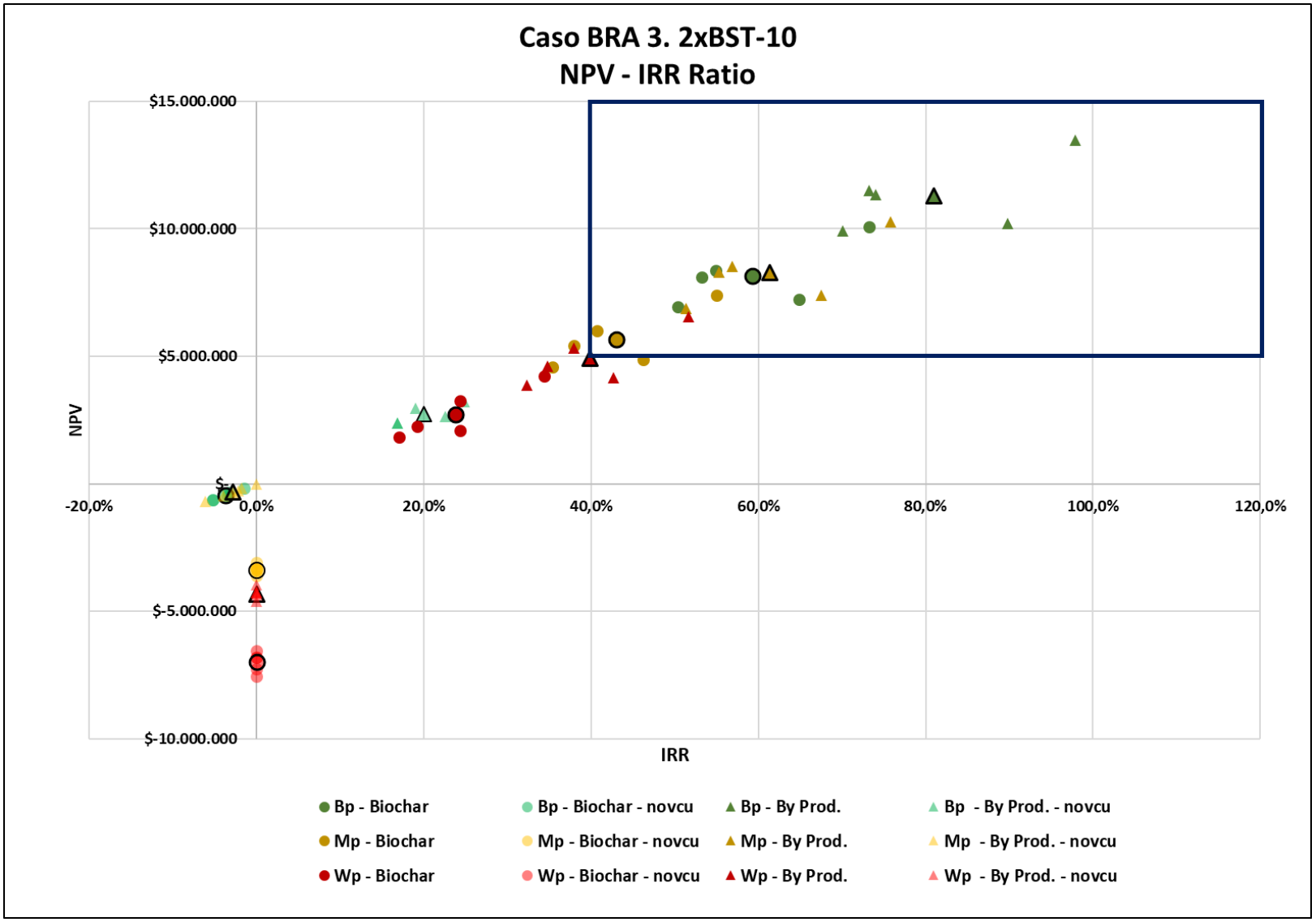


Tabella 47. Caso BRA 3. 2xBST-10: grafico NPV-IRR per ogni scenario analizzato.

11.5. BRA 4. BST-30

Bp - Biochar	NPV	IRR	Avg. ROI
4.Bp.a	$21.638.083	204,6%	220,4%
4.Bp.b	$18.503.384	152,1%	146,0%
4.Bp.c	$16.601.426	191,4%	170,6%
4.Bp.d	$18.997.281	150,5%	149,6%
4.Bp.e	$16.414.990	145,8%	130,2%
Avg. 4.Bp.	$18.431.033	168,9%	163,4%

Mp - Biochar	NPV	IRR	Avg. ROI
4.Mp.a	$16.741.049	157,7%	171,8%
4.Mp.b	$14.242.139	117,1%	113,7%
4.Mp.c	$12.340.181	144,7%	128,2%
4.Mp.d	$14.100.247	114,1%	112,5%
4.Mp.e	$12.153.746	110,2%	97,9%
Avg. 4.Mp.	$13.915.473	129%	125%

Wp - Biochar	NPV	IRR	Avg. ROI
4.Wp.a	$10.399.267	102,4%	108,8%
4.Wp.b	$ 8.749.811	75,6%	72,1%
4.Wp.c	$ 6.847.853	75,6%	73,7%
4.Wp.d	$ 7.758.464	70,4%	64,4%
4.Wp.e	$ 6.661.418	67,3%	56,2%
Avg. 4.Wp.	$ 8.083.363	78%	75%

Bp - Biochar - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
4.Bp.a - novcu	$ 6.714.142	49,3%	73,9%
4.Bp.b - novcu	$ 5.413.953	36,6%	47,6%
4.Bp.c - novcu	$ 5.600.388	46,5%	62,8%
4.Bp.d - novcu	$ 6.532.296	39,2%	56,1%
4.Bp.e - novcu	$ 5.413.953	36,6%	47,6%
Avg. 4.Bp - novcu	$ 5.934.946	41,6%	57,6%

Mp - Biochar - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
4.Mp.a - novcu	$ 1.796.628	11,9%	24,0%
4.Mp.b - novcu	$ 1.135.093	7,4%	14,6%
4.Mp.c - novcu	$ 1.319.184	9,8%	19,3%
4.Mp.d - novcu	$ 1.617.200	9,5%	18,2%
4.Mp.e - novcu	$ 1.135.093	7,4%	14,6%
Avg. 4.Mp - novcu	$ 1.400.640	9%	18%

Wp - Biochar - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
4.Wp.a - novcu	$ -5.480.874	0,0%	-40,8%
4.Wp.b - novcu	$ -5.212.925	0,0%	-27,3%
4.Wp.c - novcu	$ -5.016.511	0,0%	-36,8%
4.Wp.d - novcu	$ -5.652.419	0,0%	-30,9%
4.Wp.e - novcu	$ -5.193.792	0,0%	-27,9%
Avg. 4.Wp - novcu	$ -5.311.304	0%	-33%

Bp - By Prod.	NPV	IRR	Avg. ROI
4.Bp.aprod	$26.714.147	260,8%	270,8%
4.Bp.bprod	$22.956.110	194,1%	179,8%
4.Bp.cprod	$21.054.152	247,0%	214,8%
4.Bp.dprod	$24.073.345	193,7%	188,1%
4.Bp.eprod	$20.867.717	188,2%	163,9%
Avg. 4.Bp.prod	$23.133.094	216,8%	203,5%

Mp - By Prod.	NPV	IRR	Avg. ROI
4.Mp.aprod	$21.043.851	205,1%	214,5%
4.Mp.bprod	$18.016.560	152,4%	142,3%
4.Mp.cprod	$16.114.602	191,9%	165,7%
4.Mp.dprod	$18.403.048	150,8%	145,1%
4.Mp.eprod	$15.709.935	145,2%	124,8%
Avg. 4.Mp.prod	$17.857.599	169%	158%

Wp - By Prod.	NPV	IRR	Avg. ROI
4.Wp.aprod	$13.923.527	140,9%	143,8%
4.Wp.bprod	$11.841.295	104,3%	95,5%
4.Wp.cprod	$ 9.939.337	127,9%	104,4%
4.Wp.dprod	$11.282.725	100,7%	91,1%
4.Wp.eprod	$ 9.752.902	97,0%	79,7%
Avg. 4.Wp.prod	$11.347.957	114%	103%

Bp - By Prod. - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
4.Bp.aprod - novcu	$11.790.206	102,2%	125,7%
4.Bp.bprod - novcu	$ 9.866.679	75,4%	82,1%
4.Bp.cprod - novcu	$10.053.114	98,5%	108,2%
4.Bp.dprod - novcu	$11.608.359	78,7%	95,3%
4.Bp.eprod - novcu	$ 9.866.679	75,4%	82,1%
Avg. 4.Bp.prod - novcu	$10.637.008	86,0%	98,7%

Mp - By Prod. - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
4.Mp.aprod - novcu	$ 6.119.909	48,5%	67,9%
4.Mp.bprod - novcu	$ 4.927.129	35,7%	43,8%
4.Mp.cprod - novcu	$ 5.113.564	45,7%	57,8%
4.Mp.dprod - novcu	$ 5.938.063	38,3%	51,5%
4.Mp.eprod - novcu	$ 4.708.897	34,3%	42,1%
Avg. 4.Mp.prod - novcu	$ 5.361.512	41%	53%

Wp - By Prod. - novcu	NPV	IRR	Avg. ROI
4.Wp.aprod - novcu	$ -1.222.179	-10,8%	-4,8%
4.Wp.bprod - novcu	$ -1.448.290	-12,8%	-4,0%
4.Wp.cprod - novcu	$ -1.268.300	-12,4%	-5,2%
4.Wp.dprod - novcu	$ -1.397.067	-11,2%	-3,6%
4.Wp.eprod - novcu	$ -1.448.290	-12,8%	-4,0%
Avg. 4.Wp.prod - novcu	$ -1.356.825	-12%	-4%

Tabella 48. Caso BRA 4. BST-30: riepilogo delle performances finanziarie (NPV, IRR e ROI) per ogni scenario analizzato.

Il quarto caso brasiliano presenta in generale ottime performance in tutti gli scenari di prezzo ad eccezione del Middle Price e Worst Price scenario per entrambi i modelli di vendite in assenza di VCUs, fenomeno dovuto principalmente all'efficienza di scala, la quale porta ad una flessione del 10% circa del CT d'esercizio annuali ($280-291 t^{-1} di biochar prodotto), all'aumento considerevole del volume di biochar vendibile (7'776 $t\ y^{-1}$ circa) il quale genera di conseguenza un più alto volume di ricavi e ai minor costi di gestioni dell'impianti dati i prezzi medi presenti sul mercato brasiliano. Infatti, osservando le cumulate dei FDCF per il modello di ricavi base (Tab. 49) e per il modello di vendite by products (Tab. 50) si può osservare che tutti gli scenari con emissione di crediti (curve continue) presentano valori positivi e crescenti nel tempo.

Nel caso di ricavi biochar only, l'apporto annuale dalla vendita di crediti di carbonio di $1,5 mln equiparano il 75% dei ricavi totali mentre nello scenario di vendite by products questa percentuale di attesta intorno al 50%, dando in entrambi i casi un grande impulso alla profittabilità (l'Avg. IRR registra un -100%/120% in assenza di emissione VCUs). Con ordine, lo scenario più redditizio rimane il *Bp* – By products – vcu dove si registra un Avg. NPV di oltre $23 mln ($20,8 mln – $26,7 mln) e un Avg. IRR del 216% (188% - 260%). Nel caso si venda solo biochar, invece, l'Avg NPV subisce una contrazione di circa $5 mln che però non lede una performance finanziaria più che ottima attestandosi a valori inotrno i $18,4 mln per un Avg. IRR del 169%.

Anche il Middle Price scenario denota performance simili al *Bp* biochar only grazie alle vendite by products le quali controbilanciano gli effetti della flessione del prezzo di offerta del biochar. Per la vendita in bundling di registra un Avg. NPV di $17,8 mln ($15,7 mln -$21 mln) e un Avg. IRR del 169% (145% - 205%). Nel caso in cui si considerino le sole vendite di biochar si otterrebbe comunque un Avg NPV superiore a $13,9 mln e un Avg. IRR del 129%. Inoltre, la solidità di questo quadro finanziario viene dimostrato da altri due fenomeni: anche il *Wp* scenario, nonostante una discesa di

prezzo del 48%, raggiunge un Avg. NPV di $ 11,3 mln circa e un Avg. IRR del 114% per il modello di vendite in bundling e un Avg. NPV di $8 mln e un Avg. IRR del 78% in sua assenza, rendendo possibile l'elisione della probabilità di disallineamento tra prezzo di vendita e wtp dei farmers brasiliano sulla quale non è stato possibile condurre studi approfonditi e che, quindi, si stima per logica inferiore al prezo *Bp*. In secondo luogo, le vendite in bundling, grazie al volume di prodotti finiti offerti sul mercato, riescono a controbilanciare perfettamente l'assenza dell'emissione di VCUs, registrando comunque ottime performances nel Best Price scenario (Avg NPV pari a $10,6 e un Avg. IRR dell'86%).

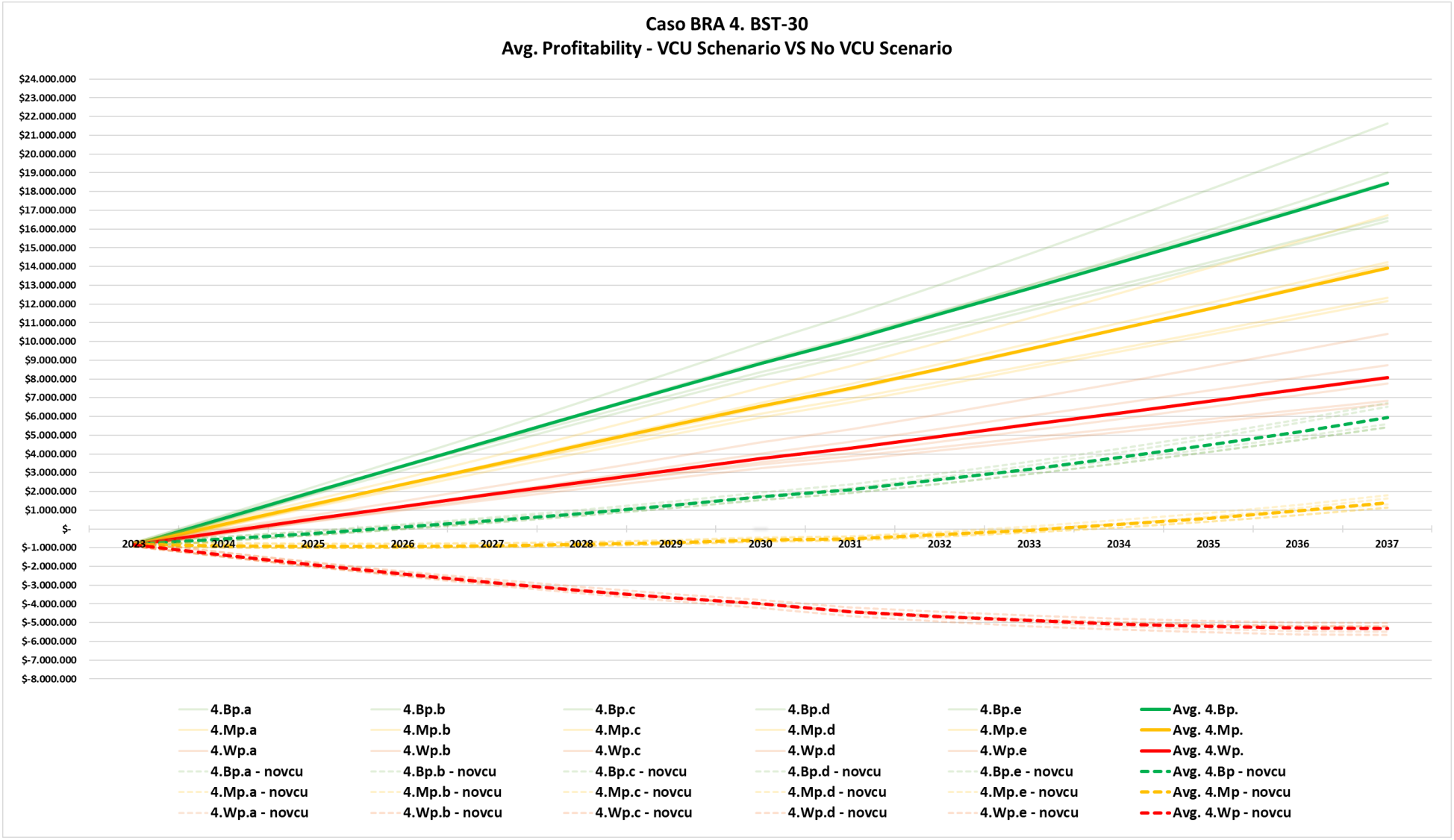


Tabella 49. Caso BRA 4. BST-30: grafico delle curve cumulate FDCFs per ogni scenario analizzato che sia basato sul modello di ricavi "biochar only".

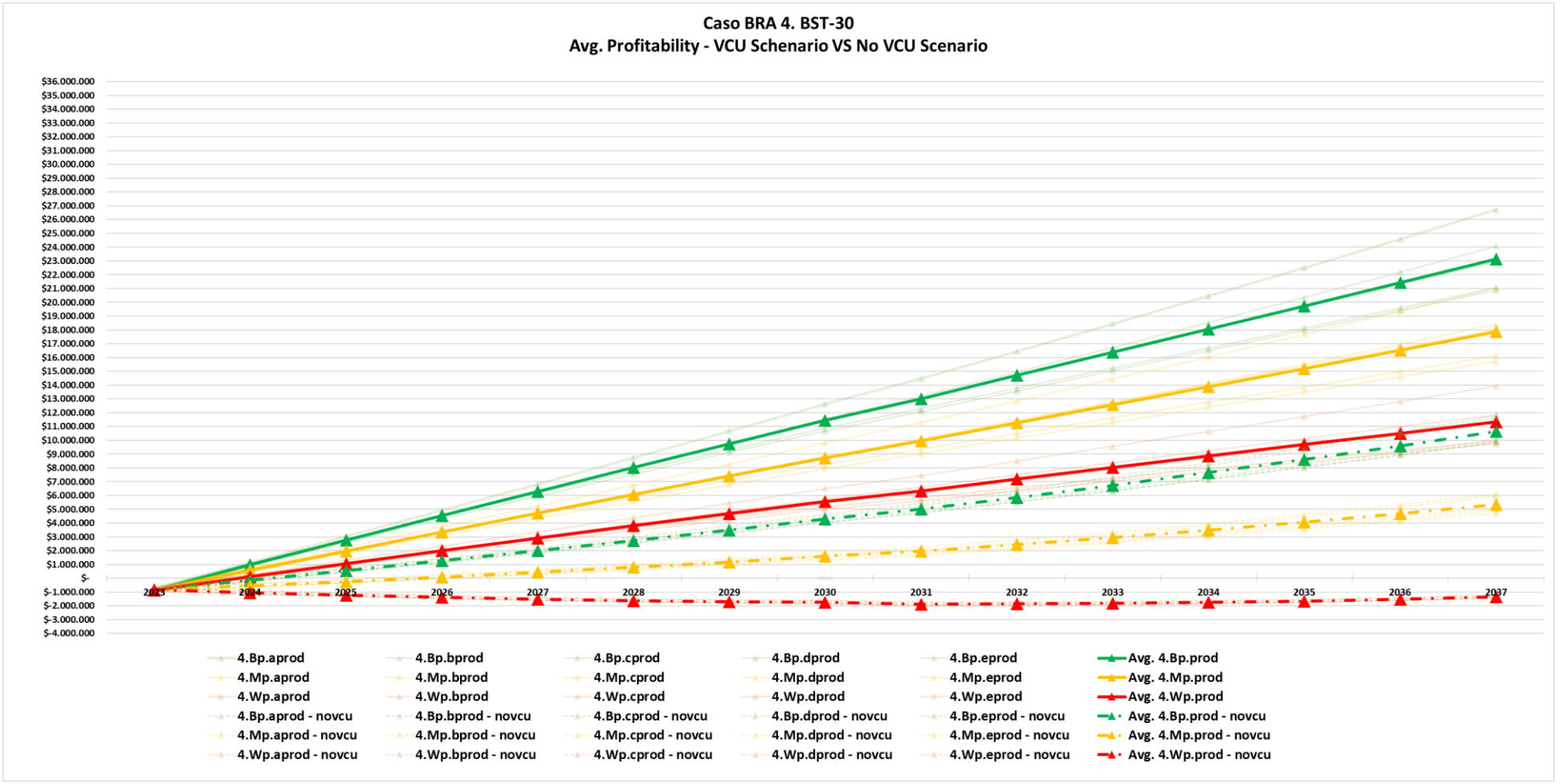


Tabella 50. Caso BRA 4. BST-10: grafico delle curve cumulate FDCFs per ogni scenario analizzato che sia basato sul modello di ricavi "by products".

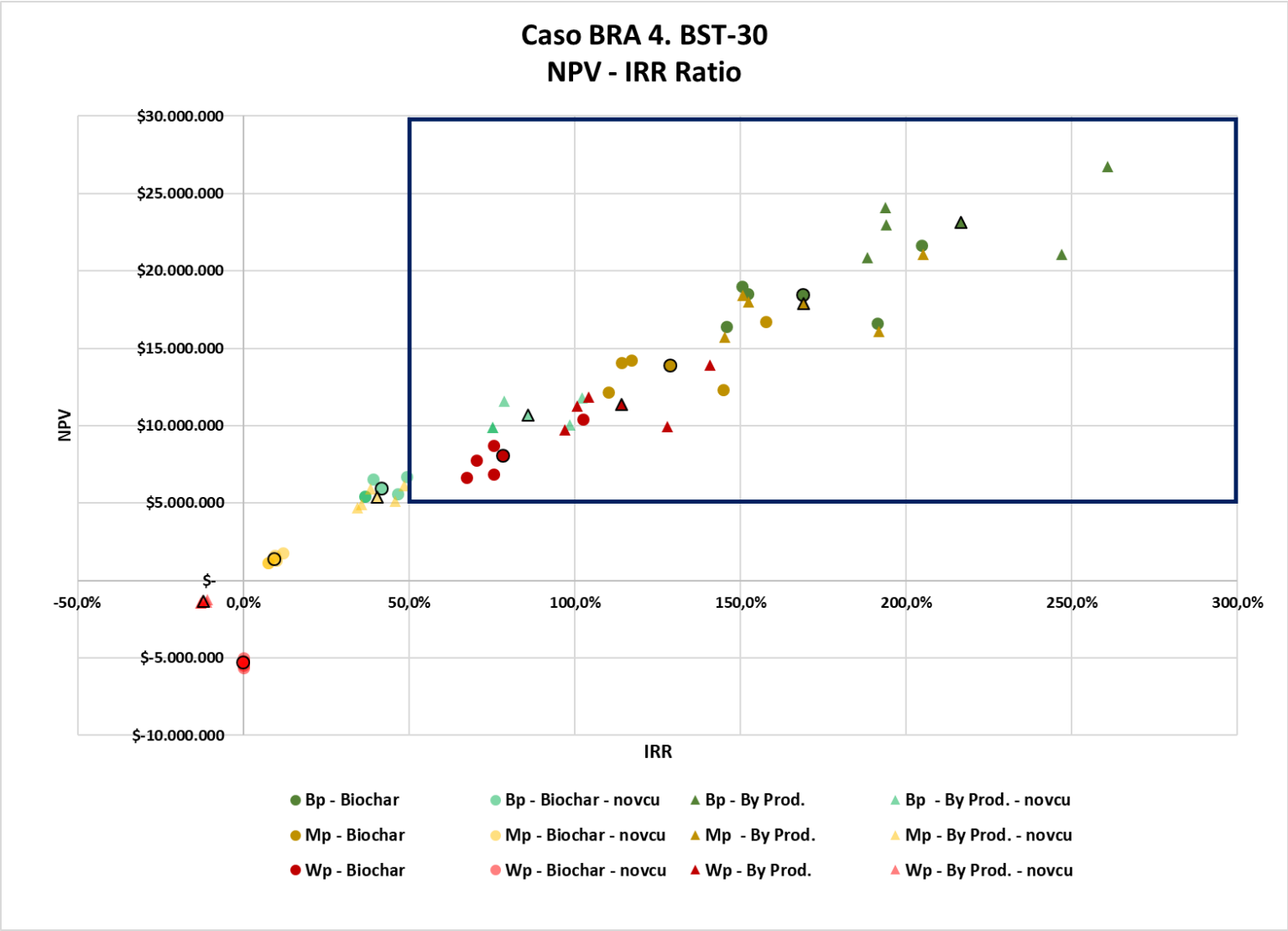


Tabella 51. Caso BRA 4. BST-30: grafico NPV-IRR per ogni scenario analizzato.

11.6. Analisi conclusiva dei risultati ottenuti per i casi brasiliani

L'analisi dei casi brasiliani ha sostanzialmente permesso di individuare e quantificare l'influenza dell'emissione di crediti di carbonio sulla profittabilità del progetto per gli scenari osservati. In sostanza, per il caso BRA 3 2xBST-10, gli scenari studiati in un contesto di non certificazione hanno evidenziato deficit e parametri finanziari non conformi alle aspettative dei potenziali investitori per tutti gli scenari di prezzo analizzati, traducendosi in un -$8 mln circa sull'Avg. NPV e in un -60% sui valori medi dell'IRR. Per questo caso, i soli scenari di interesse sono quelli appartenenti al Best Price scenario (come evidenziato in Tab. 44) e al Middle Price scenario. Nel caso di vendite by products, a patto che non rimanga invenduto né biochar né wood vinegar, il project owner può accettare rendite inferiori sull'investimento speso (Avg. NPV di $8,26 mln e Avg. IRR del 61%) al fine di abbassare i prezzi di vendita dei prodotti finiti fino ad uno scenario Worst Price.

L'investimento in due reattori identici posizionati a 400 km di distanza l'uno dall'altro al fine di limitare il dispendio di risorse per il trasporto di materia prima non ripaga quanto l'investimento analizzato per un impianto di scala maggiore situato presso il fornitore che dispone di più biomassa da pirolizzare. Il BST-30 garantisce effetti di scala maggiori riducendo così la pressione annuale dei CT sui RT ($280-291 t^{-1} di biochar prodotto) e, producendo più biochar di due impianti BST-10 messi insieme (si passa da 5184 $t\,y^{-1}$ a 7776 $t\,y^{-1}$), aumenta considerevolmente la profittabilità del progetto data dalla generazione maggiore di VCUs, fattori che oscurano totalmente l'aumento del costo di biomassa da acquistare e il suo trasporto dal fornitore *x* al plant di produzione. Inoltre, i ricavi aumentano a tal punto (soprattutto assumendo positive le vendite di wood vinegar) da rendere persino redditizio il progetto in un contesto di non certificazione come è possibile intravedere in Tab. 51, dove alcuni scenari *Wp* (triangoli rossi scuro) rientrano nell'area di profittabilità target identificata. Non sussiste, però, alcuna evidenza che porterebbe il project owner a non certificare il progetto data il grande delta di redditività catturabile nel caso in cui si procedesse come pianificato tramite Verra. In questo caso, infatti, sarebbe possibile abbassare il prezzo di offerta sul mercato biochar ad uno scenario *Wp* per incontrare la wtp dei farmers brasiliani, senza comunque perdere una resa finanziaria ottima che denota Avg. NPVs superiori a $8 mln (*Wp*) nel caso di vendite di solo biochar e $11,3 mln considerando il bundling e Avg. IRRs sopra il 78% e 114% rispettivamente. Nel miglior caso possibile invece, con uno scenario di prezzo Best Price ed emissione di VCUs, per entrambi i modelli di vendite analizzati, si osservano valori più che duplicati per NPVs e IRRs rispetto al caso BRA 3, sancendo la definitiva propensione di un potenziale investitore a scegliere un investimento simile a quello studiato per il caso BRA 4.

CONCLUSIONE

Lo scopo di questo studio è determinare il livello di diversificazione ottimo di un portafoglio di progetti inerenti alla realizzazione di una strategia net-zero. A questo fine, prendendo come riferimento il caso di una grande azienda italiana leader di settore nella produzione di caffè tostato, si è cercato di dare una valutazione economica complessiva agli investimenti necessari per raggiungere l'obiettivo di neutralizzare (in parte) le proprie emissioni annue entro il 2030 tramite la realizzazione di biochar. La ricerca si concentra sull'analisi finanziaria dell'investimento nella produzione di biochar e nella conseguente emissione di Crediti di Compensazione al Carbonio (CCC), massimizzata grazie all'utilizzo di un impianto Combined Heat and Biochar pyrolyzer altamente tecnologico dell'azienda cinese Beston Group Ltd. In quest'ottica, il progetto è stato realizzato in conformità alla metodologia Verra VM0044, redatta appositamente per divenire benchmark internazionale di riferimento per la regolamentazione della produzione di biochar e la standardizzazione del conteggio del volume di tCO2e sequestrate in sede progettuale, con l'obiettivo di determinare l'emissione corrispettiva di Verified Carbon Units. Il lavoro procede attraverso la valutazione di 210 scenari a seconda della locazione geografica d'installazione del reattore scelta, della scala produttiva adottata, dello scenario di prezzo di vendita del biochar ipotizzato, del modello di Revenues assunto e della stima di valore dell'investimento iniziale, del WACC e della crescita del prezzo di emissione dei CCC, in un contesto di certificazione o meno. Inoltre, il lavoro approfondisce gli effetti agronomici dell'utilizzo del biochar come ammendante agricolo e a quali condizioni questo possa divenire un reale prodotto sostituto all'interno delle prassi maggiormente diffuse per fertilizzare il suolo in Italia. Sono state condotte, pertanto, analisi sulla willingness to pay dei consumatori finali italiani al fine di verificare il mismatch di quest'ultima con il prezzo di vendita B2C/B2B del biochar che riesca a garantire performances finanziare progettuali adeguate. Per il caso brasiliano, a causa della mancanza di dati reperibili in letteratura sul mercato B2B/B2C di riferimento, si è assunto che le vendite di biochar avvengano grazie a canali privilegiati tra fornitori e produttore in un contesto di partnership *do ut des* concordate e regolate a priori. In ogni caso, è utile ricordare che, data l'impossibilità di stimare il tasso di penetrazione delle vendite di biochar nei mercati di riferimento B2B e B2C, si è assunto che la quantità di biochar prodotto durante l'anno rimasta invenduta sia nulla (nonostante siano state stanziate ingenti risorse per il marketing al fine di bilanciare l'irrealisticità di tale assunzione). Questo ha comportato una cospicua contrazione temporale del payback time influenzando positivamente i risultati in tutti gli scenari e, pertanto, si sono selezionati come "finanziariamente accettabili" tutti quegli scenari con IRRs maggiori del 45-50%.

Per il primo caso italiano si è scelto l'impianto BST-05 Pro in grado di raggiungere un utilization rate superiore al 90% con la sola biomassa disponibile (2325 t y^{-1} di silverskin pallettizzata) presso i due centri di torrefazione, locati a Gattinara e Torino rispettivamente. L'investimento iniziale oscilla tra k$332 (BC) e k$566 (WC). Per tutti gli scenari di prezzo si è stimato che il 99% del biochar prodotto venga venduto all'ingrosso (690 $t\ y^{-1}$) mentre le restanti (7 $t\ y^{-1}$) vengono assorbite dal mercato hobbistico. Nello specifico, per lo scenario *Bp* ($P_{b,B2B}^{B_p} = \$800t^{-1}$, $P_{b,B2C}^{B_p} = \$20kg^{-1}$), la vendita all'ingrosso ha generato ricavi annuali per un totale di k$577,3, mentre quelle del mercato hobbistico k$145,8, ovvero il 20% dei ricavi complessivi annui, i quali si attestano intorno a k$723. Tuttavia, gran parte del valore catturato dalle vendite viene assorbito dal Costo Totale annuale stimato pari a k$638,6 ($916 t^{-1} di biochar prodotta) influenzando un Avg. NPV e un Avg. IRR contenuti ($1,53 mln e 23% rispettivamente). Per gli altri scenari di prezzo ($P_{b,B2B}^{Psc} < \$800t^{-1}$, $P_{b,B2C}^{Psc} < \$20kg^{-1}$) si sono registrati RT annui non sufficienti a sostenere il peso dei CT d'esercizio portando il progetto a registrare NPVs e IRRs prossimi allo zero (*Mp*) o negativi (*Wp*). Questo fenomeno è dovuto alla

ridotta valorizzazione dei VCUs emessi in un'economia in cui l'addizionalità del sequestro di GHG emissions è di difficile determinazione. Infatti, il prezzo associato è stato stimato pari a $v_0^{ITA} = \$4{,}50\ tCO2eq^{-1}$ per 1340 $tCO2e\ y^{-1}$ sequestrate (18'720 al termine del progetto), generando una copertura dei CT intorno al 2%-3%.

Il secondo caso italiano è stato strutturato per verificare l'impatto di eventuali economie di scala produttive sulle performances finanziarie misurate. A questo fine è stato selezionato l'impianto BST-10 (I_{inv} stimato tra k$765 (BC) e $1,04 mln (WC)) per osservare un trhoughput produttivo triplicato rispetto al caso precedente. Il reattore è in grado di pirolizzare 8640 t y^{-1} di biomassa in input per una produzione di 2592 t y^{-1} di biochar, obbligando il project owner all'acquisto di biomassa aggiuntiva (6'315 t y^{-1} ad un prezzo di $100 t^{-1}). Quest'ultima voce di costo, in aggiunta al trasporto, ha limitato gli effetti positivi di scala sulla voce di CT d'esercizio, stimati pari a $2,1 mln circa ($850 t^{-1} di biochar prodotta, ovvero il 5% inferiori rispetto a quelli registrati per il BST-05 Pro). Il modello di ricavi è stato strutturato in egual maniera al caso ITA 1 (99% B2B, 1% B2C equivalenti in questo caso al 25% dei RT d'esercizio) raggiungendo fatturato di $2,7 mln nel Best Price scenario per un Avg. NPV di $8,2 mln ed un Avg. IRR pari al 48%. Per quanto riguarda lo scenario senza emissione di VCUs, la flessione dell'Avg. NPV e dell'Avg. IRR si attesta al -15% e -5% rispettivamente, risultando più marcata dato il più alto volume di crediti emessi (7'710 $tCO2e\ y^{-1}$ sequestrate per un totale complessivo di 108'000 al 14° anno). Anche in questo caso, sia con emissione sia senza, gli scenari di prezzo inferiori *Mp* e *Wp* non garantiscono una solidità adeguata al progetto anche se gli NPVs e l'IRRs risultano positivi (<$3,5 mln e <24% rispettivamente), complice il basso valore ottenibile dalla vendita di VCUs. Grazie a questo reattore, invece, è possibile sintetizzare wood vinegar e, quindi, si può considerare il modello di ricavi basato sulle vendite in bundling (biochar + sotto-prodotto di reazione), per il quale si registra un generale netto miglioramento di tutti i parametri in esame per qualsiasi scenario di prezzo considerato. Per lo scenario *Bp*, un incremento del 18% dei ricavi dato dalle vendite di wood vinegar ($P_{wv}^{Bp} = \$1000t^{-1}$), innalza l'Avg. NPV del 45% il quale raggiunge valori pari a $12,5 mln. L'Avg. IRR invece duplica le proprie performances, attestandosi a valori intorno l'80%. L'assenza di emissione dei VCUs non conduce a grandi oscillazioni dei parametri potendo, così, essere presa in considerazione. Non è altrettanto vero per lo scenario *Mp* ($P_{b,B2B}^{Psc} = \$650t^{-1}$, $P_{b,B2C}^{Psc} < \$15kg^{-1}$, $P_{wv}^{Bp} = \$850t^{-1}$) dove è consigliabile procedere con l'iter di certificazione per garantire Avg. NPV e Avg. IRR almeno pari a $6,5 mln e 45% rispettivamente.

La metodologia VM0044 di Verra prevede l'emissione di VCUs solamente nel caso in cui sia accertata l'applicazione di biochar nel suolo da parte del cliente finale. Pertanto, questo studio ha cercato di far luce sul prezzo di vendita minimo imponibile che garantisse, da una parte, performances finanziarie adeguate agli occhi di potenziali investitori e che riducesse per quanto possibile, dall'altra, il mismatch di valore in essere con la B2B/B2C customers' wtp, la quale si attesta nel range di $275-650$ t^{-1} (opt. price: $350 t^{-1}) per il mercato B2B e $12-$25 kg^{-1} (opt. price: $13 kg^{-1}) per il segmento B2C. In qualsiasi caso, i risultati ottenuti consigliano di portare a termine l'iter di certificazione mediante Verra al fine di estrarre, per quanto possibile, valore dall'emissione di VCUs utile ad ammortizzare i CT d'esercizio (se pur in maniera ridotta). Per garantire, invece, il best balance ever del trade off sopra riportato è d'uopo adottare una scala produttiva maggiore al fine di poter matchare il più possibile la wtp all'interno di un Middle Price scenario, pur garantendo NPVs e IRRs proficui simili ad un Best Price scenario. Come si è dimostrato nel Cap 11.3, questo scenario può essere notevolmente agevolato dall'aumento del prezzo di vendita dei VCUs emessi ($v_0^{ITA} = \$15 - 20\$\ tCO2eq^{-1}$) simultaneamente alla riduzione del prezzo di acquisto della biomassa in input ($c_b = \$40 - \$60\ t^{-1}$), fattori che però dipendono direttamente dall'abilità del management nel provare l'effettiva addizionalità delle tonnellate di CO2 rimosse e nel concordare partnership di fornitura biomassa vantaggiose.

Per quanto concerne i casi brasiliani, invece, il focus analitico si è concentrato maggiormente sulla valutazione delle performances finanziarie a seconda che si installino due reattori BST-10 (I_{inv} stimato tra $1,08 mln (BC) e $1,38 mln (WC)) presso i due centri di raccolta biomassa indicati dall'azienda italiana come suoi fornitori di caffè verde o che si proceda con l'installazione di un impianto di medio-grande scala BST-30 (I_{inv} stimato tra k$720 (BC) - k$942 (WC)) presso il fornitore che dispone di più cascara da poter pirolizzare. Per il caso BRA 3 2xBST-10, la biomassa disponibile presso il fornitore 1 (8'257 t y^{-1}) satura al 97% la capacità in input del plant, mentre il plant 2 obbliga il project owner a reperire 4'965 t y^{-1} di cascara aggiuntive, a fronte di una complessiva produzione di biochar pari a 5'184 t y^{-1} in grado di stoccare 12'631 $tCO2e\ y^{-1}$, per un totale di 176'836 $tCO2e$ a fine vita utile. Dal momento che in un'economia in via di sviluppo è molto più semplice dimostrare l'addizionalità del beneficio climatico prodotto, si è stimato un valore di partenza dei VCUs emessi pari a $v_0^{BRA} = \$80\ tCO2eq^{-1}$, generando circa $1 mln di ricavi annuali ed equiparando il 60% circa dei RT *Bp* ($P_{b,B2B}^{Bp} = \$266t^{-1}$, $P_{b,B2C}^{Bp} = \$6kg^{-1}$), a loro volta pari a $1,6 mln. Nello scenario di ricavi basati sul modello di vendite in bundling ($P_{wv}^{Bp} = \$333t^{-1}$), i RT raggiungono valori intorno a $1,95 mln annui. Stimando CT d'esercizio pari a $1,575 mln (*Wp*) e $1,64 mln (*Bp*), ovvero, $303 t^{-1} (*Wp*) e $316,5 t^{-1} (*Bp*) di biochar prodotta, i soli RT assunti in tutti gli scenari di prezzo non riescono a generare marginalità accettabili rendendo obbligatoria la certificazione del progetto e la successiva emissione di crediti. Infatti, se in sua assenza si riportano performances finanziarie sottotono e non accettabili, in sua presenza il progetto mostra parametri più che positivi per scenari di prezzo superiori al Middle Price ($P_{b,B2B}^{Mp} > \$216t^{-1}$, $P_{b,B2C}^{Mp} > \$5kg^{-1}$) determinando NPVs > $6,5 mln ed IRRs > 43% per il modello di ricavi biochar only, fino ad un massimo di $8,2 mln e 59% rispettivamente nel *Bp*. Considerando il surplus di RT del 18% derivante dalle vendite aggiuntive di wood vinegar, si ottengono NPVs > $4,9 mln e IRRs > 40% per scenari *Wp* ($P_{b,B2B}^{Wp} > \$166t^{-1}$, $P_{b,B2C}^{Wp} > \$3kg^{-1}$, $P_{wv}^{Wp} > \$233t^{-1}$) fino a $11,3 mln e 81% nel Best Price scenario.

Il quarto caso brasiliano, tuttavia, risulta essere il migliore caso analizzato in questo scritto dati gli evidenti effetti di scala portati da una capacità di assorbimento biomassa pari a 25'920 t y^{-1} la quale comporta un rateo produttivo di 7'776 t y^{-1} di biochar, per un totale di 18'390 $tCO2e\ y^{-1}$ sequestrate raggiungendo complessivamente 257'500 $tCO2e$ al 14° di vita utile. I ritorni annuali si attestano dunque intorno ai $1,5 mln i quali corrispondono al 75% dei ricavi totali ottenuti vendendo biochar. In secondo luogo, si riscontrano CT annuali di circa $2,23 mln, pesando per circa $290 t^{-1} di biochar prodotta, in flessione del 7% rispetto al caso BRA 3 nonostante siano necessari ingenti investimenti per l'acquisto di circa 14'000 t y^{-1} di biomassa aggiuntiva e del conseguente trasporto. In questo caso, sia il Best Price scenario, sia il Middle Price scenario (per le sole vendite in bundling) rilevano RT positivi e superiori ai CT di esercizio, ovvero $2,63 mln (*Bp*, biochar only), $3,17 mln (*Bp*, by products) e $2,6 mln (*Mp*, by products) rispettivamente, garantendo comunque performances accettabili anche in assenza di emissione dei crediti. Per gli altri scenari invece, la pressione dei CT annuali non viene sufficientemente ripagata dai RT che subiscono gli effetti della diminuzione del prezzo di vendita. In caso di certificazione, però, grazie all'enorme contributo dei ricavi ottenuti dalla vendita di VCUs, il caso BRA 4 presenta un'elevata profittabilità per tutti gli scenari di prezzo analizzati. Nel caso di modello di ricavi by-products gli NPVs osservati ricadono nel range $10 mln (*Wp*) - $26,7 mln (*Bp*) determinando IRRs tra 100% (*Wp*) e 260% (*Bp*). Non considerando le vendite di wood vinegar, invece, si avranno NPVs tra $7 mln (*Wp*) - $21 mln (*Bp*) e IRRs tra 70% (*Wp*) e 200% (*Bp*).

Osservando i dati sopra riportati per il caso BRA 4. BST-30, è evidente di come l'investimento in due reattori identici posizionati a 400 km di distanza l'uno dall'altro al fine di limitare il dispendio di risorse per il trasporto di materia prima non ripaga quanto l'investimento analizzato per un impianto di scala maggiore situato presso il fornitore che dispone di più biomassa da pirolizzare. Il BST-30 garantisce effetti di scala maggiori riducendo così la pressione annuale dei CT sui RT (complice anche il minor livello dei prezzi del mercato brasiliano) e, producendo più biochar di due impianti BST-10 messi insieme, aumenta considerevolmente la profittabilità del progetto data dalla generazione maggiore di VCUs, fattori che oscurano totalmente l'aumento del costo di biomassa da acquistare e il suo trasporto dal fornitore *x* al plant di produzione. Inoltre, i ricavi aumentano a tal punto (soprattutto assumendo positive le vendite di wood vinegar) da rendere persino redditizio il progetto in un contesto di non certificazione. Non sussiste, però, alcuna evidenza che porterebbe il project owner a non certificare il progetto data il grande delta di redditività catturabile nel caso in cui si procedesse come pianificato tramite Verra. In questo caso, infatti, sarebbe possibile abbassare il prezzo di offerta sul mercato biochar ad uno scenario *Wp* per incontrare la wtp dei farmers brasiliani, senza comunque perdere una resa finanziaria ottima. In ogni caso, il quarto caso brasiliano è maggiormente vantaggioso anche dei casi italiani sotto tutti i punti di vista anche se tali performances finanziarie possono essere chiaramente ridotte dall'aumento del costo della biomassa e del suo trasporto e data la dipendenza dal successo delle vendite di VCUs, dalla riduzione di quest'ultime.

Indice Figure

FIGURA 1. SCHEMA DI SINTESI DEI POSSIBILI PERCORSI DI TRASFORMAZIONE DELLA BIOMASSA NELLE FILIERE AGROENERGETICHE [8]. 11

FIGURA 2.RIEPILOGO DELLE CARATTERISTICHE DI PROCESSO E DEI PRODOTTI GENERATI [12]. 13

FIGURA 3. RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DI UN PIROLIZZATORE MECCANICO A COCLEA CONTINUA [14]. 14

FIGURA 4. SINTESI DEI PROCESSI DI PIROLISI ATTUALMENTE IN FASE DI STUDIO. TABLE 3 BIOCHAR PRODUCTION USING DIFFERENT TRADITIONAL AND MODERN APPROACHE [13]. 15

FIGURA 5. CONCETTUALIZZAZIONE DELLE TRE FASI CARATTERIZZANTI IL PROCESSI DI PIROLISI.
FONTE: BESTON GROUP LTD. 18

FIGURA 6. EFFETTO DELLA TEMPERATURA DI PIROLISI SUL BIOCHAR: A. CARBONIO AMORFO; B. CARBONIO TURBOSTATICO; C. GRAFITE [3]. 19

FIGURA 7. MODELLO ILLUSTRATIVO DEL DECADIMENTO DI CARBONIO UTILIZZANDO UN MODELLO DI DECADIMENTO CON UN MRT DI 10 ANNI PER IL POOL C LABILE E 1000 ANNI PER IL POOL C STABILE. ANALISI SU BIOCHAR CONTENENTE PROPORZIONI DIVERSE DI C LABILE [4]. 20

FIGURA 8. RAFFIGURAZIONE GRAFICA DEGLI EFFETTI DEL BIOCHAR SUL CLIMA NELLE CONDIZIONI DI CAMPO COLTIVATO (SINISTRA) O IN RIPOSO (DESTRA). I SEGNI TRA PARENTESI INDICANO L'EFFETTO DEL BIOCHAR SULLA VARIABILE RISPETTO AL CONTROLLO SENZA BIOCHAR: (+) AUMENTATO, (−) DIMINUITO, (=) INVARIATO, (?) [42]. 21

FIGURA 9. RIEPILOGO DEI PRICIPALI EFFETTI MISURATI IN SEGUITO ALL'APPLICAZIONE DI BIOCHAR COME AMMENDANTE AGRICOLO [42]. 23

FIGURA 10. INFOGRAFICA RELATIVA AI POTENZIALI USI DEL BIOCHAR PER SETTORI DI APPLICAZIONE [50]. 24

FIGURA 11. CLASSIFICA DEI VARI SETTORI DI MERCATO/APPLICAZIONE PER IL BIOCHAR NEI PROSSIMI 3 ANNI (SULL'ASSE X UN VALORE PIÙ ALTO INDICA IL MERCATO PIÙ PREFERITO E UN VALORE PIÙ BASSO INDICA IL MERCATO MENO PREFERITO) [52]. 25

FIGURA 12. CONCETTUALIZZAZIONE DEL MODELLO LINEARE DI INNOVAZIONE.
FONTE: POLITECNICO DI TORINO. 25

FIGURA 13. NUMERO DI PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE WORLDWIDE CHE CONTENGONO LA PAROLA "BIOCHAR" [53]. 26

FIGURA 14. MAPPA RAFFIGURANTE I KEY PLAYERS DELL'INDUSTRIA EUROPEA DI BIOCHAR [54]. 27

FIGURA 15. NUMERO CUMULATO DI IMPIANTI PRODUTTIVI BIOCHAR INSTALLATI IN EU (DX) E LORO DISTRIBUZIONE GEOGRAFICA (SX) [54]. 28

FIGURA 16. DISTRIBUZIONE DELLA PRODUZIONE DI BIOCHAR PER PAESE D'ORIGINE NEL 2014 [56]. 29

FIGURA 17. CONCETTUALIZZAZIONE DEL MODELLO DI DIFFUSIONE DI ROGER [52]. 30

FIGURA 18. CONCETTUALIZZAZIONE DELLA SUPPLY CHAIN LAGATA ALLA PRODUZIONE E COMMERCIALIZZAZIONE DEL BIOCHAR [52]. . 31

FIGURA 19. ESTENSIONI RELATIVE DEI DIVERSI FATTORI CHE SI PRESENTANO COME OSTACOLI IN BASE ALLE RISPOSTE RACCOLTE (L''ASSE X CON UN VALORE PIÙ ALTO INDICA UN OSTACOLO MAGGIORE E UN VALORE PIÙ BASSO INDICA UN OSTACOLO MINORE) [52].. 32

FIGURA 20. CAMPIONE DI RICAVI LOW-HIGH MEDI [$\$ t-1$] PER SEI DIFFERENTI COLTURE IN NORDAMERICA [66]. 33

FIGURA 21. RISULTI DELL'ANALISI DELLA WTP MEDIA RIPORTATA DA DUMOTIER J. ET AL. (2020) [66]. 34

FIGURA 22. DISTRIBUZIONE GEOGRAFICA DEI VOLUNTARY OFFSET PROJECTS ATTIVI [68]. 44

FIGURA 23. DIMENSIONI DEL MERCATO DEL CARBONIO VOLONTARIO TRANSATO PER TIPOLOGIA DI PROGETTO (2019-2021) [69]. . 45

FIGURA 24. ROADMAP DEL VCM.
FONTE: VERRA E ICROA, 2020 46

FIGURA 25. TREND DELLE TEMPERATURE GLOBALI CORRELATE AI LIVELLI DI GHG EMISSIONS REGISTRATI NEL 2022 [70] 47

FIGURA 26. ANALISI DEI TREND DI PREZZO FUTURI RELATIVI AI CREDITI DI CARBONIO [74]. 60

FIGURA 27. LOCALIZZAZIONE DEI PROGETTI ATTIVI BESTON GROUP LTD. NEL 2022. 64

FIGURA 28. MODELLO 3D RAFFIGURANTE L'IMPIANTO BST-05 PRO.
FONTE: BESTON GROUP LTD. 64

FIGURA 29. MODELLO 3D DELL'IMPIANTO BST-05 PRO E DELLE SUE COMPONENTI.
FONTE: BESTON GROUP LTD. 65

FIGURA 30. DRYER BESTON.
FONTE: BESTON GROUP LTD. 67

FIGURA 31. RIEPILOGO DELLE COMPONENTI PRE-ASSEMBLATE NELL'IMPIANTO BST-05 PRO.
FONTE: BESTON GROUP LTD. 68

FIGURA 32. MODELLO 3D DEGLI IMPIANTI BST-10/30 E DELLE LORO COMPONENTI.
FONTE: BESTON GROUP LTD. 70

FIGURA 33. DISEGNO TECNICO DEL PLANT-LAYOUT PER GLI IMPIANTI BST-10/30.
FONTE: BESTON GROUP LTD. 70

FIGURA 34. SCHEDULING DEL PROCESSO DI INSTALLAZIONE DI UN IMPIANTO BST-10/30.
FONTE: BESTON GROUP LTD. 71

FIGURA 35. RIEPILOGO DELLE COMPONENTI PRE-ASSEMBLATE NEGLI IMPIANTI BST-10/30.
FONTE: BESTON GROUP LTD. 76

FIGURA 36. RAFFIGURAZIONE DELLA STRUTTURA E DELLE COMPONENTI DEL REATTORE ASSEMBLATO IN TUTTI GLI IMPIANTI.
FONTE: BESTON GROUP LTD. 77

FIGURA 37. OPERATIONAL FLOW CHART PER UN IMPIANTO BST-05 PRO.
FONTE: BESTON GROUP LTD. 79

FIGURA 38. OPERATIONAL FLOW CHART PER GLI IMPIANTI BST-10/30.
FONTE: BESTON GROUP LTD. 79

FIGURA 39. RANGE DI PREZZO DEI CREDITI AL CARBONIO PER ENTE CERTIFICATORE [76]. 124

FIGURA 40. PREZZI MINIMI, MEDIANI E MASSIMI DEL CARBONIO PER CATEGORIE DI PROGETTI CERTIFICATI [79]. 125

Indice Tabelle

TABELLA 1. SIGLE SCENARI ITALIANI: ITA 1. BST-05 PRO E ITA 2. BST-10 50

TABELLA 2. SIGLE SCENARI ITALIANI: BRA 3 2XBST-10 E BRA 4 BST-30 51

TABELLA 3. RIEPILOGO SCENARI DI PREZZO *BP*, *MP*, *WP* SCELTI PER IL MERCATO ITALIANO 52

TABELLA 4. VAN WESTENDORP PRICE SENSITIVITY ANALYSIS PER IL MERCATO BIOCHAR B2B 54

TABELLA 5. VAN WESTENDORP PRICE SENSITIVITY ANALYSIS PER IL MERCATO BIOCHAR B2C 55

TABELLA 6. ANALISI CAMPIONARIA DEI PREZZI ATTUALI PRESENTI SUL MERCATO BIOCHAR B2C ITALIANO. 56

TABELLA 7. RIEPILOGO SCENARI DI PREZZO *BP*, *MP*, *WP* SCELTI PER IL MERCATO BRASILIANO. 57

TABELLA 8. PROSPETTO SIGLE DEGLI SCENARI ANALIZZATI A SECONDA DEL MODELLO DI REVENUE ANALIZZATO (BIOCHAR ONLY, BY PRODUCTS) E DEL VALORE WC - BC ASSUNTO DALL'INVESTIMENTO INIZIALE, DAL WACC E DAL TREND DI CRESCITA DEL PREZZO ASSOCIATO AI VCU EMESSI. 59

TABELLA 9. PROSPETTO COMPLETO DELLE SIGLE INERENTI AGLI SCENARI ITALIANI 61

TABELLA 10. PROSPETTO COMPLETO DELLE SIGLE INERENTI AGLI SCENARI BRASILIANI 61

TABELLA 11. PROSPETTO TECNICO DELL'IMPIANTO BST-05 PRO. 66

TABELLA 12. PROSPETTO TECNICO DEGLI IMPIANTI BST-10/30. 69

TABELLA 13. RAFFIGURAZIONE (DX) E PROSPETTO TECNICO (DX) DEL BIOTRITURATORE CINGOLATO MOVIBILE ELIET SUPERPROF CROSS COUNTRY 2015 MAX ZR ABM-VANGUARD EFI B&S. 72

TABELLA 14. RAFFIGURAZIONE (DX) E PROSPETTO TECNICO (DX) DEL BIOTRITURATORE R335BK38ON-M CRUSHER NEGRI, DOTATO DI UN MOTORE KOHLER ECH980. 73

TABELLA 15. CASO ITA 1. BST-05 PRO: ANALISI DELLA BIOMASSA IN INPUT. 83

TABELLA 16. CASO ITA 1. BST-10: ANALISI DELLA BIOMASSA IN INPUT. 84

TABELLA 17. CASO BRA 3. 2XBST-10: ANALISI DELLA BIOMASSA IN INPUT. 87

TABELLA 18. CASO BRA 4. BST-30: ANALISI DELLA BIOMASSA IN INPUT 88

TABELLA 19. CASO ITA 1. BST-05 PRO: RIEPILOGO DEI COSTI CAPITALI. 91

TABELLA 20. CASO ITA 2. BST-10: RIEPILOGO DEI COSTI CAPITALI. 92

TABELLA 21. CASO BRA 3. 2XBST-10: RIEPILOGO DEI COSTI CAPITALI. 93

TABELLA 22. CASO BRA 4. BST-30: RIEPILOGO DEI COSTI CAPITALI. 94

TABELLA 23. CASO ITA 1. BST-05 PRO: RIEPILOGO DEI COGS ANNUALI. 100

TABELLA 24. CASO ITA 2. BST-10: RIEPILOGO DEI COGS ANNUALI. 101

TABELLA 25. CASO BRA 3. 2XBST-10: RIEPILOGO DEI COGS ANNUALI. 102

TABELLA 26. CASO BRA 4. BST-30: RIEPILOGO DEI COGS ANNUALI. 103

TABELLA 27. CASO ITA.1 BST-05 PRO: RIEPILOGO DEI COSTI OPERATIVI ANNUALI. 107

TABELLA 28. CASO ITA 2. BST-10: RIEPILOGO DEI COSTI OPERATIVI ANNUALI. 108

TABELLA 29. CASO BRA 3. 2XBST-10: RIEPILOGO DEI COSTI OPERATIVI ANNUALI. 109

TABELLA 30. CASO BRA 4. BST-30: RIEPILOGO DEI COSTI OPERATIVI ANNUALI. 110

TABELLA 31. CASO ITA 1. BST-05 PRO: GRAFICI RICAVI TOTALI VS. COSTI TOTALI PER OGNI SCENARIO DI PREZZO IN ESAME 114

TABELLA 32. CASO ITA 2. BST-10: GRAFICI RICAVI TOTALI VS. COSTI TOTALI PER OGNI SCENARIO DI PREZZO IN ESAME. 115

TABELLA 33. CASO BRA 3. 2XBST-10: GRAFICI RICAVI TOTALI VS. COSTI TOTALI PER OGNI SCENARIO DI PREZZO IN ESAME. 116

TABELLA 34. CASO BRA 4. BST-30: GRAFICI RICAVI TOTALI VS. COSTI TOTALI PER OGNI SCENARIO DI PREZZO IN ESAME. 117

TABELLA 35. CASO ITA 1. BST-05 PRO: RIEPILOGO DELLE PERFORMANCES FINANZIARIE (NPV, IRR E ROI) PER OGNI SCENARIO ANALIZZATO. 128

TABELLA 36. CASO ITA 1. BST-05 PRO: GRAFICO DELLE CURVE CUMULATE FDCFS PER OGNI SCENARIO ANALIZZATO. 130

TABELLA 37. CASO ITA 1. BST-05 PRO: GRAFICO NPV-IRR PER OGNI SCENARIO ANALIZZATO. 131

TABELLA 38. CASO ITA 2. BST-10: RIEPILOGO DELLE PERFORMANCES FINANZIARIE (NPV, IRR E ROI) PER OGNI SCENARIO ANALIZZATO. 132

TABELLA 39. CASO ITA 2. BST-10: GRAFICO DELLE CURVE CUMULATE FDCFS PER OGNI SCENARIO ANALIZZATO CHE SIA BASATO SUL MODELLO DI RICAVI "BIOCHAR ONLY". 134

TABELLA 40. CASO ITA 2. BST-10: GRAFICO DELLE CURVE CUMULATE FDCFS PER OGNI SCENARIO ANALIZZATO CHE SIA BASATO SUL MODELLO DI RICAVI "BY PRODUCTS". 135

TABELLA 41. CASO ITA 2. BST-10: GRAFICO NPV-IRR PER OGNI SCENARIO ANALIZZATO. 136

TABELLA 42. CASO ITA 2. BST-10: NPV SENSITIVITY ANALYSIS, VCU PRICE [$/VCU] – BIOCHAR PRICE [$/TON]. 137

TABELLA 43. CASO ITA 2. BST-10: NPV SENSITIVITY ANALYSIS, BIOMASS COST [$/TON] – BIOCHAR PRICE [$/TON]. 137

TABELLA 44. CASO BRA 3. 2XBST-10: RIEPILOGO DELLE PERFORMANCES FINANZIARIE (NPV, IRR E ROI) PER OGNI SCENARIO ANALIZZATO. 139

TABELLA 45. CASO BRA 3. 2XBST-10: GRAFICO DELLE CURVE CUMULATE FDCFS PER OGNI SCENARIO ANALIZZATO CHE SIA BASATO SUL MODELLO DI RICAVI "BIOCHAR ONLY". 141

TABELLA 46. CASO BRA 3. 2XBST-10: GRAFICO DELLE CURVE CUMULATE FDCFS PER OGNI SCENARIO ANALIZZATO CHE SIA BASATO SUL MODELLO DI RICAVI "BY PRODUCTS". 142

TABELLA 47. CASO BRA 3. 2XBST-10: GRAFICO NPV-IRR PER OGNI SCENARIO ANALIZZATO. 143

TABELLA 48. CASO BRA 4. BST-30: RIEPILOGO DELLE PERFORMANCES FINANZIARIE (NPV, IRR E ROI) PER OGNI SCENARIO ANALIZZATO. 144

TABELLA 49. CASO BRA 4. BST-30: GRAFICO DELLE CURVE CUMULATE FDCFS PER OGNI SCENARIO ANALIZZATO CHE SIA BASATO SUL MODELLO DI RICAVI "BIOCHAR ONLY". 146

TABELLA 50. CASO BRA 4. BST-10: GRAFICO DELLE CURVE CUMULATE FDCFS PER OGNI SCENARIO ANALIZZATO CHE SIA BASATO SUL MODELLO DI RICAVI "BY PRODUCTS". 147

TABELLA 51. CASO BRA 4. BST-30: GRAFICO NPV-IRR PER OGNI SCENARIO ANALIZZATO. 148

Bibliografia

[1] S. Sohi, E. Krull, E. Lopez-Capel e R. Bol, «A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil.,» *Advances in Agronomy,* pp. 47-82, 2010.

[2] J. Lehmann, M. C. Rilling, J. Thies, C. Masiello, W. Hockaday e D. Crowley, «Biochar effects on soil biota – A review,» *Soil Biology and Biochemistry, V. 43,* pp. 1812-1836, 2011.

[3] A. Tomczyk, P. Boguta e Z. Sokołowska , «Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects,» *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, V. 19,* p. 191–215, 2020.

[4] J. Lehmann e S. Joseph, Biochar for Environmental Management, Science and Technology, London: Routledge, 2009.

[5] D. Mohan, C. U. Pittman, Jr e P. H. Steele, «Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review,» *Energy & Fuels, V. 20,* pp. 848-889, 2006.

[6] F. Tinwala, P. Mohanty, S. Parmar, A. Patel e K. K. Pant, «Intermediate pyrolysis of agro-industrial biomasses in bench-scale pyrolyser: Product yields and its characterization,» *Bioresource Technology,* 2015.

[7] S. Pal, A. Kumar, A. K. Sharma, P. K. Ghodke e A. Patel, «Recent Advances in Catalytic Pyrolysis of Municipal Plastic Waste for the Production of Hydrocarbon Fuels,» *Environmental and Green Processes,* 2022.

[8] A. Romer, «Energia da Biomassa.,» *E-Periodica, V.4,* pp. 77-82, 2002.

[9] Golisano Institute for Sustainability | RIT. , «What is biochar and how is it made? (n.d.).,» 20 Gennaio 2021. [Online]. Available: https://www.rit.edu/sustainabilityinstitute/blog/what-biochar-and-how-it-made.. [Consultato il giorno 10 Gennaio 2023].

[10] A. Bridgwater, «Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading,» *Biomass and Bioenergy, V.38,* pp. 68-94, 2012.

[11] A. Sharma, V. Pareek e D. Zhang, «Biomass pyrolysis—A review of modelling, process parameters,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews, V.50,* pp. 1081-1096, 2015.

[12] P. Yaashikaa, P. S. Kumar, S. Varjani e A. Saravanan, «A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy,» *Biotechnology Reports, V.28,* 2020.

[13] J. W. Gabhane, V. P. Bhange, P. D. Patil, S. T. Bankar e S. Kumar, «Recent trends in biochar production methods and its application as a soil health conditioner: a review,» *SN Applied Sciences, V.2,* 2020.

[14] F. Campuzano, «Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews, V.102,* pp. 372-409, 2019.

[15] S. D. Gryze, M. Cullen e L. Durschinger, «Evaluation of the Opportunities for Generating Carbon

Offsets from Soil Sequestration of Biochar,» Terra Global Capital, San Francisco, CA, 2010.

[16] C. Doulgeris, Z. Kypritidou, V. Kinigopoulou e E. Hatzigiannakis, «Simulation of Potassium Availability in the Application of Biochar in Agricultural Soil,» *Agronomy, V.13(3),* 2023.

[17] K. Draper e T. Tomlinson, «The Potential for Biochar to Deliver Greater Sustainability for Coffee Cultivation and Processing: A White Paper,» Ithaka Institute and International Biochar Initiative, 2015.

[18] O. K. Lee, H. V. Ly, E. Y. Lee e T. K. Vo, «Pyrolysis characteristics and kinetics of microalgal Aurantiochytrium sp. KRS101,» *Proceedings of the ICE - Energy, V.118,* pp. 369-376, 2017.

[19] E. Cárdenas-Aguiar, J. Paz-Ferreiro, G. Gascó e A. Méndez, «Thermogravimetric analysis and carbon stability of chars produced from slow pyrolysis and hydrothermal carbonization of manure waste,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, V.140(5),* 2019.

[20] M. Asadullah, M. Rahman, M. Ali, M. Rahman e M. Motin, «Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse,» *Fuel 86 ,* p. 2514–2520, 2007.

[21] B. Chen, D. Zhou e L. Zhu, «Transitional adsorption and partition on nonpolarand polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with differentpyrolytic temperatures.,» *Environ. Sci. Technol., V.42,* p. 5137–5143, 2008.

[22] K. Jindo, H. Mizumoto, Y. Sawada, M. A. Sanchez-Monedero e T. Sonoki, «Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues,» *Biogeosciences, V.11(23),* p. 6613–6621, 2014.

[23] A. Mukherjee, A. Zimmerman e W. Harris, «Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars,» *Geoderma, V.163,* pp. 247-255, 2011.

[24] P. R. Bonelli, M. E. F. G. Nunell, E. L. Buonomo e L. Cukierman, «The Potential Applications of the Bio-char Derived from the Pyrolysis of an Agro-industrial Waste. Effects of Temperature and Acid-pretreatment,» *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, V.34,* pp. 746-755, 2012.

[25] B. Chen e Z. Chen, «Sorption of naphthalene and 1-naphthol by biochars of orange peels with different pyrolytic temperatures,» *Chemosphere, V.76(1),* pp. 127-133, 2009.

[26] X. Chen, G. Chen, L. Chen, Y. Chen, J. Lehmann, M. B. McBride e A. G. Hay, «Adsorption of copper and zinc by biochars produced from pyrolysis of hardwood and corn straw in aqueous solution,» *Bioresource Technology, V.102(19),* pp. 8877-8884, 2011.

[27] W. A. W. A. K. Ghani, A. Mohd, G. d. Silva, R. T. Bachmann, Y. H. Taufiq-Yap, U. Rashid e A. H. Al-Muhtaseb, «Biochar production from waste rubber-wood-sawdust and its potential use in C sequestration: Chemical and physical characterization,» *Industrial Crops and Products, V.44,* pp. 18-24, 2013.

[28] S. Katyal, K. Thambimuthu e M. Valix, «Carbonisation of bagasse in a fixed bed reactor: influence of process variables on char yield and characteristics,» *Renewable Energy, V.28,* p. 713–725, 2003.

[29] A. Shaaban, S.-M. Se, M. Dimin, J. M. Juoi, M. H. M. Husin e N. M. M. Mitan, «Influence of heating temperature and holding time on biochars derived from rubber wood sawdust via slow pyrolysis,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, V.107,* pp. 31-39, 2014.

[30] M. Uchimiya, L. H. Wartelle, K. T. Klasson, C. A. Fortier e I. M. Lima, «Influence of Pyrolysis Temperature on Biochar Property and Function as a Heavy Metal Sorbent in Soil,» *J. Agric. Food Chem., V.59(6) ,* p. 2501–2510, 2011.

[31] M. Ahmad, S. S. Lee, S. E. Lee, M. I. Al-Wabel, D. C. W. Tsang e Y. S. Ok, «Biochar-induced changes in soil properties affected immobilization/mobilization of metals/metalloids in contaminated soils,» *Biochar for a Sustainable Environment,* 2016.

[32] R. T. B. Muhammad Khalid Rafiq, M. T. Rafiq, Z. Shang, S. Joseph e R. Long, «Influence of Pyrolysis Temperature on Physico-Chemical Properties of Corn Stover (Zea mays L.) Biochar and Feasibility for Carbon Capture and Energy Balance,» *https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156894,* 2016.

[33] X. Cao e W. Harris, «Properties of Dairy-Manure-Derived Biochar Pertinent to Its Potential Use in Remediation,» *Bioresource Technology, V.101,* pp. 5222-5228., 2010.

[34] Y. Chen, X. Zhang, W. Chen, H. Yang e H. Chen, «The structure evolution of biochar from biomass pyrolysis and its correlation with gas pollutant adsorption performance,» *Bioresource Technology, V.246,* pp. 101-109, 2017.

[35] L'Associazione Italiana Biochar ICHAR, «IL BIOCHAR: UNA SOLUZIONE PER L'AGRICOLTURA, IL CLIMA E L'ENERGIA,» 2021. [Online]. Available: https://ichar.org/. [Consultato il giorno 12 01 2023].

[36] A. Shariff, S. Aziz, N. S. I. Ruzali e N. M. Saleh, «The Effect of Feedstock Type and Slow Pyrolysis Temperature on Biochar Yield from Coconut Wastes,» *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering, V.10,* 2016.

[37] A. Demirbas, «Combustion characteristics of different biomass fuels,» *Progress in Energy and Combustion Science, V.30(2),* pp. 219-230, 2004.

[38] M. Tripathi, J. Sahu e P. Ganesan, «Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews, V.55,* pp. 467-481, 2016.

[39] M. Keiluweit, P. S. Nico, M. G. Johnson e M. Kleber, «Dynamic Molecular Structure of Plant Biomass-Derived Black Carbon (Biochar),» *Environ. Sci. Technol., V.44(4) ,* p. 1247–1253, 2010.

[40] J. S. Lupoi e E. A. Smith, «Characterization of Woody and Herbaceous Biomasses Lignin Composition with 1064 nm Dispersive Multichannel Raman Spectroscopy,» *Applied Spectroscopy, V.66(8),* pp. 903-910, 2012.

[41] J. Lehmann e S. Joseph, Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation., Taylor & Francis., 2015.

[42] T. A e C. F., «Potentials, Limitations, Co-Benefits, and Trade-Offs of Biochar Applications to Soils for Climate Change Mitigation. Land.,» *Land, V.8(12),* p. 179, 2019.

[43] S. Jeffery, F. Verheijen, M. v. d. Velde e A. Bastos, «A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis,» *Agriculture, Ecosystems & Environment, V.144(1),* pp. 175-187, 2011.

[44] P. Winsley, «Biochar and bioenergy production for climate change mitigation,» *New Zealand Science Review, V.64,* 2007.

[45] J. Maroušek, M. Vochozka, J. Plachý e J. Žák, «Glory and misery of biochar,» *Clean Technologies and Environmental Policy, V.19,* p. 311–317, 2017.

[46] J. D. Toth e Z. Dou, «Use and Impact of Biochar and Charcoal in Animal Production Systems,» *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers, V.63,* 2015.

[47] H.-P. Schmidt, P. Conte e G. Cimò, «Research and Application of Biochar in Europe,» *SSSA Special Publication,* pp. 409-422, 2015.

[48] Z. Laili, M. S. Yasir, M. A. Wahab, N. A. Mahmud e N. Z. Abidin, «Evaluation of the Compressive Strenght of Cement-Spent Resins Matrix Mixed with Biochar,» *Malaysian Journal of Analytical Sciences, V.19(3),* pp. 565 - 573, 2015.

[49] T. Huggins, H. Wang, J. Kearns, P. Jenkins e Z. J. Ren, «Biochar as a sustainable electrode material for electricity production in microbial fuel cells,» *Bioresource Technology V.157,* pp. 114-119, 2014.

[50] K. Draper, « the Biochar Journal,» 2016. [Online]. Available: https://www.biochar-journal.org/en/ct/85.. [Consultato il giorno 20 12 2022].

[51] A. Tagliaferro, C. Rosso e M. Giorcelli, Biochar. Emerging applications., Torino: IOP Publishing (Bristol, UK), 2020.

[52] S. K. Thengane, K. Kung, J. Hunt, H. R. Gilani, C. J. Lim, S. Sokhansanj e D. L. Sanchez, «Market prospects for biochar production and application in California,» *Biofuels, Bioprod. Bioref.,* 2021.

[53] Y. Li, S. Jiang, T. Wang, Y. Lin e H. Mao, «Research on biochar via a comprehensive scientometric approach,» *RSC Adv., V.8(50),* p. 28700–28709, 2018.

[54] European Biochar Industry (EBI), «European Biochar Market Report 2022/2023,» 2023.

[55] H. P., Drawdown: The most Comprehensive Plan Ever Proposed to Reverse Global Warming, New York: Penguin Books, 2017.

[56] International Biochar Initiative (IBI), «State of the Biochar Industry 2014 A Survey of Commercial Activity in the Biochar Sector,» 2014.

[57] A. Banzaert, «Viability of Waste-based Cooking Fuels for Developing Countries: Combustion Emissions and Field Feasibility,» Massachusetts Institute of Technology, 2014.

[58] Fortune Business Insight, «Biochar Market Size, Share, and COVID-19 Impact Analysis By Technology (Pyrolysis and Gasification), By Application (Farming, Livestock, Power Generation, and Others), and Regional Forecast, 2021-2028,» 2022.

[59] E. Rogers, «Diffusion of Innovations.,» Free Press, New York, 1983.

[60] K. Olori, «The Top 20 Reasons Startups Fail.,» *CB Insights,* pp. 1-9, 2019.

[61] M. Fuchs, G.-P. Manuel e D. Sjoding, «Biochar: Background & Early Steps to Market Development,» *Biochar: Background & Early Steps to Market Development,* pp. 1-21, 2012.

[62] K. Sahoo, E. (. Bilek, R. Bergman e S. Mani, «Techno-economic analysis of producing solid biofuels and biochar from forest residues using portable systems,» Elsevier, 2018.

[63] P. Young e J. Lawrence, «Biochar Market Profile Report,» Worcester Polytechnic Institute, 2019.

[64] International Biochar Initiative (IBI), «State of the Biochar Industry 2015,» 2015.

[65] B. A. Belmontea, M. F. D. Benjaminb e R. R. Tana, «Bi-objective Optimization of Biochar-based Carbon Management Networks,» Elsevier, 2018.

[66] J. Dumortier, H. Dokoohaki, A. Elobeid, D. J. Hayes, D. Laird e F. E. Miguez, «Global land-use and carbon emission implications from biochar application to cropland in the United States,» *Journal of Cleaner Production, V.258,* 2020.

[67] S. Li, C. Y. Chan, M. Sharbatmaleki, H. Trejo e S. Delagah, «Engineered Biochar Production and Its Potential Benefits in a Closed-Loop Water-Reuse Agriculture System,» *Water, V.12(10),* p. 2847, 2020.

[68] H. Etter, A. Vera, C. Aggarwal, M. Delaney e S. Manley, «Methodology for Biochar Utilization In Soil and Non-Soil Applications,» Verra, 2022.

[69] J. Zhang e C. Wang, «Co-Benefits and Additionality of the Clean Development Mechanism: An Empirical Analysis,» School of International Relations & Pacific Studies, University of California, Department of Environmental Science & Engineering, Tsinghua University, 2011.

[70] B. Zhang, K.-h. Lai, B. Wang e Z. Wang, «Shareholder value effects of corporate carbon trading: Empirical evidence from market reaction towards Clean Development Mechanism in China,» *Energy Policy, V.110,* pp. 410-421, 2017.

[71] M. Cames, R. O. Harthan, J. Füssler, M. Lazarus, C. M. Lee, P. Erickson e R. Spalding-Fecher, «How additional is the Clean Development Mechanism? Analysis of the application of current tools and proposed alternatives,» Stockholm Environment Institute (SEI), Stockholm, 2016.

[72] A. Michaelowa, L. Hermwille, W. Obergassel e S. Butzengeiger, «Additionality revisited: guarding the integrity of market mechanisms under the Paris Agreement,» *Climate Policy, V.19(10),* pp. 1211-1224, 2019.

[73] A. Gross, «Financial Times,» 19 09 2020. [Online]. Available: https://www.ft.com/content/e946e3bd-99ac-49a8-82c9-e372a510e87c. [Consultato il giorno 19 02 2023].

[74] S. Donofrio, P. Maguire, K. Myers, C. Daley e K. Lin, «State of the Voluntary Carbon Markets 2021,» Forest Trend, 2021.

[75] L. Moosmann, A. Siemons, F. Fallasch, L. Schneider, C. Urruntia, N. Wissner, R. Mendevitch, H. Hermann, S. Healy, D. Oppelt e S. Heinemann, «The COP27 Climate Change Conference. Status of climate negotiations and issues at stake,» Policy Department for Economic, Scientific and

Quality of Life Policies, European Parliament's Committee on the Environment, Public, 2022.

[76] P. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. A. Khourdajie, R. v. Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz e (. J. Malley, «IPCC, 2022: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,» Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, 2022.

[77] G. Dufrasne, «FAQ: Deciphering Article 6 of the Paris Agreement,» Carbon Market Watch, 10 12 2021. [Online]. Available: https://carbonmarketwatch.org/2021/12/10/faq-deciphering-article-6-of-the-paris-agreement/. [Consultato il giorno 2023 02 02].

[78] M. Townsend, G. v. Thuyne, G. Minards e C. Udy, «Global carbon markets - slow progress made at COP27,» Allen & Overy, 23 11 2022. [Online]. Available: https://www.allenovery.com/en-gb/global/blogs/countdown-to-cop/global-carbon-markets-slow-progress-made-at-cop27. [Consultato il giorno 30 01 2023].

[79] G. Turner e M. Maslin, «Future carbon credit demand, supply and prices,» Trove Research, 2020.

[80] C. Hodgson, «Rush for carbon credits spurs surge in power company schemes.,» *Financial Times,* 17 04 2021.

[81] W. Person, «An inside look at pricing in the forest carbon market,» GreenBiz Group Inc., 21 03 2021. [Online]. Available: https://www.greenbiz.com/article/inside-look-pricing-forest-carbon-market. [Consultato il giorno 03 03 2023].

[82] GivingGreen.Earth, «Biochar & Bio-oil,» 01 2023. [Online]. Available: https://www.givinggreen.earth/carbon-offsets-research/biochar-%26-bio-oil. [Consultato il giorno 2023 02 14].

[83] M. E. Filmanovic, «Carbon credits prices in the voluntary carbon market,» Abatable, 22 09 2022. [Online]. Available: https://www.abatable.com/blog/carbon-credits-pricing. [Consultato il giorno 15 02 2023].

[84] S. D. Gryze, M. Cullen e L. Durschinger, «Evaluation of the Opportunities for Generating Carbon Offsets from Soil Sequestration of Biochar,» Terra Global Capital , San Francisco, CA, 2010.

Ringraziamenti

Al termine di questo elaborato, mi è d'obbligo ringraziare tutte le persone che mi hanno sostenuto durante il mio percorso universitario e di scrittura della tesi che avete appena letto.

Innanzitutto, un grande ringraziamento al mio relatore Prof. Carlo Cambini che per me è e rimarrà un esempio a cui tendere. Grazie di cuore per tutti quei suggerimenti, per tutte le preziose indicazioni e il sostengo che mi ha dimostrato in questi mesi. In secondo luogo, vorrei porre l'accento sul prezioso supporto fornito dal mio correlatore Ing. Flavio Pino durante lo sviluppo di questo progetto. Sono sicuro che diventerà un ottimo professore e fortunati tutti quegli studenti che potranno avere lui come docente. Grazie a voi ho accresciuto le mie conoscenze, le mie competenze e anche la mia consapevolezza.

Ringrazio con particolare affetto tutte le persone che mi hanno sostenuto in questo viaggio, dai famigliari agli amici più stretti, Efe, Kief, Emidio, Vinz, Giaqui e Cipo. Grazie anche a Benedetta per tutta la solidarietà dimostrata. Senza tutti voi sarebbe sicuramente stato un viaggio come tanti altri.

Infine, dedico questo lavoro a cui ho rivolto profondo impegno e passione all'Associazione Culturale Comala, al suo staff e a tutti quei collaboratori per l'enorme contributo sociale fin qui elargito ad una città la cui direzione politica spesso ha dimostrato di non meritarvi. Senza di voi, decine di associazione e centinaia di studenti, come me, non potrebbero ritenerla casa. Siete stati fondamentali. Grazie di tutto.