



TIPO DI OPERAZIONE

16.1.01 - Gruppi operativi del partenariato europeo per la produttività e la sostenibilità dell'agricoltura

DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA REGIONALE N. 1098 DEL 01/07/2019

FOCUS AREA x 2A 4B

RELAZIONE TECNICA INTERMEDIA X FINALE

DOMANDA DI SOSTEGNO n. 5150341

DOMANDA DI PAGAMENTO n. 5702181

Titolo Piano	Applicazioni multiuso per rilanciare la filiera della canapa
Ragione sociale del proponente (soggetto mandatario)	CONSORZIO INTERPROVINCIALE COOPERATIVE AGRICOLE BOLOGNA in breve C.I.C.A. BOLOGNA
Partner del GO	UNIVERSITÀ CATTOLICA DEL SACRO CUORE CONSIGLIO PER LA RICERCA IN AGRICOLTURA E L'ANALISI DELL'ECONOMIA AGRARIA (CREA) IRECOOP EMILIA ROMAGNA SOCIETÀ COOPERATIVA BERGONZINI SANDRO SOCIETA' AGRICOLA SUCCI DI SUCCI MATTIA & C. - SOCIETA' SEMPLICE

Durata originariamente prevista del progetto (in mesi)	30
Data inizio attività	19/11/2019
Data termine attività (incluse eventuali proroghe già concesse)	25/01/2023

Relazione relativa al periodo di attività dal	19/11/2019	Al 27/10/2023
Data rilascio relazione	22/12/2023	

Autore della relazione	Maria Paone		
telefono		email	m.paone@cicabo.it
pec			

Sommario

1 - DESCRIZIONE DELLO STATO DI AVANZAMENTO DEL PIANO.....	3
1.1 STATO DI AVANZAMENTO DELLE AZIONI PREVISTE NEL PIANO.....	3
2 - DESCRIZIONE PER SINGOLA AZIONE.....	3
2.1 ATTIVITÀ E RISULTATI	3
2.2 PERSONALE.....	4
2.3 TRASFERTE.....	4
2.4 MATERIALE CONSUMABILE	4
2.5 SPESE PER MATERIALE DUREVOLE E ATTREZZATURE.....	5
2.6 MATERIALI E LAVORAZIONI DIRETTAMENTE IMPUTABILI ALLA REALIZZAZIONE DEI PROTOTIPI 5	
2.7 COLLABORAZIONI, CONSULENZE, ALTRI SERVIZI.....	5
2.8 SPESE PER ATTIVITÀ DI DIVULGAZIONE E DISSEMINAZIONE	6
2.9 SPESE PER ATTIVITÀ DI FORMAZIONE E CONSULENZA	6
3 - CRITICITÀ INCONTRATE DURANTE LA REALIZZAZIONE DELL'ATTIVITÀ.....	6
4 - ALTRE INFORMAZIONI.....	7
5 - CONSIDERAZIONI FINALI	7
6 - RELAZIONE TECNICA.....	7

1 - DESCRIZIONE DELLO STATO DI AVANZAMENTO DEL PIANO

Descrivere brevemente il quadro di insieme relativo alla realizzazione del piano.

Il piano è stato realizzato nella sua interezza. Sono state svolte e terminate tutte le azioni realizzative, sostenute dalle attività di studi e cooperazione. Sono state effettuate le attività di formazione.
Sono altresì state effettuate le azioni di divulgazione previste, queste continueranno ad avere il loro effetto nel tempo a seguire.

1.1 STATO DI AVANZAMENTO DELLE AZIONI PREVISTE NEL PIANO

Azione	Unità aziendale responsabile	Tipologia attività	Mese inizio attività previsto	Mese inizio attività effettivo	Mese termine attività previsto	Mese termine attività effettivo
Organizzazione – Esercizio della Cooperazione	CICA - UCSC	Coordinamento	11/2019	11/2019	10/2022	10/2023
Studi necessari alla realizzazione del Piano	CICA	Analisi organizzativa	11/2019	11/2019	10/2020	12/2020
Azione 1	CICA - UCSC	Azione realizzativa	11/2019	11/2019	06/2020	10/2023
Azione 2	CICA - CREA	Azione realizzativa	01/2020	01/2020	03/2022	10/2023
Azione 3	CICA - UCSC	Azione realizzativa	01/2020	12/2019	03/2022	10/2023
Azione 4	CICA - UCSC	Azione realizzativa	04/2020	04/2020	03/2022	10/2023
Formazione	IRECOOP	Formazione	10/2020	10/2022	03/2022	10/2023
Divulgazione	CICA - UCSC	Divulgazione	07/2020	07/2021	03/2022	10/2023

2 - DESCRIZIONE PER SINGOLA AZIONE

Compilare una scheda per ciascuna azione

2.1 ATTIVITÀ E RISULTATI

Azione	Organizzazione – Esercizio della Cooperazione
Unità aziendale responsabile	CICA Bologna

Descrizione delle attività	<p>Lo scopo di tale attività era la gestione dello svolgimento del progetto e della corretta rendicontazione dell'attività tecnico/scientifica, il monitoraggio dei risultati attesi e ottenuti, la programmazione delle attività e di eventuali cambiamenti da apportare a parti del progetto, la definizione delle azioni conseguenti.</p> <p>È stata gestita l'organizzazione delle riunioni:</p> <ul style="list-style-type: none"> • kick-off meeting per l'analisi della concessione di contributo da parte della Regione Emilia Romagna; • altre 7 riunioni plenarie • riunione di medio termine per la verifica dello stato di avanzamento degli indicatori e delle spese connesse al progetto. <p>Sono stati realizzati:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ i controlli riguardanti la corretta realizzazione del progetto nel suo complesso, in funzione del mantenimento dei requisiti di accesso, delle priorità assegnate, del controllo del pannello degli indicatori delle singole azioni per il raggiungimento degli obiettivi finali. ○ supporto al controllo della corretta documentazione delle azioni, sia al fine della efficace comunicazione tra le parti, che della produzione della documentazione delle attività per come prevista nei termini indicati dalla RER, al fine di consentire la preparazione ed inoltro della domanda di liquidazione. ○ la gestione della raccolta della documentazione necessaria alla redazione di una eloquente divulgazione il tutto secondo le seguenti modalità: <ul style="list-style-type: none"> ✓ l'indicazione al BENEFICIARIO e al FORNITORE/ORGANISMO DI RICERCA dei documenti tecnici necessari o utili alla redazione della comunicazione/divulgazione; ✓ cura delle comunicazioni tra il BENEFICIARIO e il FORNITORE/ORGANISMO DI RICERCA per le attività di divulgazione, fornendo dettagli sui contenuti e sugli aspetti formali della documentazione da approntare; ✓ mantenimento dell'aggiornamento del BENEFICIARIO e del FORNITORE/ORGANISMO DI RICERCA sugli sviluppi delle attività di divulgazione e sulle eventuali ulteriori integrazioni necessarie; ✓ indicazione al BENEFICIARIO e al FORNITORE/ORGANISMO DI RICERCA dell'elenco dei documenti amministrativi e tecnici necessari o utili alla redazione dei documenti finali di progetto; ○ cura delle comunicazioni tra il BENEFICIARIO e il FORNITORE/ORGANISMO DI RICERCA e la Regione Emilia Romagna, fornendo dettagli sugli aspetti formali della documentazione da approntare. ○ cura della raccolta dei documenti e delle informazioni necessarie alla redazione delle relazioni di chiusura del progetto. ○ mantenimento del BENEFICIARIO e del FORNITORE/ORGANISMO DI RICERCA aggiornati sugli sviluppi della predisposizione della documentazione di chiusura e sulle eventuali ulteriori integrazioni richieste.
----------------------------	---

	cura dei rapporti con l'Ente Pubblico nella gestione del progetto, mantenendo informati il BENEFICIARIO e il FORNITORE/ORGANISMO DI RICERCA delle comunicazioni intercorse, sia nel corso delle riunioni calendarizzate che con tempestive comunicazioni in caso di necessità.
Grado di raggiungimento degli obiettivi, scostamenti rispetto al piano di lavoro, criticità evidenziate.	L'obiettivo della gestione e controllo del progetto è stato raggiunto. Si rileva l'inserimento di una nuova figura interna, ad ulteriore supporto delle attività

2.2 PERSONALE

Elencare il personale impegnato, il cui costo è portato a rendiconto, descrivendo sinteticamente l'attività svolta. Non includere le consulenze specialistiche, che devono essere descritte a parte.

Cognome e nome	Mansione/ qualifica	Attività svolta nell'azione	Costo orario	Ore	Costo totale
	Impiegato liv. basso	Coordinamento	27,00 €	140	3.780,00
	Impiegato liv. basso	Coordinamento	27,00 €	45	1.215,00
	Impiegato liv. basso	Supporto	27,00 €	0	0,00
	Prof. Associato	Coordinamento	48,00 €	130	6.240
Totale:					11.235,00

2.3 ATTIVITÀ E RISULTATI

Azione	Studi necessari alla realizzazione del Piano
Unità aziendale responsabile	CICA
Descrizione delle attività	<p>Verifica della filiera coinvolta e delle relative interazioni, per un'ottimizzazione delle stesse.</p> <p>Per l'attuazione dell'attività, sono stati analizzati gli assetti organizzativi dei partner coinvolti, nonché delle altre aziende potenzialmente interessate (Cooperative aderenti al CICA).</p> <p>Sono state identificate le corrette metodologie di gestione della comunicazione e delle interazioni con i soggetti coinvolti per la parte agricola.</p> <p>Sono stati forniti i modelli per la corretta compilazione ed il corretto flusso dei documenti afferenti il progetto.</p>

Grado di raggiungimento degli obiettivi, scostamenti rispetto al piano di lavoro, criticità evidenziate	L'obiettivo è stato pienamente raggiunto
---	--

2.4 PERSONALE

Elencare il personale impegnato, il cui costo è portato a rendiconto, descrivendo sinteticamente l'attività svolta. Non includere le consulenze specialistiche, che devono essere descritte a parte.

Cognome e nome	Mansione/ qualifica	Attività svolta nell'azione	Costo orario	Ore	Costo totale
	Impiegato liv. basso	Coordinamento	27,00 €	76	2.052,00
	Impiegato liv. basso	Coordinamento	27,00 €	1	27,00
	Impiegato liv. basso		27,00 €	0	0,00
Totale:					2.079,00

2.5 ATTIVITÀ E RISULTATI

Azione	<u>Azione 1: Valutazione di procedure di coltivazione per l'ottenimento di prodotti derivati dalla canapa</u>
Unità aziendale responsabile	CICA – UCSC – Bergonzini - Succi
Descrizione delle attività	<p>In questa azione sono state realizzate coltivazioni sperimentali di canapa per individuare la combinazione ottimale di scelte agronomiche, per permettere la realizzazione di prove di meccanizzazione della raccolta (Azione 2) e per produrre gli steli necessari ad alimentare la successiva fase di prima trasformazione (Azione 3). Durante le prove di campo sono stati raccolti i dati necessari per la realizzazione di un modello di simulazione dell'essiccamento degli steli in campo, e per la realizzazione di un Life Cycle Assesment (LCA – Azione 4) e di un'analisi costi-ricavi della coltivazione.</p> <p>Le aziende agricole coinvolte nel progetto hanno coltivato la canapa a scala di pieno campo per dimostrare l'effetto dei principali fattori agronomici (scelta del genotipo, densità di semina ed epoca di raccolta) sulla produttività della coltura (steli, semi e infiorescenze), sul bilancio economico e sull'impatto ambientale della coltivazione. I campi</p>

	<p>sperimentali sono poi stati oggetto di prove di meccanizzazione della raccolta, descritte nel successivo capitolo (Azione 2).</p> <p>Una specifica coltivazione è stata implementata da UCSC presso l'azienda sperimentale CERZOO.</p> <p>La definizione dei livelli dei fattori agronomici a confronto, la scelta del genotipo, i livelli di concimazione, l'epoca di raccolta e l'organizzazione della prova sperimentale sono stati coordinati dall'UCSC. UCSC si ha provveduto alla raccolta ed elaborazione dei dati di campo. UCSC, utilizzando coltivazioni realizzate presso la propria struttura di riferimento CERZOO, ha poi studiato i tempi di essiccamento in campo degli steli dopo la raccolta. Lo studio ha permesso la calibrazione di un modello per simulare l'essiccamento degli steli di canapa in funzione delle principali variabili ambientali sulla base di un modello già sviluppato per il sorgo da biomassa. Il modello DSS è stato poi validato utilizzando i dati di essiccamento in campo raccolti nelle aziende coinvolte nel progetto.</p> <p>Il modello di essiccazione degli steli è stato combinato con il modello che simula la resa della canapa, realizzato nell'ambito del progetto MultiHemp, entrambi validati con i dati raccolti nelle sperimentazioni. Dopo la validazione, i modelli sono stati utilizzati per fare delle analisi di scenario, modificando date di semina e raccolta e utilizzando genotipi con diverse precocità, per simulare i tempi di raccolta ed essiccamento in campo e quindi valutare la probabilità che una combinazione di scelte tecniche permetta di ottenere una data produzione di steli essiccati in campo ed imballati. Questa analisi ha permesso di individuare le scelte operative più efficaci per produrre la biomassa necessaria ad alimentare un impianto di prima trasformazione. La combinazione dei modelli costituirà un importante strumento di gestione che il CICA utilizzerà, in seguito alla realizzazione del progetto, per l'organizzazione della filiera canapa industriale in Emilia Romagna.</p>
<p>Grado di raggiungimento degli obiettivi, scostamenti rispetto al piano di lavoro, criticità evidenziate</p>	<p><i>descrivere in che misura sono stati raggiunti gli obiettivi previsti, giustificando eventuali scostamenti dal progetto originario. Analizzare eventuali criticità tecnico- scientifiche emerse durante l'attività</i></p> <p>Indicatori, prodotti e monitoraggio:</p>

La misurazione dei risultati di questa azione ha permesso di rilevare tutti i dati utili alla creazione del modello codificato in un DSS.
L'obiettivo è pienamente raggiunto.

2.6 PERSONALE

Elencare il personale impegnato, il cui costo è portato a rendiconto, descrivendo sinteticamente l'attività svolta. Non includere le consulenze specialistiche, che devono essere descritte a parte.

Cognome e nome	Mansione/ qualifica	Attività svolta nell'azione	Costo orario	Ore	Costo totale
	Impiegato liv. basso	Coordinamento	27,00 €	76	2.052,00
	Impiegato liv. basso	Coordinamento	27,00 €	98	2.646,00
	Impiegato liv. basso	Supporto	27,00 €	1	27,00
	Professore Associato	Coordinamento	48,00 €	180	8.640,00
	Ricercatore	Supporto	31,00 €	300	9.300,00
	Ricercatore	Supporto	31,00 €	415	12.865,00
	Imprenditore Agricolo	Operazioni colturali	19,50, €	94	1.833,00
	Imprenditore Agricolo	Operazioni colturali	19,50, €	94	1.833,00
Totale:					39.196,00 €

XXXXX

2.7 ATTIVITÀ E RISULTATI

Azione	<u>Azione 2: Valutazione di attrezzature e dotazioni specifiche per la meccanizzazione della canapa</u>
Unità aziendale responsabile	CICA – CREA – Bergonzini - Succi
Descrizione delle attività	L'attività si è svolta presso coltivazione a pieno campo su due varietà ritenute più idonee da esperienze progettuali precedenti sia di UCSC sia di CREA, per ottenere le migliori produzione potenziali per tipologia di prodotto (semi, fibra+canapulo). Le prove di raccolta hanno previsto il monitoraggio della scalarità di maturazione fra varietà e tipologia di prodotti ottenibili. La varietà sono anche state monitorate manualmente per ottenere i dati di produzione teorica ed effettiva per analisi successive. Tale attività è stata condotta anche su aree test sperimentali con interventi manuali, volte alla definizione dei migliori parametri di lavoro per la

specifica meccanizzazione. Per la valutazione di diverse cantieristiche o allestimenti delle macchine da raccolta sono stati effettuati test varietali mirati su apposite tesi volte alla valutazione delle diverse frazioni per la scelta di eventuali priorità di raccolta nell'ambito delle diverse varietà.

Per quanto riguarda la fibra sono stati eseguiti test relativi a differenti lunghezze di taglio partendo dallo stelo intero e sezioni di varia lunghezza concordate con gli altri partner di progetto. Per la fibra sono state utilizzate macchine commerciali e prototipali compatibili alle disponibilità aziendali per non vincolarsi a specificità poco sostenibili sul piano economico. Delle diverse varietà sono stati rilevati i dati colturali e pedoclimatici per definire i tempi di essiccamento in campo degli steli fino al raggiungimento dell'umidità idonea alla successiva trasformazione valutando la possibilità di formazione delle balle che successivamente saranno utilizzate per l'estrazione della fibra e del canapulo in un impianto innovativo. Anche in questo caso la valutazione delle soluzioni meccanizzate sono state confrontate con percorsi alternativi per una miglior integrazione delle tecniche colturali con le specifiche richieste dai trasformatori ai prodotti ottenuti.

Per ogni ciclo di raccolta sono stati valutati il numero di interventi e cantieri necessari per conferire il prodotto all'impianto di trasformazione (seme/fibra) secondo specifiche esigenze di post raccolta.

Di ogni cantiere utilizzato per i diversi prodotti sono stati valutati ed identificati i settaggi ottimali al fine di definire le modalità e i tempi di raccolta per ottimizzare la resa in funzione della specifica produzione (seme, fibra a diverse lunghezze, CBD), quest'ultimo relativamente solo ai sottoprodotti di trebbiatura.

Per le diverse frazioni di fibra, di semi e di sottoprodotti saranno poi valutati gli interventi successivi per mantenere inalterate le qualità richieste ed in particolare lunghezza, pulizia ed essiccazione semente ed essiccazione/selezione sottoprodotti con salvaguardia degli specifici aspetti (es. germinabilità semi da riproduzione). Delle diverse frazioni potranno essere valutate diverse tipologie di impianti di essiccazione soprattutto sperimentali ed in grado di operare a diversi valori di temperatura ed umidità atmosferica.

Relativamente alle diverse frazioni di prodotto saranno caratterizzate le necessità di post-trattamento mediante prove di essiccamento delle sezioni di stelo (naturale/artificiale), dei semi e degli scarti di trebbiatura per massimizzare la qualità della fibra, di olio e proteine del seme e il contenuto in CBD estraibile. .

I dati raccolti saranno utilizzati dai partner di progetto per elaborare un sistema di supporto alle decisioni che permetta di caratterizzare per varietà le migliori strategie gestionali fino alla raccolta relative alle diverse frazioni di prodotto (pianta, aspetti dimensionali, scalarità, ecc.) in grado di definire le strategie di raccolta e i cantieri di lavoro in funzione di specifici ambienti pedoclimatici, in modo di fornire uno strumento per pianificare le coltivazioni di canapa su larga scala anche in funzione dei fabbisogni dell'impianto industriale di trasformazione a regime.

Una particolare attenzione sarà dedicata alla valutazione di scelte che migliorino le condizioni di lavoro e la salute degli addetti.

Le operazioni di raccolta delle diverse frazioni di stelo di canapa possono avere importanti ripercussioni sul piano della sicurezza soprattutto relativamente alle operazioni di sfalcio, sezionamento, rivoltamento, andatura e imballatura secondo la tipologia di cantieristica utilizzata. Soprattutto nello sfalcio della pianta intera oltre al taglio occorre valutare la movimentazione della biomassa che dovesse rendersi necessaria. Anche in caso di ingolfamenti dei diversi cantieri sia di altri inconvenienti (es. riposizionamento per definizione andane) potrebbero essere richiesti apporti importanti di lavoro ricadendo nei rischi legati alla movimentazione manuale dei carichi, impigliamento, schiacciamento. Le piante di canapa intere superando i due metri di lunghezza rendono la movimentazione non automatizzata operazione piuttosto complessa e faticosa se non limitata a ridotti periodi di tempo. La meccanizzazione della raccolta della pianta della canapa comunque caratterizzata da elevati volumi di biomassa può sotto questo punto di vista influire direttamente sui rischi legati alla raccolta e movimentazione. In questo contesto ad esempio le sezioni di stelo da 1,2 metri che saranno valutate nel progetto potrebbero consentire anche importanti risvolti sul piano della sicurezza del lavoro che in assenza di una attuale specifica tecnologia dedicata rappresenta ancora un aspetto

	importante. L'adozione di soluzioni di taglio intermedio oltre a facilitare le successive operazioni di movimentazione della biomassa, produce sezioni più leggere di più agevole possibilità di intervento anche manuale.
Grado di raggiungimento degli obiettivi, scostamenti rispetto al piano di lavoro, criticità evidenziate	<p><i>descrivere in che misura sono stati raggiunti gli obiettivi previsti, giustificando eventuali scostamenti dal progetto originario. Analizzare eventuali criticità tecnico-scientifiche emerse durante l'attività</i></p> <p>Indicatori, prodotti e monitoraggio:</p> <p>In fase di predisposizione dello svolgimento dell'azione, è stata valutata la produzione di seme come non compatibile con le condizioni operative del territorio e con la meccanizzazione disponibile, oltre ad essere oggetto di problematiche a livello normativo, si è quindi stralciata la relativa valutazione dal progetto. Per gli altri tipi di prodotto da biomassa, gli obiettivi sono stati raggiunti.</p>

2.8 PERSONALE

Elencare il personale impegnato, il cui costo è portato a rendiconto, descrivendo sinteticamente l'attività svolta. Non includere le consulenze specialistiche, che devono essere descritte a parte.

Cognome e nome	Mansione/ qualifica	Attività svolta nell'azione	Costo orario	Ore	Costo totale
	Impiegato liv. basso	Coordinamento	27,00 €	77	2.079,00
	Impiegato liv. basso	Coordinamento	27,00 €	108	2.916,00
	Impiegato liv. basso	Supporto	27,00 €	1	27,00
	1° Ricercatore/Dirigente di ricerca	Coordinamento	55,00 €	220,88	12.148,40
	Ricercatore 3° livello	Operatività	33,00 €	375,48	12.390,84
				Totale:	29.561,24 €

2.9 ATTIVITÀ E RISULTATI

Azione	<u>Azione 3: Prove di lavorazione della canapa</u>
Unità aziendale responsabile	CICA - UCSC
Descrizione delle attività	La possibilità di realizzare una filiera "canapa multiuso" in Emilia Romagna, obiettivo fondamentale del progetto MultiCanapa, è subordinata alla possibilità di trasformare gli steli di canapa in frazioni di fibra e

canapulo che abbiano caratteristiche tecniche e un prezzo accettabile per un mercato di riferimento.

La separazione dello stelo in fibra e canapulo che viene realizzata dall'attuale industria canapicola europea è subordinata alla macerazione in campo degli steli e alla disponibilità di impianti meccanici di trasformazione particolarmente costosi. Nell'ambito di MultiCanapa è stato testato e ottimizzato un processo di trasformazione degli steli innovativo, parzialmente valutato nell'ambito del progetto Europeo BBI "GRACE", in grado di trasformare lo stelo in frazioni di fibra di pezzatura variabile in funzione delle regolazioni di processo e delle caratteristiche degli steli. Un'importante caratteristica del processo è che non necessita della fase di macerazione in campo, che risulterebbe alquanto complessa ed aleatoria nelle condizioni climatiche della Pianura padana.

L'impianto di prima trasformazione è presente presso l'Az. Agr. Losi Claudio, dove sono state effettuate le prove di separazione meccanica delle fibre, ed in particolare una verifica di prima frantumazione e triturazione.

Oltre alla necessaria area all'aperto per svolgere tale attività dovendo gestire le polveri e i fumi della macinazione e degli scarichi delle trattrici impiegate, sono state individuate le attrezzature finalizzate al trasporto, per poi effettuare le sezioni di lavorazione dimostrative finalizzate ad ottenere derivati di varia granulometrie, caratterizzate per la specifica varietà e fase fenologica e sfalcio.

È stata effettuata una lavorazione a quantitativi, per unità di pressati di paglia di canapa seguendoli nella loro scomposizione dovuta a lavorazione/1 trasformazione ed alle successive vagliature, prevedendo crivelli con diametri di qualche cm, a misure di diametri inferiori il mm.

Le specifiche della lavorazione sono indicate nella relazione di dettaglio.

Nel corso del progetto MultiCanapa, le presse di steli ottenute durante le prove di coltivazione (descritte nell'Azione 1) sono state consegnate all'Az. Losi Claudio per essere processate. Le specifiche della lavorazione sono indicate nella relazione di dettaglio.

Durante le prove di lavorazione degli steli sono stati raccolti i dati relativi alle rese in fibra e canapulo e per ogni passaggio saranno misurate le dimensioni delle frazioni di fibra. Le prove sono state svolte modificando

	le variabili di processo e registrando l'effetto di queste variazioni su resa e dimensione delle frazioni fibrose oltre che assorbimento energetico e quindi costo del processo
Grado di raggiungimento degli obiettivi, scostamenti rispetto al piano di lavoro, criticità evidenziate	<p>descrivere in che misura sono stati raggiunti gli obiettivi previsti, giustificando eventuali scostamenti dal progetto originario. Analizzare eventuali criticità tecnico-scientifiche emerse durante l'attività</p> <p>Indicatori, prodotti e monitoraggio:</p> <p>Le prove sono state effettuate ottenendo i prodotti richieste e raggiungendo tutti gli obiettivi. Seppur non previsto, è stato necessario il supporto di UCSC, in quanto i dati delle attività svolte erano necessari alla corretta realizzazione dell'Azione 4, è stato pertanto valutato un coinvolgimento più diretto anche di questo partner.</p>

2.10 PERSONALE

Elencare il personale impegnato, il cui costo è portato a rendiconto, descrivendo sinteticamente l'attività svolta. Non includere le consulenze specialistiche, che devono essere descritte a parte.

PERSONALE

Cognome e nome	Mansione/ qualifica	Attività svolta nell'azione	Costo orario	Ore	Costo totale
	Impiegato liv. basso	Coordinamento	27,00 €	141	3.807,00
	Impiegato liv. basso	Coordinamento	27,00 €	75	2.025,00
	Impiegato liv. basso		27,00 €	221	5.967,00
				Totale:	11.799,00

2.11 COLLABORAZIONI, CONSULENZE, ALTRI SERVIZI

CONSULENZE ESTERNE - PERSONE

FISCHE

nominativo del consulente	Attività realizzate / ruolo nel progetto	IMPORTO (AL NETTO IVA)	IMPORTO AL LORDO IVA
	Prove lavorazione canapa	€2.305,44	€2.812,64
		€5.706,06	€6.961,39
		€9.498,00	€11.587,56
Totale		€17.509,50	€21.361,59

2.12 ATTIVITÀ E RISULTATI

Azione	<u>Azione 4: Analisi economico/ambientale ed indagine di mercato</u>
--------	---

Unità aziendale responsabile	CICA - UCSC
Descrizione delle attività	<p>I dati raccolti nell'ambito delle azioni 1-2-3 e relativi agli input, ai costi economici ed energetici di tutte le fasi produttive, oltre che relativi agli output del sistema, verranno utilizzati in questa azione per realizzare un'analisi economica e di impatto ambientale (LCA).</p> <p>Sono state studiate le principali voci di costo della coltivazione della canapa e si sono individuati i parametri di ottimizzazione per la copertura dei costi di produzione. È stata paragonata la profittabilità della canapa con quella di altre colture agricole radicate sul territorio per individuare se, dal punto di vista della redditività economica, la coltura della canapa può essere considerata sostituta ad altre colture. L'analisi costi-ricavi permette di rilevare la sostenibilità economica della coltivazione della canapa per l'azienda agricola. Attraverso interviste con aziende della trasformazione si è individuato un range di prezzo sia per i prodotti della canapa forniti dall'azienda agricola sia per i trasformati dell'industria. Sono anche stati indagati i principali canali attraverso cui il produttore di canapa può accedere al mercato di vendita.</p> <p>La stima dell'impatto ambientale e delle performance energetiche relative alla produzione dei semilavorati di canapa, partendo dalla coltivazione e fino alla prima trasformazione, è stata realizzata tramite bilancio del carbonio, per dettagli si veda apposita relazione. Il sistema produttivo verrà ottimizzato in base alla realizzazione di analisi di sensitività e di scenario attuate modificando i seguenti parametri: a livello di azienda agraria – tecnica colturale (densità di semina, concimazione azotata, epoca di raccolta), scelta varietale e modalità di raccolta; a livello della fase di prima trasformazione – settaggio delle macchine, livello di raffinazione dei prodotti; a livello della filiera produttiva – distanza media delle aziende agrarie da centro di trasformazione, modalità di conservazione degli steli (presso le aziende, presso il centro di trasformazione o presso centri di stoccaggio dedicati). La combinazione dell'analisi economica e di emissione di Carbonio consente di identificare la combinazione di scelte operative e quindi i percorsi produttivi migliore per massimizzare i ritorni economici e per minimizzare gli impatti ambientali. La conclusione attualmente, tuttavia, vede una limitata competitività della coltura, a fronte</p>

	degli alti costi di utilizzo delle superfici agricole e del mutato scenario di contesto, in considerazione degli aumentati costi energetici e delle conseguenze relative.
Grado di raggiungimento degli obiettivi, scostamenti rispetto al piano di lavoro, criticità evidenziate	<p>descrivere in che misura sono stati raggiunti gli obiettivi previsti, giustificando eventuali scostamenti dal progetto originario. Analizzare eventuali criticità tecnico-scientifiche emerse durante l'attività</p> <p>Indicatori, prodotti e monitoraggio</p> <p>Gli obiettivi sono stati raggiunti.</p>

2.13 PERSONALE

Elencare il personale impegnato, il cui costo è portato a rendiconto, descrivendo sinteticamente l'attività svolta. Non includere le consulenze specialistiche, che devono essere descritte a parte.

Cognome e nome	Mansione/ qualifica	Attività svolta nell'azione	Costo orario	Ore	Costo totale
	Impiegato liv. basso	Coordinamento	27,00 €	84	2.268,00
	Impiegato liv. basso	Coordinamento	27,00 €	69	1.863,00
	Impiegato liv. basso	Supporto attività	27,00 €	3	81,00
	Professore Associato	Coordinamento	48,00 €	116	5.568,00
	Professore Ordinario	Valutazioni economiche	73,00 €	115	8.395,00
	Ricercatore		31,00 €	300	9.300,00
				Totale:	27.475,00

2.14 ATTIVITÀ E RISULTATI

Azione	Divulgazione
Unità aziendale responsabile	CICA – UCSC - COPROB
Descrizione delle attività	<p>L'attività di diffusione dei risultati ottenuti è stata oggetto di modifiche in corso d'opera, in quanto il periodo di svolgimento del progetto, con il permanere delle limitazioni inerenti all'evento pandemico ha portato a valutazioni di opportunità rispetto a quanto previsto.</p> <p>Come previsto sono state organizzate le giornate in campo, ed anche le attività rivolte specificatamente ai soci del C.I.C.A. Bologna s.c.a, inoltre, per quanto riguarda il meeting conclusivo di progetto, con il supporto del partner associato COPROB, si è organizzato un convegno di ampio respiro, che è stato rivolto ad altri soggetti potenzialmente interessati per ottenere</p>

	<p>la diffusione massima sui risultati delle attività svolte, andando a coinvolgere un'audience anche esterna rispetto al mondo agricolo in senso stretto, invitando relatori appartenenti alla filiera industriale.</p> <p>Per massimizzare la divulgazione, è stato poi realizzato un video contenente interviste ai partecipanti che hanno illustrato le proprie attività, gli obiettivi ed i risultati raggiunti. Il video è stato reso disponibile online ed è di libero accesso al pubblico.</p> <p>È stato pubblicato un articolo su una rivista tecnica.</p> <p>Tramite il sito del C.I.C.A. sono stati via via pubblicati aggiornamenti sugli stati di avanzamento del progetto.</p>
<p>Grado di raggiungimento degli obiettivi, scostamenti rispetto al piano di lavoro, criticità</p>	<p><i>descrivere in che misura sono stati raggiunti gli obiettivi previsti, giustificando eventuali scostamenti dal progetto originario. Analizzare eventuali criticità tecnico-scientifiche emerse durante l'attività</i></p> <p>Indicatori, prodotti e monitoraggio:</p> <p>Gli obiettivi sono stati raggiunti, pur con alcune modifiche di dettaglio alle attività previste.</p>

2.15 PERSONALE

Elencare il personale impegnato, il cui costo è portato a rendiconto, descrivendo sinteticamente l'attività svolta. Non includere le consulenze specialistiche, che devono essere descritte a parte.

Cognome e nome	Mansione/ qualifica	Attività svolta nell'azione	Costo orario	Ore	Costo totale
	Impiegato liv. basso	Coordinamento	27,00 €	373	10.071,00
	Impiegato liv. basso	Coordinamento	27,00 €	184	4.968,00
	Impiegato liv. basso	Supporto attività	27,00 €	0	0,00
	Professore Associato	Divulgatore	48,00 €	70	3.360,00
Totale:					18.399,00

2.16 SPESE PER ATTIVITÀ DI DIVULGAZIONE E DISSEMINAZIONE

nominativo del consulente	Attività realizzate / ruolo nel progetto	IMPORTO (AL NETTO IVA)	IMPORTO AL LORDO IVA
IMAGE LINE	Attività di comunicazione per progetto Multicanapa	3.997,00 €	4.876,34 €
Totale		3.997,00 €	4.876,34 €

2.17 ATTIVITÀ E RISULTATI

Azione	Formazione		
Unità aziendale responsabile	CICA - IRECOOP		
Descrizione delle attività	Domanda n. 5151205 attività finanziata al 80% - IN CHIUSURA - 16 ore - Domanda n. 5533509 attività finanziata al 70% - SVOLTA - visita e scambi		
	ID DOMANDA richiesto	Quota Rendicontata N. PARTECIPANTI	contributo
	5567285	11.491,68	
	€	8.044,20	
	€	12	visita e scambi
	5693644	€	
	5.942,40		4.753,95
	€	15	corso aula 16 ore

Grado di raggiungimento degli obiettivi, scostamenti rispetto al piano di lavoro, criticità	È stato necessario rimodulare le attività di formazione inserendo un'attività di visita e scambi, per la quale è emerso in fase di realizzazione l'interesse delle aziende coinvolte.

2.18 SPESE PER ATTIVITÀ DI FORMAZIONE E CONSULENZA

Descrivere brevemente le attività già concluse, indicando per ciascuna: ID proposta, numero di partecipanti, spesa e importo del contributo richiesto

Domanda n. 5151205 attività finanziata al 80% - SVOLTA - 16 ore

- Domanda n. 5533509 attività finanziata al 70% - SVOLTA – visita e scambi

ID DOMANDA	Quota Rendicontata	contributo richiesto	N. PARTECIPANTI
5567285 12	11.491,68 €	8.044,20 visita e scambi	
5693644 €	€ 5.942,40 15	4.753,95 corso aula 16 ore	

3 - CRITICITÀ INCONTRATE DURANTE LA REALIZZAZIONE DELL'ATTIVITÀ

Lunghezza max 1 pagina

Criticità tecnicospicifiche	Si sono riscontrate problematiche nel reperimento di attrezzatura adeguata alla raccolta differenziata delle infiorescenze.
Criticità gestionali (ad es. difficoltà con i fornitori, nel reperimento delle risorse umane, ecc.)	Dal 2020 in poi, con la pandemia abbiamo avuto problemi di gestione delle attività di divulgazione e formazione. Le prime sono state rimodulate con inserimento di nuove attività (video), per le seconde è stato necessario prolungare i tempi, si sono attivate poi nuove modalità di interesse dei partecipanti.
Criticità finanziarie	Nessuna

4 - ALTRE INFORMAZIONI

Riportare in questa sezione eventuali altri contenuti tecnici non descritti nelle sezioni precedenti

Il progetto ha visto dei risparmi sull'azione 3, per rivalutazione dei costi del fornitore scelto e massiccia collaborazione dei partner, non inizialmente prevista.

I risultati del Piano sono stati facilmente trasferiti ad aziende agricole interessate alla coltivazione della canapa sia negli ambienti limitrofi alle aziende coinvolte in MultiCanapa attualmente in contesti produttivi regionali. I modelli di coltivazione ed essiccamento realizzati nell'azione 1 sono stati condivisi utilizzati per elaborare strategie di coltivazione, anche se ancora non è nel breve periodo che si potrà definire la superficie da coltivare a canapa a livello territoriale (e quindi il numero di aziende da coinvolgere) al fine di soddisfare le esigenze dell'impianto di prima trasformazione. Il CICA (soggetto proponente del GOI) ha attivato contatti con realtà emergenti in particolare un gruppo promotore di progetto Regionale finanziato sul POR FESR, e si valuterà una eventuale collaborazione per utilizzare le conoscenze prodotte in MultiCanapa per organizzare una filiera regionale, che a regime potrebbe coinvolgere 1000 ettari di coltivazioni di canapa per alimentare un impianto di prima trasformazione per utilizzo tessile (non trattato nel presente progetto). L'investimento per l'impianto di prima trasformazione consortile, non è al momento ancora in programma, in quanto, viste le mutate condizioni di contesto, le Cooperative socie non sono attualmente in grado di effettuare l'investimento, il quale deve comunque essere studiato alla luce dei nuovi costi energetici e del nuovo assetto delle commodities, non prevedibile in fase di progettazione, nel 2019.

L'analisi economica è ora in grado di fornire alle aziende agricole dati sui costi e ricavi della coltivazione di canapa e sulla dimensione minima efficiente perché la coltivazione sia profittevole. I range di prezzo individuati dall'analisi economica rappresentano inoltre un'indicazione per l'azienda agricola e per l'industria di prima trasformazione. Vista la mutata condizione dei mercati, sono stati analizzati anche nuovi semilavorati, per nuove tipologie di prodotto (az. 3)

Gli output di progetto, quindi, sono stati diversi dalla previsione iniziale, e ad oggi sono ancora in corso nuove analisi ingegneristiche per valutare la realizzazione dell'impianto pilota alla luce delle attuali contingenze economiche, nonché nuovi contatti per riprendere il classico sbocco tessile del prodotto, e valutazioni sulla possibilità di implementare la genetica in supporto della coltivazione, soprattutto alla luce dell'evoluzione del cambiamento climatico. Queste valutazioni, potrebbero essere supportate in futuro da nuovi progetti di innovazione, visto il valore di aggregazione che dal presente progetto si è creato e che si vuole continuare a sostenere.

Data 22/12/2023

Azione 1: valutazione di procedure di coltivazione per l'ottenimento di prodotti derivati dalla canapa

Sviluppo di un modello di essiccamento degli steli e di un Sistema di Supporto alle Decisioni per la coltivazione della canapa

Considerando la resa maggiormente importante sui bilanci ambientali ed economici della filiera, è essenziale che l'agricoltore prenda decisioni tecniche che permettono di ottimizzare la resa di steli e semi. Però, la canapa è una coltura che può essere complicata da coltivare se uno non considera bene le interazioni complesse che esistono fra ambiente, genotipo e agrotecnica. Sbagliarsi sul genotipo, oppure seminare troppo presto una varietà in una zona determinata, può portare la coltura a non andare a buon fine, ottenendo basse rese in bassissima di steli e/o di semi. Per questo motivo, è stato deciso nell'ambito del progetto Multicanapa di concettualizzare e sviluppare un Sistema di Supporto alla Decisione (DSS), con l'obiettivo di aiutare gli agricoltori della regione Emilia-Romagna che non conoscono bene o per niente la canapa a prendere delle corrette scelte agronomiche.

Questo DSS viene maggiormente basato sul modello fenologiche sviluppato da Amaducci et al. (2008), con varietà calibrate da Amaducci et al. (2008) e Amaducci et al. (2012). In aggiunta di questo modello fenologiche, è stato sviluppato, nell'ambito del progetto Multicanapa, un modello di essiccamento degli steli che viene combinato al modello fenologico. In fine, l'obiettivo generale di questo DSS è di consigliare ai vari utenti la data di semina, la scelta varietale e la data di raccolta. Questa determinazione deve essere basata su vari prerequisiti come, ad esempio, la tipologia produttiva (sola fibra o steli e semi), la disponibilità di varietà, o la necessità di liberare il campo ad una determinata data per potere andare avanti sulla preparazione del suolo per la coltura successiva.

In questa sezione, verranno descritti (i) il modello di essiccamento, (ii) il modello fenologico, (iii) l'implementazione della combinazione di questi due modelli nel DSS, e (iv) il principio di funzionamento e le diverse funzionalità del DSS.

1. Modello di essiccamento degli steli di canapa

Il modello di essiccamento che viene usato nel DSS è basato su un modello di essiccamento di biomassa di sorgo sviluppato da Colauzzi et al. (2018), e su un modello di essiccamento di steli di lino sviluppato da Nilsson and Karlsson (2005). Questo modello mira a stimare l'andamento del contenuto d'acqua negli steli di canapa a seconda delle diverse variabili ambientale stimate (pressione atmosferica) o misurate (radiazione solare, temperatura dell'aria, umidità relativa, precipitazione e velocità del vento) da una capannina meteorologica. L'obiettivo generale è quello di potere predire il momento in cui gli steli raggiungono il 15 % d'umidità per poter procedere alla raccolta (% di umidità consigliata per potere procedere all'imballatura e alla successiva trasformazione).

Al fine di sviluppare un modello adattato alla canapa, sono state realizzate sperimentazioni nell'azienda sperimentale CERZOO, in cui sono stati regolarmente misurati i valori d'umidità degli steli provenienti da diverse parcelle sperimentale che differivano tra loro per la differente gestione agronomica della canapa (es. densità di semina, varietà, resa). I dati ottenuti hanno permesso di sviluppare, calibrare e validare il modello.

1.1. Descrizione del modello

Il modello di essiccamento calcola ad ogni timestep, la quantità di acqua che viene acquisita o persa dagli steli di canapa. Sono quattro i processi che causano una variazione del contenuto di umidità all'interno degli steli di canapa. Questi processi sono esclusivi l'un l'altro per evitare la problematica della multicollinearità nel processo di calibrazione. Il primo di questi processi è l'incremento dell'umidità causato dalle precipitazioni (Equazione 4.1) (Colauzzi et al., 2018).

$$RWIp = R \cdot t_s \cdot (Wc_{max} - Wc_t) \cdot \frac{1}{hd} \cdot SU \cdot 10^3 \quad \text{Equazione 4.1}$$

Dove $RWIp$ (Rate of Water Increment due to Precipitations) rappresenta l'incremento del contenuto di umidità all'interno degli steli (g), R rappresenta la precipitazione (kg m^{-2}), t_s è il timestep (h), Wc_{max} rappresenta l'umidità massima negli steli (in basa secca, in $\text{g}_{\text{acqua}} \text{g}_{\text{biomassa secca}}^{-1}$), Wc_t rappresenta l'umidità (in basa secca, in $\text{g}_{\text{acqua}} \text{g}_{\text{BS}}^{-1}$) modellizzata al timestep t , hd è la costante di idratazione (h), SU è la superficie sul quale vengono disposti i campioni usati per sviluppare e calibrare il modello (m^2) e 10^3 trasforma il valore della quantità di acqua in grammi. In questa equazione, hd è uno dei parametri che viene determinato dall'ottimizzazione empirica durante il processo di calibrazione del modello; e Wc_{max} è stato determinato sperimentalmente immergendo 8 campioni di steli di canapa in acqua distillata per 24 ore, togliendo l'acqua in superficie (quindi quella non assorbita dallo stelo) con carta assorbente e pesando ogni singolo campione. I campioni sono poi stati essiccati in stufa a 65°C per 72 ore, e pesati una volta ritornati a temperatura ambiente, ed è stato ottenuto un valore di $2.51 \pm 0.15 \text{ g}_{\text{acqua}} \text{g}_{\text{BS}}^{-1}$ (media \pm deviazione standard, $n = 8$). R è stato misurato con un timestep di 1 ora da una capannina posizionata a 200 metri dal campo sperimentale.

Il secondo processo è quello dell'incremento dell'umidità degli steli causato dalla rugiada (Equazione 4.2).

$$RWId = t_s \cdot dc \cdot (Wc_{max} - Wc_t) \cdot SU \cdot 10^3 \quad \text{Equazione 4.2}$$

Dove $RWId$ (Rate of Water Increment due to Dew) rappresenta l'incremento del contenuto di umidità negli steli (g), e dc ($\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) è la costante di rugiada che viene determinata dall'ottimizzazione empirica durante il processo di calibrazione del modello. Questo processo si attiva solamente se l'umidità relativa dell'aria è uguale a 100 %.

Il terzo processo è quello dell'evaporazione dell'acqua contenuta negli steli (Equazione 4.3) ed è strettamente legato all'evapotraspirazione di riferimento calcolata seguendo la metodologia riportata da Allen et al. (1998) usando i valori dei parametri ambientali misurati ogni ora dalla capannina meteorologica vicino al campo sperimentale.

$$RWL = t_s \cdot w \cdot ET_0 \cdot (Wc_t - Wceq_t) \cdot SU \cdot 10^3 \quad \text{Equazione 4.3}$$

Dove RWL (Rate of Water Losses) rappresenta l'incremento del contenuto di umidità negli steli (g), w è la costante di essiccamento (h^{-1}) che viene determinata empiricamente, ET_0 è l'evapotraspirazione di riferimento (kg m^{-2}) calcolata da Allen et al. (1998) che richiede misurazioni orarie della radiazione solare, temperatura media, minima e massima dell'aria, velocità del vento, pressione atmosferica (stimata dall'altitudine), umidità dell'aria e valori di latitudine e longitudine. $Wceq_t$ rappresenta l'umidità all'equilibrio al timestep t ($\text{g}_{\text{acqua}} \text{g}_{\text{BS}}^{-1}$). Questo valore viene determinato usando l'equazione modificata di Oswin (Equazione 4.4), calibrata per la canapa non macerata da Nilsson et al. (2005).

$$Wceq_t = \frac{A+(B \cdot T_t)}{\left(\frac{1}{RH_t}-1\right)^{\frac{1}{C}}} \cdot \frac{1}{100} \quad \text{Equazione 4.4}$$

Dove T_t è la temperatura dell'aria al timestep t (°C), RH_t è l'umidità relativa dell'aria al timestep t (%), A , B e C sono coefficienti determinati empiricamente da Nilsson et al. (2005) e valgono rispettivamente 10.6, $-2.29 \cdot 10^{-2}$ e 2.96. Perché $Wceq_t$ raggiunga valori estremi di umidità relativa, sono stati determinati limiti bassi ($Wceq_{min}$) ed alti ($Wceq_{max}$). $Wceq_{min}$ è stato fissato a $1 \cdot 10^{-5} \text{ g}_{\text{acqua}} \text{ g}_{\text{BS}}^{-1}$ perché la funzione $Wceq_t$ non è definita per valori di umidità relativa di 0. $Wceq_{max}$ è stato definito come valendo $0.3 \text{ g}_{\text{acqua}} \text{ g}_{\text{BS}}^{-1}$, come descritto da Nilsson et al. (2005).

L'ultimo processo che influenza l'umidità degli steli di canapa è dovuto alla variazione dell'umidità all'equilibrio $Wceq_t$. Wc_t segue $Wceq_t$ solamente nel caso in cui Wc_t ha già raggiunto $Wceq_t$, e se RWL , $RWId$ e $RWIp$ valgono 0.

1.2. Calibrazione sperimentale

Al fine di poter calibrare e sviluppare il modello, gli steli di canapa sono stati lasciati in campo a circa 200 metri da una capannina meteo, nell'azienda sperimentale Cerzoo (45.002636 °N, 9.704109°E) (PC). In totale, sono 40 i campioni, ciascuno essendo costituito da vari steli provenienti di 8 condizioni agronomiche di crescita della canapa, implicando 5 replicati per condizione. Queste condizioni sono riportate nella Tabella 11. Da ora in poi i 40 campioni suddetti saranno denominati "USS" (Unità Statistica Singola).

Tabella 11. Condizioni agronomiche da cui provenivano gli steli di canapa.

Condizione	Varietà	Densità di biomassa (Mg ha ⁻¹)	Densità di semina (kg ha ⁻¹)
1	Futura 75	5	45
2	Futura 75	10	45
3	Futura 75	15	45
4	Fibror 79	5	45
5	Fibror 79	10	45
6	Fibror 79	15	45
7	Futura 75	10	22.5
8	Futura 75	10	67.5

Ogni USS consiste in un gruppo di steli tagliati ad una lunghezza di 50 cm e lasciati su una superficie di suolo $SU = 0.1 \text{ m}^2$ ($20 \times 50 \text{ cm}$) precedentemente pulita dalle erbe infestanti per evitare potenziali interazioni tra l'evaporazione dell'acqua contenuta negli steli e la traspirazione delle erbe infestanti nella determinazione del RWL . Le USS sono state collocate il 14 di marzo 2023 alle ore 17:00. Successivamente, ogni USS è stata pesata diverse volte fino al 3 aprile alle ore 17:00 (termine della sperimentazione).

La calibrazione aveva quindi come obiettivo tecnico di determinare valori per i parametri w e hd del modello. La calibrazione è stata realizzata usando il software R (v 4.3.0.) e la funzione `nls_multstart` del package `nls.multstart` (Padfield and Matheson, 2023). I valori iniziali minimi e massimi per w erano 1 e 15, rispettivamente. I valori limite minimi e massimi della calibrazione per w erano 0.1 e 40. I valori iniziali minimi e massimi per hd erano 5 e 10, rispettivamente. I valori limite minimi e massimi della calibrazione per hd erano ($Wc_{max} - Wceq_{min}$) e 25. La determinazione del miglior set di parametri viene basato sugli scores AIC, ed ogni calibrazione è stata realizzata con 10 iterazione per parametro e il "convergence_count" fissato a 25.

1.3. Risultati

Dopo la calibrazione, i valori predetti del contenuto di umidità sono soddisfacenti, con valori di nRMSE media di 11.6 % ed estremi di 15.6 % e 9.7 %. La distribuzione dei residui è normale al livello $\alpha = 0.05$, per 36 dei 40 USS. La Figura 2 rappresenta un esempio tipico dell'output ottenuto dopo la calibrazione mentre la Figura 3 rappresenta la qualità del fitting sul contenuto in umidità.

Fra genotipo e densità di biomassa, le anova a due vie hanno mostrato che la densità di biomassa ha un effetto significativo, sia sul valore di w ($p.val = 4.4 \cdot 10^{-9}$, F-stat = 48, d.f. = 2) che di hd ($p.val = 6.7 \cdot 10^{-16}$, F-stat = 209, d.f. = 2). L'effetto della varietà risulta non significativo per w ($p.val = 0.14$, F-stat = 2.4, d.f. = 1) e per hd ($p.val = 0.12$, F-stat = 2.6, d.f. = 1) anche se i valori di w ottenuti per Fibror 79 sono sistematicamente superiore a quelli ottenuti per Futura 75 (guardando i valori appaiati per ogni densità di biomassa), mentre i valori di hd sono sistematicamente più bassi per Fibror 79 che per Futura 75 (Tabella 12). Nello stesso modo, l'effetto della densità di semina risulta non significativo sia per w (Kruskal-Wallis $p.val = 0.18$) che per hd (Kruskal-Wallis $p.val = 0.44$). L'allegato 1 riporta, per ogni USS, i valori dei parametri calibrati con diverse misure di qualità del modello.

Tabella 12. Valori calibrati per i parametri w e hd per le diverse condizione di densità di biomassa (DB) e per le due varietà.

	Futura 75			Fibror 79		
	DB1	DB2	DB3	DB1	DB2	DB3
w	4.2 ± 0.1	10.0 ± 1.1	7.1 ± 0.3	4.4 ± 0.1	12.2 ± 1.2	7.3 ± 0.4
hd	11.1 ± 0.3	5.4 ± 0.2	18.1 ± 0.4	10.1 ± 0.2	4.8 ± 0.2	17.1 ± 1.4

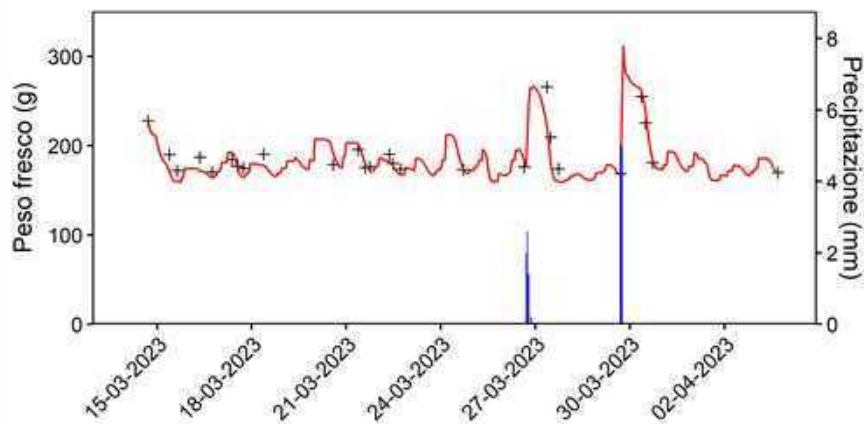


Figura 2. Esempio di output del modello di essiccamento dopo la calibrazione. Questo esempio si riferisce alla varietà Fibror 79 con una densità di biomassa di 15 Mg ha^{-1} ed una densità di semina di 45 kg ha^{-1} . Le croci nere rappresentano i valori di peso fresco osservati, la linea rossa indica l'andamento modellizzato del peso fresco e le barre blu rappresentano i valori di precipitazione per ogni ora.

Quindi, il solo effetto significativo sui valori determinati dai parametri del modello è quello della densità di biomassa. Infine, si determina che all'aumento della densità di biomassa, i tassi di idratazione e di essiccamento sono più lenti.

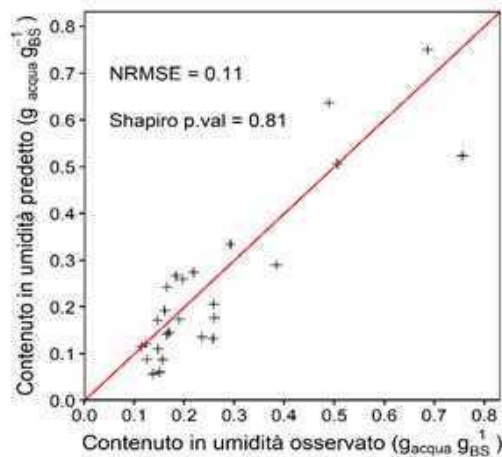


Figura 3. Relazione tra valori predetti ed osservati del contenuto di umidità per lo stesso dataset utilizzato nella Figura 2. La linea rossa rappresenta la linea $y = x$.

2. Presentazione del modello di fenologia

Il modello fenologico pubblicato da Amaducci et al. (2008) è stato implementato nel DSS. In questa sezione si descrive brevemente il principio del modello, le equazioni utilizzate e i valori dei parametri utilizzati nel modello.

Questo modello prevede l'andamento dello sviluppo fenologico della canapa a seconda delle variabili ambientali (temperatura dell'aria, lunghezza del giorno) e della data di emergenza della canapa che, essendo una specie brevidiurna, tende a fiorire quando la lunghezza del giorno è corta. Lo sviluppo fenologico della canapa è stato suddiviso in tre parti, andando dall'emergenza della coltura fino alla piena fioritura. Queste tre fasi sono (i) la BVP (Basic Vegetative Phase – fase vegetativa e juvenila) durante il quale la fioritura della canapa non può essere indotta anche se la durata del giorno è breve; (ii) la PIP (Photoperiod-Inducing Phase – fase di induzione dal fotoperiodo) durante la quale la fioritura può essere indotta se la durata del giorno è abbastanza breve; e (iii) la FDP (Flower Development Phase – fase di sviluppo dei fiori) durante la quale si sviluppano i fiori. Al termine di quest'ultima fase fenologica, la canapa raggiunge la piena fioritura e può essere raccolta, nel caso in cui si desidera produrre solo fibra. Se l'agricoltore desidera raccogliere anche i semi, deve aspettare il momento della maturità del seme che avviene circa 35 giorni dopo la piena fioritura; questa fase non è stata modellizzata in questo modello.

Ognuna di queste tre fasi fenologiche viene descritta matematicamente da un tasso di sviluppo $R_{dev}(x)_t$ (d^{-1}) dove x raggiunge il valore di 1, 2 o 3 per le fasi BVP, PIP e FDP, rispettivamente. Per ogni fase, $R_{dev}(x)_t$ incomincia con un valore di 0 e finisce ad 1. Quindi, quando $R_{dev}(x)_t$ raggiunge il valore di 1, incomincia la fase seguente ($x = 1$ o 2), oppure la canapa ha raggiunto la piena fioritura se $x = 3$.

Per il calcolo del valore di $R_{dev}(x)_t$ vengono considerati fattori termici (per le tre fasi) e fotoperiodici (solamente per la fase n°2), calcolati ad ogni timestep del modello. Il timestep è orario, però prove sperimentale hanno dimostrato che un timestep di 3 ore non modifica l'output rispetto a quello orario (risultati non pubblicati). In aggiunta, viene considerato nel calcolo di $R_{dev}(x)$ il valore della durata della fase considerata in condizione ottimali (Equazione 4.5).

$$R_{dev}(x)_t = \begin{cases} R_{dev}(1)_{t-1} + \frac{fT(1)_t}{D1}, & x = 1 \\ R_{dev}(2)_{t-1} + \frac{fT(2)_t \cdot fP_t}{D2}, & x = 2 \\ R_{dev}(3)_{t-1} + \frac{fT(3)_t}{D3}, & x = 3 \end{cases} \quad \text{Equazione 4.5}$$

Dove t rappresenta il timestep al quale viene calcolato $R_{dev}(x)_t$, $fT(x)_t$ è il fattore termico della fase x al timestep t , fP_t è il fattore fotoperiodico al timestep t , e $D1$, $D2$ e $D3$ (d) sono rispettivamente le durate delle fasi fenologiche BVP, PIP e FDP, in condizione ottimale di sviluppo (quindi rappresentano le durate delle fasi fenologiche nei casi in cui fT e fP valgono 1). $D1$ è un parametro che dipende della varietà (Tabella 12), mentre $D2$ e $D3$ sono gli stessi per ciascuna varietà e valgono 1.0 e 4.7 giorni, rispettivamente.

I calcoli dei fattori termici e fotoperiodici sono descritti dalle equazioni 4.6 e 4.7, rispettivamente.

$$fT = \begin{cases} 0 & T_t \leq T_b, T_t \geq T_c \\ \frac{T_c - T_t}{T_c - T_o} \cdot \left(\frac{T_t - T_b}{T_o - T_b} \right)^{\left(\frac{T_o - T_b}{T_c - T_o} \right)} & T_b < T_t < T_c \end{cases} \quad \text{Equazione 4.6}$$

Dove T_t è la temperatura dell'aria al timestep t (°C), T_b è la temperatura di basa (°C), T_o la temperatura ottimale (°C) e T_c è la temperatura plafond (°C). È da notare che il valore di fT varia con la fase fenologica: $T_b = 1.9$ °C durante la BVP e $T_b = 11.3$ °C durante PIP e FDP; mentre $T_c = 40$ °C e $T_o = 16.4$ °C per tutte tre fasi.

$$fP = \frac{\kappa^n}{\kappa^n + P^n} \quad \text{Equazione 4.7}$$

Dove P è la durata del giorno (h), e κ e n sono rispettivamente il punto di inflessione (durata del giorno che porta fP ad un valore di 0.5) e l'inclinazione della risposta. Fra questi parametri, la durata del giorno (P) viene calcolata a seguito del modello CBM di Forsythe et al. (1995), considerando che la giornata comincia e finisce quando il centro del sole è geometricamente al livello dell'orizzonte; κ è lo stesso per ciascuna varietà e vale 14.1 h, mentre n è un parametro che dipende della varietà (Tabella 12).

Tabella 12. Valori dei parametri che dipendono della varietà nel modello fenologico (Amaducci et al., 2008).

Varietà	D1	n
Carmagnola	23.3	62
Félina 34	13.2	47
Fibranova	23.6	61.9
Futura 77	19.7	52.1
Tiborszallasi	18.5	66.7

3. Combinazione dei modelli e implementazione del modello combinato nel DSS

I due modelli descritti nelle sezioni precedente sono stati combinati nell'ottica di implementare questo modello combinato nel DSS. La combinazione dei due modelli è abbastanza semplice e può essere fatta in due modi diversi. Nel primo caso, il modello di essiccamento segue direttamente la data di piena fioritura predetta dal modello fenologico, considerando che la canapa venga tagliata alla data di piena fioritura, nel caso in cui si desidera produrre solo fibra. Nel secondo caso, il modello di essiccamento segue la data di maturità del seme, considerando che la canapa venga raccolta alla

maturità dei semi, la quale non può essere modellizzata dal modello fenologico ed è quindi fissata 35 giorni dopo la piena fioritura. Il periodo di 35 giorni, che è stato utilizzato nel modello, fa riferimento al periodo di tempo che intercorre dalla piena fioritura alla maturazione dei semi in varietà di canapa francesi coltivate a Piacenza. I valori del contenuto in umidità della biomassa secca al momento del taglio sono fissati a $1.89 \text{ g}_{\text{acqua}} \text{ g}_{\text{BS}}^{-1}$ quando la canapa è raccolta alla piena fioritura o a $1.43 \text{ g}_{\text{acqua}} \text{ g}_{\text{BS}}^{-1}$ se viene raccolta alla maturità del seme. Questi valori sono i valori iniziali del modello di essiccamento, e sono stati determinati sulla base dei valori sperimentali, combinando 64 misure diverse, ottenute da due anni di coltivazione diverse. Il momento in cui la canapa può essere imballata è il momento in cui il contenuto in umidità raggiunge il 15 % di umidità sul fresco.

Per implementare il modello combinato nel DSS, un'elevata quantità di simulazione è stata eseguita, in cui variavano diversi fattori fra i quali la varietà (Tabella 12), l'epoca di semina (ogni giorno tra il 19 febbraio e il 30 maggio compresi – 101 giorni diversi) e la tipologia produttiva (sia singola produzione di fibra in cui la canapa è raccolta alla piena fioritura, sia duplice attitudine produttiva di steli e semi in cui la canapa è raccolta alla maturità del seme). In aggiunta di questi fattori, il modello combinato è stato eseguito per 11 anni diversi, ciascuno caratterizzato da varie condizioni ambientale al fine di ottenere 11 replicati per ogni condizione. Il DSS si basa su l'output generale di tutte queste simulazioni per aiutare l'utente sulle scelte agronomiche.

La temperatura dell'aria che viene usata nel modello fenologico è stata ottenuta da un dataset di temperatura dell'aria simulato nell'ambito dell'IPCC CMIP5: il CNRM-CERFACS CIMP5.1 model (Voldoire et al. 2013). Sono dati di 11 anni dello scenario "historical" che sono stati usati, dall'anno 1995 a 2005 compresi (le ultime anni di questa simulazione). Questa simulazione è stata scelta perché poteva procurare dati di temperatura ad un timestep di 3 ore e con una risoluzione spaziale abbastanza elevata per essere rappresentativo delle caratteristiche ambientale della zona di Bologna. Il modello fenologico è quindi stato eseguito ad un timestep di 3 ore, al contrario del timestep di 1 ora scelto nel modello fenologico di Amaducci et al. (2008). Tuttavia, diverse prove hanno dimostrato che la variazione del timestep da 1 a 3 ore non influenza significativamente l'output del modello fenologico. Le coordinate GPS di Bologna sono state utilizzate per eseguire il modello combinato.

I dati ambientali necessari al funzionamento del modello di essiccamento sono stati scaricati da una capannina meteorologica situata nell'azienda sperimentale CERZOO. Non è stato possibile utilizzare la stessa fonte di dati utilizzata per il modello fenologico in quanto alcune variabili (ad esempio umidità relativa o velocità del vento) non vengono simulate con la stessa precisione temporale della temperatura dell'aria e non esistono simulazioni del CMIP5 che hanno questa risoluzione per tutte le variabili necessarie.

In totale, sono stati ottenuti 11,110 output di questo modello combinato (5 varietà \times 2 tipologie produttive \times 101 date di semina \times 11 replicati). Ogni output è caratterizzato da una data di semina, da una data di emergenza (fissata 10 giorni dopo la semina per ogni simulazione del modello combinato) e da una data di piena fioritura (output del modello fenologico quando la tipologia produttiva è la sola produzione di fibra) oppure da una data di maturità del seme quando la tipologia produttiva è quella a duplice attitudine produttiva. In più, ogni output contiene un valore di accumulo di gradi giorno fra emergenza e piena fioritura (in °Cd), considerando una temperatura di base di 1 °C (Tang et al., 2016). I valori di resa di biomassa aerea secca degli steli sono poi stati stimati sulla base di relazioni empiriche pubblicate da Tang et al. (2016): $y = 0.0055x + 0.3124$ dove y è la biomassa aerea secca e x è l'accumulazione di °Cd. Per gli steli, questa relazione è: $y = 0.0044x + 0.3095$. Anche se questa stima è approssimativa, è stato dimostrato che la resa della canapa è strettamente legata alla durata della fase di crescita vegetativa. Nello stesso modo, la resa di seme (nei casi in cui la tipologia produttiva mira a raccogliere i semi) è stata determinata empiricamente dalla relazione $y = -0.03x + 8.13$ con una

resa massima fissata a 2.4 Mg ha⁻¹ di semi (il valore massimo riportato da Tang et al., 2016). Il dataset contenente tutti gli output, con i loro parametri precedentemente descritti, è stato inserito nel DSS.

4. Funzionamento del DSS – Manuale d'uso

Gli obiettivi di questo DSS sono quelli di aiutare gli utenti a realizzare varie scelte agronomiche che hanno un'importanza rilevante per il successo della coltivazione di canapa industriale nella zona di Bologna, e che possono contribuire all'organizzazione della filiera. Il DSS è stato sviluppato su una piattaforma excel, e consiste in un file .xlsm che supporta le macro VBA (linguaggio di programmazione usata per svilupparlo). Questa scelta è stata fatta per poter rendere il DSS accessibile a tutti.

Il DSS ha tre funzionalità principali che influenzano il tipo di risposta del DSS alle varie scelte dell'utente (Tabella 13):

- 1- Una funzionalità in cui l'utente decide la varietà e l'epoca di semina e il DSS indica un'epoca di raccolta prevista. Questa funzionalità corrisponde, ad esempio, ad una situazione in cui l'agricoltore ha già seminato e conosce quindi varietà seminata e data di semina e vuole organizzarsi per la raccolta.
- 2- Una funzionalità in cui l'utente decide la varietà e l'epoca di raccolta e il DSS indica un'epoca di semina consigliata. Questa funzionalità corrisponde, ad esempio, ad una situazione in cui l'agricoltore ha a disposizione una varietà e desidera raccoglierla in un intervallo di tempo definito per una miglior gestione del materiale raccolto.
- 3- Una funzionalità in cui l'utente decide la varietà, e il DSS indica date di raccolta e di semina ottimale per raggiungere un'elevata resa. Questa funzionalità potrebbe corrispondere ad una situazione in cui non sono disponibili tutte le varietà da parte della ditta sementiera e l'agricoltore vuole sapere quando seminare e raccogliere in modo ottimale.

Tabella 13. Parametri scelti in input e informazione in output per ogni funzionalità del DSS.

Funzionalità	Parametri scelti in input	Parametri maggiori in output
1	Varietà + epoca di semina	Epoca di raccolta
2	Varietà + epoca di raccolta	Epoca di semina
3	Varietà	Epoche di semina e raccolta

In aggiunta di queste tre funzionalità, sono presenti domande addizionale che permettono all'utente di affinare maggiormente gli outputs del DSS. In totale, ci sono 6 domande alla quale l'utente deve obbligatoriamente rispondere. Queste sono caratterizzate da celle di colore arancio scuro (Figura 4). A seconda delle scelte fatte, si generano delle scelte opzionali le quali si distinguono dalle domande obbligatorie essendo le celle di colore arancio chiaro.

	A	B	C
1			
2			
3			
4			
5			
6			Tipo di produzione Fibra
7			Vuoi scegliere una varietà in particolare? No
8			
9			In quale anno vorresti coltivare? 2024
10			Miri a seminare ad una data o in un intervallo di data in particolare? No
11			
12			
13			Hai una data o un intervallo di data fra cui vuoi raccogliere? No
14			
15			
16			C'è una data prima primo di cui vuoi avere tolto la canapa del campo? No
17			
18			
19			
20			
21			Run
22			

Figura 4. Interfaccia di controllo per l'utente con le 6 domande obbligatorie nelle celle C6, C7, C9, C10, C13 e C16.

- 1- **“Tipo di produzione”**: le scelte possibili sono “Fibra” o “Fibra_seme” (Figura 5) e corrispondono rispettivamente alle due tipologie produttive già descritte: sola produzione di Fibra oppure coltivazione a duplice attitudine produttiva.
- 2- **“Vuoi scegliere una varietà in particolare?”**: le scelte possibili sono “Si” o “No”, l'utente deve indicare se desidera scegliere la varietà da coltivare o no. Se l'utente sceglie “Si”, appare un menu a tendina aggiuntivo nella cella C8 da cui si può scegliere la varietà desiderata (Figura 6). A seconda della tipologia produttiva scelta, variano le varietà disponibili: nel caso in cui la tipologia produttiva scelta è la sola produzione di Fibra, sono disponibili tutte le 5 varietà. Se invece è stato scelto “Fibra_seme” nel tipo di produzione, saranno disponibili solamente le varietà Féline 34 e Futura 77, poiché la duplice attitudine produttiva di steli e semi richiede varietà monoiche.

	A	B	C
1			
2			
3			
4			
5			
6			Tipo di produzione Fibra_seme
7			Vuoi scegliere una varietà in particolare? Fibra
8			Fibra_seme

Figura 5. Tipi di produzione disponibili nel menu a tendina della domanda n°1.

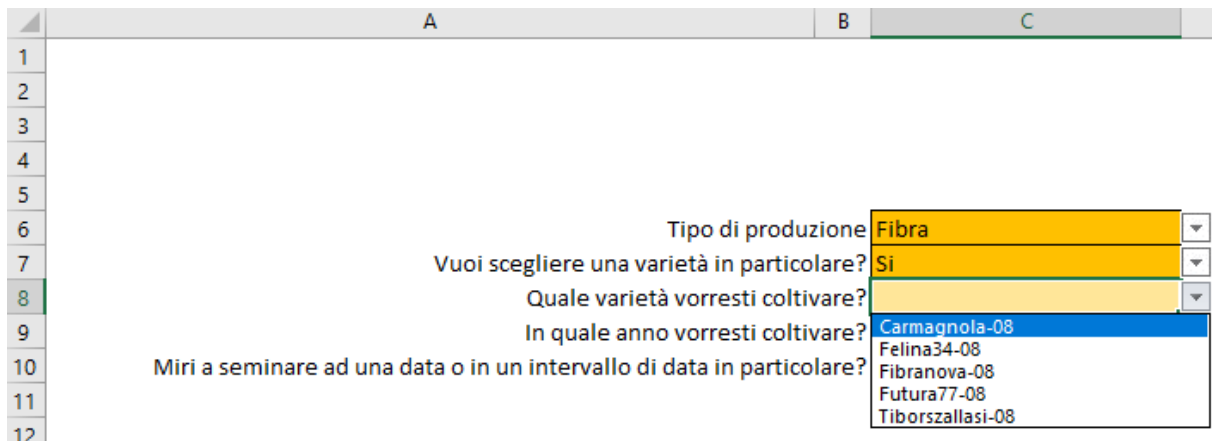


Figura 6. Menu a tendina addizionale apparso perché l'utente ha indicato di voler scegliere la varietà.

- 3- **“In quale anno vorresti coltivare?”**: è necessario scegliere l'anno di coltivazione perché l'algoritmo di funzionamento del DSS è basato su date e richiede quindi un anno di coltivazione. Sono disponibili fra le scelte del menu a tendina l'anno in corso e i due anni successivi. Quindi, se l'utente usa questo DSS il 12 dicembre 2023, le scelte possibili saranno il 2023, 2024 e 2025.
- 4- **“Miri a seminare ad una data o in un intervallo di data in particolare?”**: le scelte possibili sono “Si” o “No”, l'utente deve indicare se desidera scegliere un'epoca di semina o meno. Nel caso in cui sceglie “Si”, appaiono due scelte opzionali aggiuntive immediatamente al di sotto della domanda n°4. Cliccando sulle celle C11 e C12 (le due scelte aggiuntive), appare un calendario che permette di scegliere la data di inizio e di fine dell'epoca di semina indicata (Figura 7). Se l'utente vuole scegliere solamente un giorno (ad esempio il 6 aprile 2024), deve scegliere questa data nelle due celle.

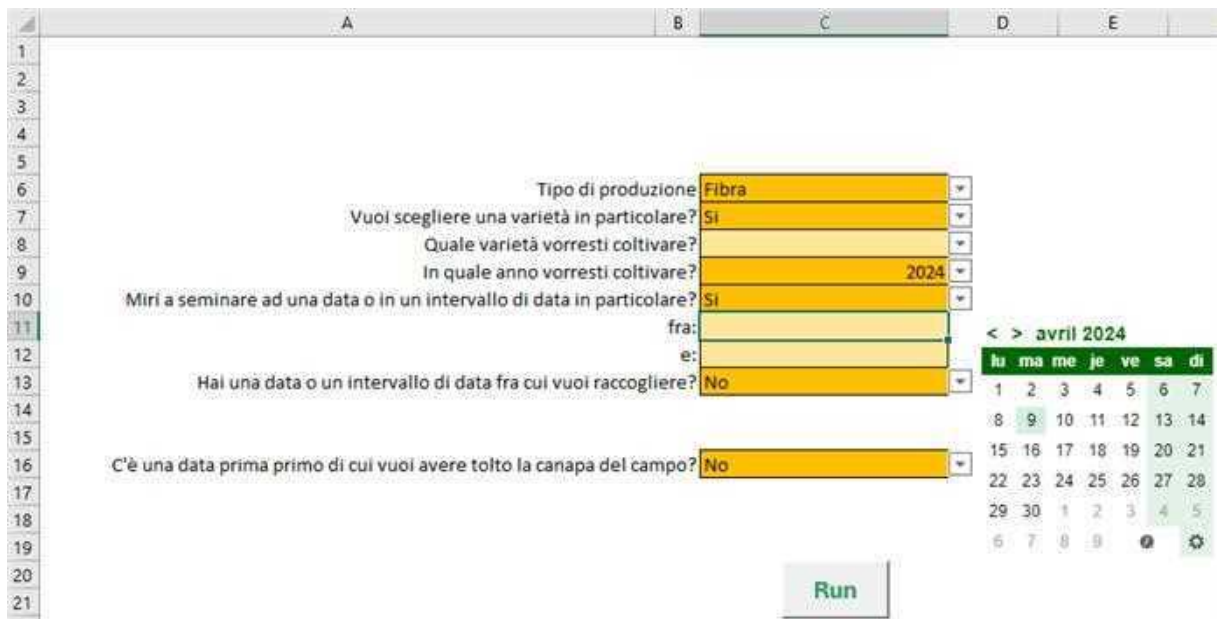


Figura 7. Il calendario permettendo di scegliere le date dell'epoca di semina indicata dall'utente.

- 5- **“Hai una data o un intervallo di date fra cui vuoi raccogliere?”**: stesso funzionamento visto per la domanda n°4, la scelta è legata alla scelta dell'epoca di raccolta (Figura 8).

	A	B	C	D	E
1					
2					
3					
4					
5					
6		Tipo di produzione	Fibra		
7		Vuoi scegliere una varietà in particolare?	Si		
8		Quale varietà vorresti coltivare?	Felina34-08		
9		In quale anno vorresti coltivare?	2024		
10		Miri a seminare ad una data o in un intervallo di data in particolare?	No		
11					
12					
13		Hai una data o un intervallo di data fra cui vuoi raccogliere?	Si		
14		Fra quando e quando vuoi raccogliere? fra:	15/07/2024	< > juillet 2024	
15		e:			
16		C'è una data prima prima di cui vuoi avere tolto la canapa del campo?	No		
17					
18					
19					
20					
21					
22					

di	lu	ma	me	je	ve	sa
30	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			
4	5	6	7			

Run

Figura 8. Calendario di scelta delle date di raccolta.

- 6- **“C’è una data prima di cui vuoi avere tolto la canapa del campo?”**: l’utente deve indicare se desidera avere imballato e portato la canapa via del campo prima di una data per poter procedere con la lavorazione del terreno per le colture successive. Come per le domande precedenti, appare un calendario per scegliere la data utile per l’utente.

Una volta che l’utente ha fatto tutte le scelte deve premere il pulsante **“Run”** che si trova al di sotto delle domande (Figura 9) e sarà necessario aspettare alcuni secondi. Sono previsti vari messaggi di errore per indicare all’utente se ci sono contraddizioni nelle scelte fatte e come procedere per risolvere il problema. Un errore potrebbe essere ad esempio che l’utente indica che vuole scegliere una data di semina senza aver scelto le date o solamente una.

	A	B	C
1			
2			
3			
4			
5			
6		Tipo di produzione	Fibra
7		Vuoi scegliere una varietà in particolare?	Si
8		Quale varietà vorresti coltivare?	Carmagnola-08
9		In quale anno vorresti coltivare?	2024
10		Miri a seminare ad una data o in un intervallo di data in particolare?	Si
11		fra:	10/04/24
12		e:	10/04/24
13		Hai una data o un intervallo di data fra cui vuoi raccogliere?	No
14			
15			
16		C'è una data prima di cui vuoi avere tolto la canapa del campo?	No
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			




Figura 9. Premere il pulsante "Run" dopo avere fatto i scelte nell'interfaccia.

Il principio di funzionamento del DSS è abbastanza semplice: il dataset che contiene tutti gli outputs del modello combinato viene filtrato per mantenere solamente le situazioni che corrispondono alle scelte dall'utente. Ad esempio, se l'utente ha scelto un'epoca di semina fra il 6 aprile 2024 e l'8 aprile 2024, tutti gli outputs che sono basati su date di semina precedenti al 6 di aprile o posteriore al'8 aprile 2024 vengono eliminati. A seconda della funzionalità scelta dall'utente (riferimento Tabella 13), diversi trattamenti statistici vengono poi elaborati per presentare l'output del DSS.

Di seguito vengono rappresentati i diversi tipi di output per ciascuna funzionalità.

- 1- Nella prima funzionalità, in cui l'utente sceglie la varietà e la data di semina, si generano due grafici (Figura 10). Il primo presenta la probabilità di occorrenza della data di raccolta idonea (sia data di piena fioritura per la sola produzione di Fibra, sia data di maturità del seme per la duplice attitudine produttiva di steli e semi) per ogni data in cui può avvenire. Nell'esempio riportato in Figura 10, la data di piena fioritura è attesa tra il 31 luglio e il 3 agosto per la varietà Futura 77 seminata il 10 di aprile. Il secondo grafico presenta le classi di resa di steli attesa con la probabilità legata ad ognuna. Nell'esempio della Figura 10, la resa di steli è attesa tra 6.71 Mg ha^{-1} e 7.68 Mg ha^{-1} e la resa la più probabile si trova tra 7.29 e 7.49 Mg ha^{-1} , con una probabilità del 33 %. Nel caso in cui la tipologia produttiva selezionata è la duplice attitudine produttiva (steli e semi), si genererà anche un grafico che rappresenta la resa attesa di semi.

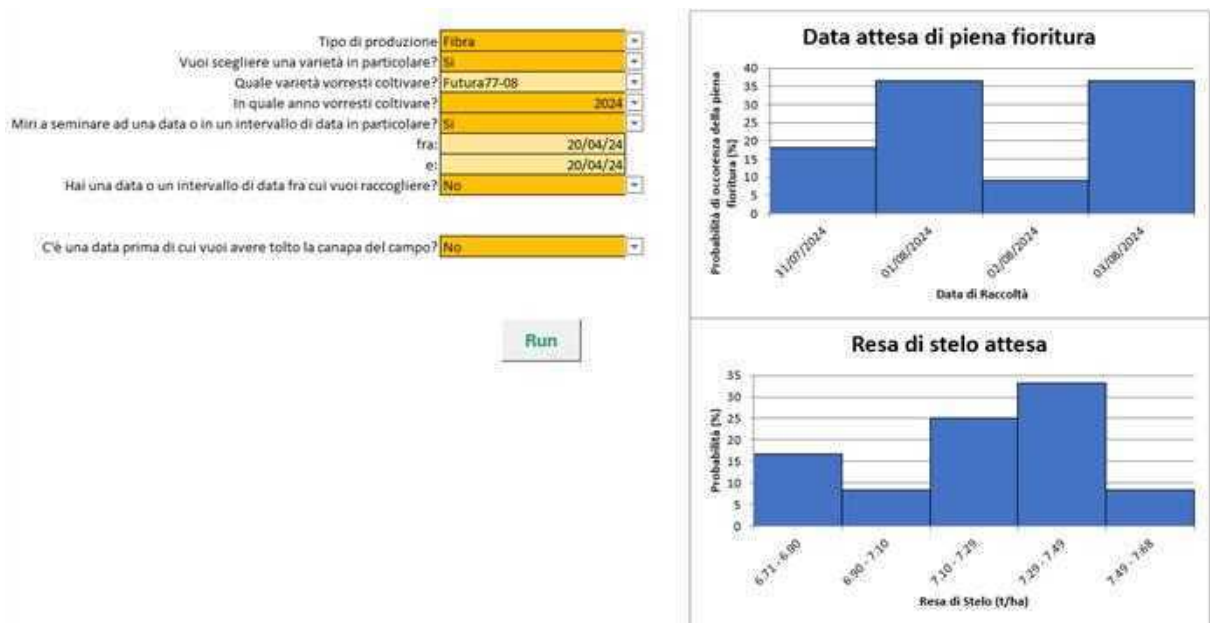


Figura 10. Esempio di informazione fornita dal DSS per la funzionalità n° 1.

- 2- Per la seconda funzionalità, in cui viene scelta la varietà e l'epoca di raccolta, si genera un grafico con la probabilità di raggiungere la piena fioritura (o la maturità del seme se viene scelta la duplice attitudine produttiva) nell'intervallo di date richiesto. Nell'esempio della Figura 11, le date di semina della varietà Futura 77 che permettono di raggiungere la piena fioritura fra il 29 di luglio e il 2 di agosto vanno dal 1 di marzo fino al 24 di maggio, fra tutte le 11 anni di simulazione del modello fenologico. Però quando seminata lo 1 di marzo, la canapa ha raggiunto la piena fioritura nell'intervallo di date richiesto solamente una volta sulle 11 anni di simulazione, portando la probabilità a 9.09 % e questa data non è consigliata. Sono invece consigliate date di semina con un'alta probabilità di raggiungere la piena fioritura nell'intervallo di date richiesto, e nell'esempio della Figura 11, una semina fra il 14 e il 18 di aprile porta la probabilità di raggiungere la piena fioritura fra il 29 di luglio e il 2 di agosto a 100 %.

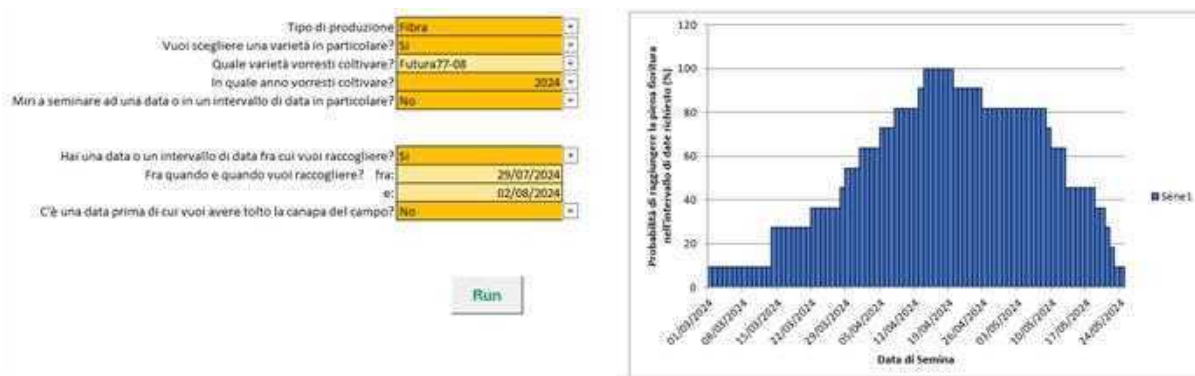


Figura 11. Esempio di output ottenuto in uscita del DSS per la funzionalità n°2.

- 3- Per la terza funzionalità in cui viene solamente scelta la varietà, il DSS provvede un consiglio per l'intervallo di date di semina sotto forma di testo (verde su fondo nero per catturare l'attenzione dell'utente), e due grafici (tre nel caso in cui la tipologia produttiva selezionata è la duplice attitudine produttiva di steli e semi). Nell'esempio della Figura 12, la varietà Futura 77 è consigliata essere seminata fra il 29 di marzo e il 7 di aprile per una sola produzione di fibra. Seminando in questo intervallo, sono attendibile delle date di piena fioritura fra il 18 di luglio e il 2 di agosto, la data più probabile essendo il primo di agosto. Come nell'ambito della funzionalità n°1, viene presentato una resa attesa di steli (o di semi nel caso di una duplice attitudine produttiva).

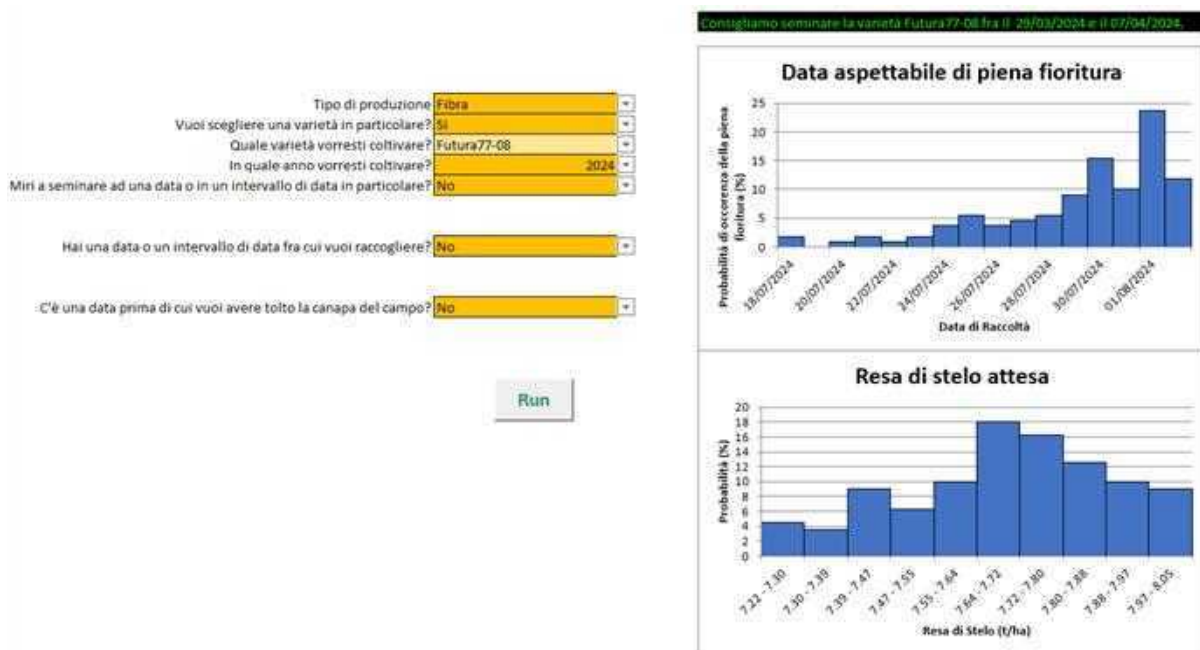


Figura 12. Esempio di output in uscita del DSS per la terza funzionalità.

Bibliografia

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.

- Amaducci, S., Colauzzi, M., Bellocchi, G., Venturi, G., 2008. Modelling post-emergent hemp phenology (*Cannabis sativa* L.): Theory and evaluation. *European Journal of Agronomy* 28, 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.05.006>
- Amaducci, S., Colauzzi, M., Bellocchi, G., Cosentino, S.L., Pakkala, K., Stomph, T.J., Westerhuis, W., Zatta, A., Venturi, G., 2012. Evaluation of a phenological model for strategic decisions for hemp (*Cannabis Sativa* L.) biomass production across European sites. *Industrial Crops and Products* 37, 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.11.012>
- Colauzzi, M., Serra, P., Amaducci, S., 2018. Variety earliness effect on field drying of biomass sorghum. *Biomass and Bioenergy* 115, 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.011>
- Forsythe, W.C., Rykiel, E.J., Stahl, R.S., Wu, H., Schoolfield, R.M., 1995. A model comparison for daylength as a function of latitude and day of year. *Ecological Modelling* 80, 87–95. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(94\)00034-F](https://doi.org/10.1016/0304-3800(94)00034-F)
- Nilsson, D., Karlsson, S., 2005. A Model for the Field Drying and Wetting Processes of Cut Flax Straw. *Biosystems Engineering* 92, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.05.008>
- Nilsson, D., Svennerstedt, B., Wretfors, C., 2005. Adsorption Equilibrium Moisture Contents of Flax Straw, Hemp Stalks and Reed Canary Grass. *Biosystems Engineering* 91, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.02.010>
- Padfield, D., Matheson, G. 2023. *nls.multstart*. Find the best fit of non-linear model based on AIC scores. <https://cran.r-project.org/web/packages/nls.multstart/nls.multstart.pdf>
- Tang, K., Struik, P.C., Yin, X., Thouminot, C., Bjelková, M., Stramkale, V., Amaducci, S., 2016. Comparing hemp (*Cannabis sativa* L.) cultivars for dual-purpose production under contrasting environments. *Industrial Crops and Products* 87, 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.026>
- Voltaire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Méliá, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, M.-P., Planton, S., Saint-Martin, D., Szopa, S., Tyteca, S., Alkama, R., Belamari, S., Braun, A., Coquart, L., Chauvin, F., 2013. The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Clim Dyn* 40, 2091–2121. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1259-y>

Allegato 1. Valori di calibrazione del modello di essiccamento e diversi indicatori di qualità del modello, per ciascuna USS.

SEU	hd	w	AIC	BIC	Deviance	Degree.of.Freedom	convergence.tolerance	log.likelihood	estmtd.std.error.rsdls	RMSE	NRMSE	shapiro.wilk.p.value	Condizione
SEU_1	10.1	4.4	-50.5	-46.7	0.2	24	1.5 e-8	28.2	0.08	0.082	11.1	0.8	F75_SWD1_SD45
SEU_2	10.9	4.2	-58.4	-54.7	0.1	24	1.5 e-8	32.2	0.07	0.07	9.8	0.7	F75_SWD1_SD45
SEU_3	12	4.3	-55.5	-51.8	0.1	24	1.5 e-8	30.8	0.08	0.074	12.5	0.2	F75_SWD1_SD45
SEU_4	10.8	4.2	-45.5	-41.8	0.2	24	1.5 e-8	25.8	0.09	0.09	12.9	1	F75_SWD1_SD45
SEU_5	11.5	3.9	-40	-36.3	0.3	24	1.5 e-8	23	0.1	0.1	13.7	1	F75_SWD1_SD45
SEU_6	5.1	10.3	-44.2	-40.4	0.2	24	1.5 e-8	25.1	0.1	0.092	15.6	0.5	F75_SWD2_SD45
SEU_7	5.8	8	-54.1	-50.3	0.2	24	1.5 e-8	30.1	0.08	0.076	10.5	0.7	F75_SWD2_SD45
SEU_8	5.7	9	-55.6	-51.8	0.1	24	1.5 e-8	30.8	0.08	0.074	11.4	0.2	F75_SWD2_SD45
SEU_9	5.6	8.3	-52.5	-48.7	0.2	24	1.5 e-8	29.2	0.08	0.079	12	1	F75_SWD2_SD45
SEU_10	4.7	14.2	-55.4	-51.7	0.1	24	1.5 e-8	30.7	0.08	0.074	11.9	0.9	F75_SWD2_SD45
SEU_11	18	7.1	-53.8	-50	0.2	24	1.5 e-8	29.9	0.08	0.077	11.8	0.6	F75_SWD3_SD45
SEU_12	18.4	7.7	-53.8	-50	0.2	24	1.5 e-8	29.9	0.08	0.077	12.2	0.5	F75_SWD3_SD45
SEU_13	17	7.6	-54.7	-51	0.1	24	1.5 e-8	30.4	0.08	0.075	11.9	0.6	F75_SWD3_SD45
SEU_14	19.4	6	-49.5	-45.7	0.2	24	1.5 e-8	27.7	0.09	0.083	12.2	0.8	F75_SWD3_SD45
SEU_15	17.5	6.9	-50.9	-47.1	0.2	24	1.5 e-8	28.4	0.08	0.081	11.8	0.4	F75_SWD3_SD45
SEU_16	9.6	4.6	-55.1	-51.4	0.1	24	1.5 e-8	30.6	0.08	0.075	9.9	0.6	F79_SWD1_SD45
SEU_17	10.6	4.3	-60.6	-56.9	0.1	24	1.5 e-8	33.3	0.07	0.067	10.2	1	F79_SWD1_SD45
SEU_18	9.9	4.1	-53.9	-50.2	0.2	24	1.5 e-8	30	0.08	0.076	10.6	0.6	F79_SWD1_SD45
SEU_19	10.5	4.4	-52.4	-48.6	0.2	24	1.5 e-8	29.2	0.08	0.079	10.9	0.5	F79_SWD1_SD45
SEU_20	10	4.5	-53	-49.2	0.2	24	1.5 e-8	29.5	0.08	0.078	10.8	0.8	F79_SWD1_SD45
SEU_21	4.9	9.9	-52	-48.3	0.2	24	1.5 e-8	29	0.08	0.079	11.1	0.3	F79_SWD2_SD45
SEU_22	4.9	9.4	-58.3	-54.5	0.1	24	1.5 e-8	32.2	0.07	0.07	9.7	0.8	F79_SWD2_SD45
SEU_23	4.2	15.6	-47.1	-43.4	0.2	24	1.5 e-8	26.6	0.09	0.087	12.6	0.1	F79_SWD2_SD45
SEU_24	5.1	12.2	-58.5	-54.7	0.1	24	1.5 e-8	32.3	0.07	0.07	10.2	0.3	F79_SWD2_SD45
SEU_25	4.9	14	-48.9	-45.1	0.2	24	1.5 e-8	27.4	0.09	0.084	12.6	0.1	F79_SWD2_SD45
SEU_26	16.2	7.3	-49.9	-46.1	0.2	24	1.5 e-8	27.9	0.09	0.083	11.7	0.4	F79_SWD3_SD45
SEU_27	14.8	6.4	-50.8	-47	0.2	24	1.5 e-8	28.4	0.08	0.081	10.7	0.8	F79_SWD3_SD45
SEU_28	22.1	6.5	-51.3	-47.5	0.2	24	1.5 e-8	28.6	0.08	0.08	12.9	0.5	F79_SWD3_SD45
SEU_29	17.8	7.7	-48.9	-45.1	0.2	24	1.5 e-8	27.4	0.09	0.084	12.6	0.5	F79_SWD3_SD45
SEU_30	14.8	8.5	-51.9	-48.2	0.2	24	1.5 e-8	29	0.08	0.079	11.4	0.2	F79_SWD3_SD45
SEU_41	5.2	13.2	-71.6	-67.8	0.1	24	1.5 e-8	38.8	0.06	0.054	12.2	0.1	F75_SWD2_SD22
SEU_42	3.9	13.7	-65.6	-61.8	0.1	24	1.5 e-8	35.8	0.06	0.061	12.4	0	F75_SWD2_SD22
SEU_43	1.9	14.5	-65.2	-61.4	0.1	24	1.5 e-8	35.6	0.06	0.062	12.4	0.1	F75_SWD2_SD22
SEU_44	19.2	9.7	-58	-54.2	0.1	24	1.5 e-8	32	0.07	0.071	13.6	0.1	F79_SWD2_SD22
SEU_45	4.7	12.4	-71	-67.3	0.1	24	1.5 e-8	38.5	0.06	0.055	10.1	0	F79_SWD2_SD22
SEU_46	5	8.6	-62.7	-58.9	0.1	24	1.5 e-8	34.3	0.07	0.065	10.4	0.7	F75_SWD2_SD60
SEU_47	5.1	14.2	-61.7	-57.9	0.1	24	1.5 e-8	33.8	0.07	0.066	11.4	0.1	F75_SWD2_SD60
SEU_48	5.2	12.7	-58.4	-54.6	0.1	24	1.5 e-8	32.2	0.07	0.07	10.9	0.2	F75_SWD2_SD60
SEU_49	5.3	13.5	-58.7	-54.9	0.1	24	1.5 e-8	32.4	0.07	0.07	11.8	0	F79_SWD2_SD60
SEU_50	5	14.4	-60.8	-57.1	0.1	24	1.5 e-8	33.4	0.07	0.067	11.5	0	F79_SWD2_SD60

Relazione tecnico scientifica finale progetto “Multi-canapa)

L’obiettivo generale del progetto era creare le condizioni tecniche, economiche e di mercato per sostenere lo sviluppo di una filiera per la produzione di canapa multiuso in Emilia Romagna.

Sommario

La canapa (*Cannabis sativa* L.) è considerata una coltura ad alto rendimento che fornisce materie prime per un gran numero di prodotti finali. Al giorno d’oggi, la crescente domanda di sistemi di produzione più sostenibili ha portato un rinnovato interesse per questa coltura. Nonostante l’aumento, la superficie totale coltivata a canapa è ancora relativamente piccola se paragonata alla maggior parte delle colture da pieno campo coltivate in Europa. Il mercato europeo delle fibre di canapa può considerarsi pressochè stagnante, mentre i mercati dei semi e dei metaboliti secondari hanno registrato un aumento notevole dal 2010. Per sostenere la crescita sostenibile del mercato europeo delle fibre di canapa, gli steli di canapa dovrebbero essere valorizzati con filiere dedicate, specifiche tecniche agronomiche e sistemi di raccolta e prima trasformazione delle materie prime ottimizzata. Il progetto mira a valutare la sostenibilità tecnica della reintroduzione della coltura in areali storicamente vocati, utilizzando sistemi di meccanizzazione di adeguato livello tecnologico, non necessariamente prototipale o sperimentale prevedendo per la raccolta tradizionali operazioni di taglio, essiccazione in campo, andanatura, imballaggio ed idonea catena logistica per il processo industriale. La canapa non è una nuova coltura per la regione Emilia-Romagna ma vanta un glorioso passato come coltura da rinnovo solo che la sua reintroduzione in superfici contenute difficilmente potrà sfruttare le migliori potenzialità tecnologiche disponibili ma richiederà almeno inizialmente livelli tecnologici contenuti e spesso mutuati da dotazioni agromeccaniche disponibili nei singoli areali e per questo il progetto mira all’impiego con adeguamento di tecnologie mature o prototipazioni di relativa semplicità costruttiva.

L’attività nei due anni di sperimentazione ha visto l’impiego di due varietà di canapa, due tecnologie prevalenti di raccolta eseguite presso due aziende agricole emiliano-romagnole con raccolta della fibra al momento idoneo di maturazione e per lo scopo previsto. L’obiettivo iniziale per la fibra riguardava l’uso industriale. Le piante di canapa falciate in piena fioritura e lasciate ad essiccare non in andana ma omogeneamente distribuite sul profilo superficiale del terreno sono state successivamente andanate e poi ridotte in rotoballe per la successiva lavorazione industriale di estrazione della fibra. Al momento della raccolta le piante risultavano di altezza piuttosto omogenea ed idonea alla raccolta meccanizzata e la successiva imballatura senza compromettere la produttività del raccolto. Il periodo di essiccazione in campo è stato di circa 40 giorni, reputato adeguato per l’ottenimento di una sufficiente stabilizzazione della biomassa in termini di umidità con possibilità di ottenere balle stabili ed omogenee. Il primo anno ha visto l’impiego di un prototipo di pezzatrice all’estero già disponibile in versione commerciale e quindi da intendersi come tecnologia matura. Il raccolto è stato tagliato in tre sezioni utilizzando una macchina prototipo portata anteriormente a trattore brevettata dall’Università di Bologna (UNIBO). Per completare le operazioni di raccolta sono stati utilizzati andanatori e rotopresse convenzionali, opportunamente regolati. I tempi di lavoro registrati ed elaborati si sono mostrati in linea con quelli delle altre colture agricole tradizionali foraggere gestite con la medesima tipologia di raccolta tramite fienagione. I cantieri utilizzati ed il prodotto ottenuti ed i relativi aspetti qualitativi si sono mostrati adeguati alla coltura della canapa con senza segnalare danneggiamenti alla produzione, perdite significative od altre problematiche funzionali quali intasamenti di organi ed apparati o cedimenti strutturali. L’utilizzo di macchine agricole parzialmente modificate ha comportato una diminuzione degli investimenti iniziali in macchine ed attrezzature rispetto allo sviluppo ed impiego di macchine specifiche.

Relazione

La canapa (*Cannabis sativa* L.) è considerata una delle piante coltivate più antiche, utilizzata da secoli per l'alto contenuto di cellulosa delle fibre con la più ampia possibilità di impiego [1]. Il declino della coltivazione della canapa, a partire dagli anni '60, fu determinato soprattutto dall'adesione di 97 nazioni al Protocollo sulla Convenzione Unica sugli Stupefacenti proposto dalle Nazioni Unite, firmato a New York il 30 marzo 1961 [2]. Oltre alla restrizione legata al composto psicoattivo, il declino della coltivazione della canapa fu determinato anche dall'avvento di materie prime più economiche come il cotone grezzo e la fibra sintetica che ne determinarono la scomparsa a favore di nuove colture di maggiore interesse economico per le industrie. Al giorno d'oggi, la crescente domanda di sistemi di produzione più sostenibili ha portato un rinnovato interesse per questa coltura [3, 4]. La canapa è oggi considerata una coltura ad alto rendimento con particolari caratteristiche agronomiche, che fornisce materie prime adatte ad un'ampia varietà di applicazioni industriali [5]. La superficie dedicata alla coltivazione della canapa ha registrato un aumento del 75% nell'UE tra il 2015 e il 2019. La Francia è il maggiore produttore, rappresentando oltre il 70% della produzione dell'UE, seguita dai Paesi Bassi (10%) e dall'Austria (4%) [6]. Nonostante l'aumento, l'area totale coltivata a canapa è ancora relativamente piccola rispetto alla maggior parte delle colture di base in Europa, come grano, mais, colza, patate o barbabietola da zucchero [7]. Al giorno d'oggi la canapa, tradizionalmente raccolta in piena fioritura per ottimizzare l'estrazione di fasci di fibre lunghe, viene raccolta principalmente alla maturità dei semi per applicazioni a duplice scopo [8] e ha un grande potenziale come coltura multiuso [9] o per la produzione di semi specifici [10]. Inoltre, come per altre colture erbacee per le quali sono state sviluppate o adattate nuove macchine per semplificare e migliorare la gestione dell'intera coltura al fine di aumentare la biomassa ottenibile [11, 12, 13, 14, 15], la canapa può avere diverse potenziali forme di valorizzazione, sia come semi che come frazioni residue in aggiunta alla tradizionale produzione di fibra, in un moderno concetto di economia circolare [16]. Il mercato europeo della fibra di canapa è stagnante se paragonato al mercato in crescita dei semi di canapa e della fito-cannabina. La produzione di semi è aumentata del 92% tra il 2010 e il 2013, mentre la produzione di fibre e canapulo non ha mostrato alcuna differenza significativa. Sono disponibili diverse esperienze sulla raccolta dei semi e sull'efficienza delle macchine, sul miglioramento dell'olio e sui sistemi di raccolta per fibre ad uso prettamente industriale [17, 18]. Inoltre, gli steli di canapa sono in realtà considerati un sottoprodotto nella produzione di fiori e foglie per il mercato del CBD, fonte di notevole profitto extra per gli agricoltori [19]. Per supportare una crescita sostenibile del mercato delle fibre di canapa, le tecniche agronomiche e di raccolta, nonché la lavorazione post-raccolta, dovrebbero essere ottimizzate per preservare la qualità delle fibre, consentendo la lavorazione industriale e mantenendo, o addirittura aumentando, le effettive applicazioni delle fibre e migliorando le applicazioni ad alto valore aggiunto. Il processo di separazione e pulizia delle fibre potrebbe anche richiedere un'attività di ricerca per definire le forze per ottimizzare il processo senza danneggiare la qualità della fibra, secondo un approccio già adottato sulla raccolta della frutta [20]. Le strategie di raccolta possono differire in relazione al tipo di condizionamento previsto per la materia prima (sfuso, condizionato, tritato) e al tipo di stoccaggio (balle accatastate, tritato umido, insilato) [21, 22]. Per ridurre i costi di raccolta e semplificare le operazioni meccaniche, lo scopo della ricerca era valutare la sostenibilità tecnica di un sistema di meccanizzazione tradizionale per la raccolta della canapa da fibra che prevede il taglio, l'avvolgimento, l'imballaggio e il trasporto del raccolto presso impianti di prima lavorazione prettamente industriali. Il sistema di raccolta deve soddisfare i seguenti obiettivi e risolvere le criticità: a, definizione della dimensione ottimale delle piante per migliorare raccolta e resa; b, prestazione nel taglio dello stelo rispetto alla sua grande durezza; c, evitare l'avvolgimento delle fibre sulle parti della macchina; d, durata adeguata dell'essiccazione sul campo per preservare la qualità della biomassa

dopo la pressatura del raccolto; e, riduzione dei tempi di lavoro per garantire l'economicità delle macchine; f, materia prima adeguata per la trasformazione industriale. Il sistema di meccanizzazione proposto prevede l'utilizzo di macchine convenzionali o parzialmente modificate adatte alla raccolta della canapa, in un'ottica di riduzione dei costi.

Il progetto ha visto l'impiego di due linee di raccolta di cui una sperimentale ed una utilizzando linee tradizionali, due colture a confronto il tutto realizzato presso aziende specializzate in colture di pieno campo cerealicolo ed industriale della provincia di Ferrara (Fe). I campi sperimentali sono stati realizzati nel 2021 in due aziende agricole situate nel Nord Italia: Bergonzini (44°91'53.12"N, 11°86'67.28"E) e Succi (44°84'99.33"N, 12°13' 77,45"E). Nelle due aziende agricole sono state valutate due varietà di canapa industriale, Felina 32 e Futura 75. Le varietà selezionate sono monoiche e sono costituite in Francia per la produzione a doppia destinazione (fibra destinata all'industria della carta e sementi). Entrambe le varietà, se coltivate nel Sud Europa, hanno fioritura medio-tardiva con la piena fioritura in agosto e la maturazione del seme in settembre con Felina 32 leggermente in anticipo rispetto a Futura 75. Nell'azienda Bergonzini la superficie coltivata era di 4686 m² per Felina 32 e 5122 mq per Futura 75; nell'azienda Succi la superficie coltivata era di 5130 mq per Felina 32 e 4860 mq per Futura 75. In entrambe le aziende la coltura precedente era il grano. La semina è avvenuta il 13 e il 18 aprile rispettivamente nei poderi Bergonzini e Succi. La coltura è stata seminata con un interfilare di 15 cm ad una profondità di 3 cm per una densità target di 150 piante m⁻². Solo nell'azienda Bergonzini il campo è stato concimato in fase di preparazione del letto di semina con 40 kg N ha⁻¹. Il raccolto della canapa è avvenuto all'inizio di agosto, quando il raccolto era nella fase di piena fioritura, la fase di sviluppo con la massima qualità di fibra. Il campionamento sperimentale è stato effettuato considerando 3 aree da un metro quadrato individuate casualmente nei campi. Le piante sono state tagliate a livello del suolo per ottenere la massima resa potenziale di biomassa. Per ciascun campione sono stati misurati il numero di piante e il peso fresco della biomassa totale. Per la determinazione dell'umidità di raccolta i campioni di biomassa raccolta sono stati essiccati in un forno a una temperatura di 105°C per 48 ore fino al raggiungimento del peso costante per stimare la biomassa secca totale nel campo [23]. La raccolta meccanizzata è stata effettuata in tre fasi: falciatura, andanatura e pressatura dopo l'essiccazione del campo. Le colture sono state falciate utilizzando un prototipo brevettato da UNIBO, composto da due barre falcianti frontali bilama, azionate da un motore idraulico e con un sistema di livellamento indipendente che controlla la dimensione delle sezioni di taglio. Il prototipo è stato sviluppato dall'Università di Bologna (UNIBO) e dalla DCM Italia s.r.l. (Borgo Val di Taro, PR, Italia). Alla barra falciante bilama è stata accoppiata sullo stesso trattore una barra falciante singola portata posteriormente (GS Superior 402 - Gribaldi & Salvia Spa) per ottenere le tre altezze di canapa desiderate. La larghezza di lavoro della falciatrice era di 1,80 m. Lo sfalcio della coltura è avvenuto il 4 agosto nel podere Bergonzini e l'11 agosto nel podere Succi; l'andanatura è stata effettuata subito dopo il periodo di essiccazione poco prima dell'imballatura finale. L'andanatura è stata effettuata con un andanatore rotante modello FCR 86 (F.C.R. Costruzioni Macchine Agricole) con larghezza di lavoro di 3 m. La pressatura è stata effettuata l'8 settembre nell'azienda agricola Bergonzini e il 21 settembre nell'azienda agricola Succi con una pressa a camera variabile, modello Kuhn VB 2190 e Feraboli Xtreme 265, rispettivamente. L'intero ciclo di raccolta, ad eccezione dell'operazione di raccolta eseguita con il prototipo UNIBO, è stato eseguito utilizzando la catena di meccanizzazione convenzionale per il processo di fienagione senza modifiche specifiche dei macchinari. Non è stata effettuata alcun rivoltamento intermedio della biomassa e l'andanatura è stata effettuata con un rastrello monorotore mentre per l'operazione di pressatura sono state utilizzate presse a camera variabile senza denotare particolari adeguamenti funzionali o evidenziare problematiche di rilievo. Tutte le balle ottenute sono state misurate e poi pesate direttamente in campo al momento del carico con specifico dinamometro. Il contenuto di umidità è stato determinato su base

umida, raccogliendo campioni di circa 2 kg di biomassa da una balla sia per le varietà che per le aziende agricole.

La coltura della canapa è caratterizzata da un'elevata variabilità e competizione intraspecifica [24] che si traduce in ampie differenze all'interno dello stesso appezzamento in termini di densità e altezza delle piante. Tuttavia, il raccolto era ben consolidato in entrambe le aziende. La densità di impianto nell'azienda Succi è risultata mediamente inferiore a quella dell'azienda Bergonzini, 23,1% per Futura e 57,6% per Felina (Tabella 1). Di conseguenza, le rese stimate di biomassa secca erano in media inferiori nell'azienda Succi rispetto all'azienda Bergonzini (6,0% in Futura e 24,5% in Felina).

Table I: Hemp traits at harvest (mean \pm Std.dev.)

A		
Bergonzini farm		
Variety	Futura 75	Felina 32
Density	68.0 \pm 8.2	101.3 \pm 26.5
Height	222.9 \pm 59.9	188.5 \pm 40.4
EDY	13.3 \pm 1.1	10.6 \pm 2.8
B		
Succi farm		
Variety	Futura 75	Felina 32
Density	52.3 \pm 11.5	43.0 \pm 4.6
Height	209.2 \pm 57.8	179.8 \pm 39.6
EDY	12.5 \pm 3.9	8.0 \pm 2.2

Density: plant density n. m⁻²; Height: plant height (cm);
EDY: Estimated dry yield (Mg ha⁻¹)

Nonostante la stessa densità di semina nell'azienda Succi la canapa ha mostrato una densità di pianta inferiore rispetto all'azienda Bergonzini, ciò potrebbe essere correlato alla competizione intraspecifica per i nutrienti che potrebbe causare la morte delle piante deboli [1, 23, 25]. I tratti biometrici influenzano la raccolta e la lavorazione post-raccolta, come aumento del carico di compressione e del fabbisogno energetico all'aumentare del diametro dello stelo [26]. La raccolta è stata effettuata il 4 agosto nel podere Bergonzini con una velocità di lavoro di 4,5 km h⁻¹ e l'11 agosto nel podere Succi con una velocità di lavoro di 7,5 km h⁻¹. La differenza nella velocità di lavoro registrata nelle due aziende è stata conseguente ad un assetto inadeguato della barra falciante posteriore nella prima azienda rispetto a quello risolto al momento della raccolta nell'azienda Succi. L'andanatura è stata effettuata ad una velocità di 5 km h⁻¹ con andane distanziate di 5,5 m. La pressatura è stata effettuata con una rotopressa Kuhn VB 2190 che ha lavorato alla velocità di 5 km h⁻¹ e una rotopressa Feraboli Xtreme 265 che ha lavorato alla velocità di 5,5 km h⁻¹. Nell'azienda agricola Bergonzini sono state raccolte 15 rotoballe per la varietà Futura e 9 rotoballe per la varietà Felina, per un totale di 6,7 Mg di biomassa; mentre nell'azienda agricola Succi sono state raccolte 16 rotoballe per la varietà Futura e 13 rotoballe per la varietà Felina per un totale di 7,7 Mg di biomassa. Una produzione del 55,3% rispetto alla resa secca stimata è stata registrata per Futura e 45,5% per Felina nell'azienda Bergonzini, mentre differenze minori si sono ottenute nell'azienda Succi, 62,9% per Futura e 75,7% per Felina. Le differenze tra le rese secche stimate e le rese ottenute sono il risultato delle perdite della raccolta meccanizzata; inoltre, le maggiori perdite osservate nell'azienda Bergonzini potrebbero essere spiegate come conseguenza di steli di canapa più sottili che vengono

sciolti durante il processo di andanatura e pressatura. I tempi di lavoro erano in linea con le altre colture agricole tradizionali e gli aspetti qualitativi della canapa raccolta erano adeguati, senza danni o intasamenti. Il periodo di raccolta (inizio agosto) ha dato come risultato piante con un'altezza adeguata per la raccolta meccanizzata e la successiva pressatura senza compromettere la produttività del raccolto, mentre il periodo di essiccazione in campo è stato adeguato per ridurre il contenuto di umidità per uno stoccaggio a lungo termine delle balle. Le convenzionali attrezzature per la fienagione integrate con un sistema di taglio doppio frontale semplificato si sono rivelate adeguate per la raccolta della canapa. La possibilità di adattare lo stesso sistema di raccolta per più colture ne aumenterà l'utilizzo durante il periodo di raccolta consentendo una riduzione dei costi fissi delle macchine di raccolta per unità di materia prima. La linea di meccanizzazione semplificata proposta potrebbe essere di potenziale interesse per le piccole aziende agricole che si avvicinano alla coltivazione della canapa. Inoltre, poiché il prodotto finale può essere confezionato otoballe il trasporto allo stabilimento di lavorazione è in gran parte consolidato ed economicamente sostenibile.

Nel secondo anno 2022 si è valutato anche la stabilità produttiva nei medesimi areali e l'influenza delle condizioni pedoclimatiche sulla produzione e sui cantieri di lavoro utilizzati. Mentre nel 2021 si erano valutate due varietà, nel 2022 se ne è valutata solo una sia in rotazione sia in monocoltura.

Nel 2022 nelle stesse due aziende agricole del 2021 è stata coltivata la stessa varietà Futura 75. Nella stagione 2022 nell'azienda agricola Bergonzini la superficie coltivata per Felina 75 era di 9802 m² e per Succi la superficie coltivata totale era di 2030 m². La semina è avvenuta il 13 e il 18 aprile rispettivamente nei poderi Bergonzini e Succi nella stagione 2021 e rispettivamente il 20 e 18 aprile nella stagione 2022. La coltura è stata seminata con un interfilare di 15 cm ad una profondità di 3 cm per una densità target di 150 piante m⁻². Il campo è stato concimato in fase di preparazione del letto di semina con 40 kg N ha⁻¹ solo nell'azienda Bergonzini, mentre nella stagione 2022 non sono state concimate in nessuna delle due aziende. La raccolta della canapa è iniziata sempre all'inizio di agosto quando il raccolto era nella fase di piena fioritura. Il campionamento sperimentale è stato effettuato considerando 3 aree da un metro quadrato individuate casualmente nei campi. Le piante sono state tagliate a livello del suolo per ottenere la massima resa potenziale di biomassa. Per ciascun campione sono stati misurati il numero di piante e il peso fresco della biomassa totale. La biomassa raccolta è stata essiccata in un forno a una temperatura di 105°C per 48 ore fino al raggiungimento del peso costante per stimare la biomassa secca totale sul campo. La raccolta meccanizzata è stata effettuata sempre in tre fasi: falciatura, andanatura e imballatura con le ultime due operazioni eseguite dopo l'essiccazione del campo. Le colture sono state falciate nel 2022 con una falciatrice a lama alternata tradizionalmente impiegata per foraggi. Dettaglio della falciatrice adottata nella stagione 2022 negli allevamenti Bergonzini e Succi. L'intero ciclo di raccolta, ad eccezione dell'operazione di raccolta eseguita con il prototipo UNIBO, è stato eseguito utilizzando la catena di meccanizzazione convenzionale per il processo di fienagione senza modifiche specifiche dei macchinari soprattutto in termini di falciatrici, andanatrici e imballatrici. Anche nel 2022 per il contenimento dei costi di raccolta non è stata effettuata la rivoltatura della biomassa e l'andanatura è stata effettuata con le medesime macchine del 2021 ed analogo approccio si è seguito per la rotoimballatura utilizzando macchine a camera variabile senza denotare problematiche di rilievo in entrambi gli anni. Le condizioni meteorologiche del periodo di raccolta sono state ottenute dalla stazione meteorologica del comune di Ferrara (Fe, Italia), appartenente alla rete regionale di monitoraggio ambientale (ARPAE). È stata calcolata la capacità effettiva del campo, Ca [18] (Eq. 1). Ca (ha h⁻¹) = $0,1 \cdot s \cdot w \cdot Ef$ (Eq. 1) Dove: s = velocità sul campo (km h⁻¹) w = larghezza di lavoro operativa (m) Ef = efficienza sul campo, considerando il tempo richiesto per le svolte e le manovre alle estremità del campo [28]. I costi dei macchinari sono stati calcolati includendo i costi fissi e variabili della

macchina [27;29]. L'ammortamento semplice annuo è stato determinato considerando un'aliquota del 4,0% sull'investimento medio. I costi di assicurazione e rimessaggio, sono stati calcolati come percentuale del prezzo di acquisto (Tabella 1) e, per i costi di riparazione e manutenzione, si è fatto riferimento a indici di riparazione e manutenzione RF1 e RF2 [30]. La retribuzione del conducente del trattore è stata inclusa nel costo orario totale di € 45 (trattore kW 50) e € 65 (trattore kW 120) all'ora che tiene conto sia del prezzo del trattore che del compenso del conducente [31].

Figura 1 – Andamento climatico nei due anni di sperimentazione 2021-2022



I dati meteorologici evidenziati nella figura 1 sono risultati caratterizzati da importanti differenze in termini di precipitazioni con completa assenza di eventi piovosi tra giugno luglio e agosto 2022. La temperatura media (Tm) non evidenzia differenze significative tra i due anni di prova sul campo.

Lo stress idrico mostrato in figura può influenzare la coltivazione della canapa in termini di densità e altezza. L'assenza di pioggia non è però da attribuire ad una mancanza di precipitazioni ma ad una errata distribuzione nei mesi poiché se si prende come riferimento la piovosità annua, nel 2022 sono arrivati ben 437,58 mm contro i 262,17 mm del 2021, la totale assenza nei mesi di maggio, giugno e luglio le stesse temperature hanno influenzato direttamente la resa del raccolto di canapa.

La coltivazione della canapa è sempre caratterizzata da un'elevata variabilità intraspecifica e competizione anche in condizioni di campo piuttosto omogenee come osservato in [32], invece mettendo in relazione diversi andamenti climatici ed in particolare temperature e precipitazioni, abbiamo assistito a profonde modificazioni dello sviluppo stesso le piante come evidenziato nella tabella dove viene messa a confronto la stessa varietà, stesso terreno in un'azienda e terreni diversi nella seconda sempre in precessione del grano.

Tabella 2: Caratteristiche della canapa della varietà Futura 75 al raccolto in due stagioni (media ± Dev.std.)

A	Bergonzini farm	
	2021	2022
Density	68.0 ± 8.2	55.3 ± 36.5
Height	222.9 ± 59.9	172.5 ± 50.6

BD	12.2 ± 2.6	7.8 ± 2.6
B	Succi farm	
Density	52.3 ± 11.5	42.0 ± 6.6
Height	209.2 ± 57.8	177.3 ± 42.4
BD	11.3 ± 3.6	8.1 ± 3.2

Density: plant density n. m⁻²; Height: plant height (cm); Basal Diameter: At cutting height (mm)

In tabella due sono riportate le principali caratteristiche della varietà al momento della raccolta mentre nella tabella 3 sono riportate la resa in t/ha e l'umidità di raccolta rilevata a fine ciclo.

Tabella 3: Resa in biomassa della varietà Futura 75 nei due anni di sperimentazione

Farm	A				B			
	2021		2022		2021		2022	
Y-M	82.05	16.26	13.78	14.06	91.85	15.85	22.17	17.20

Y: Yield (t ha⁻¹)

M: Moisture harvest (%)

La densità di semina iniziale è risultata simile tra le due aziende costituite per avere 150 piante per mq, ma in entrambi i casi l'azienda Succi ha evidenziato una densità di impianto inferiore rispetto all'azienda A, ciò potrebbe essere legato non solo alle condizioni pedoclimatiche ma anche alla competizione intraspecifica per i nutrienti che potrebbe causare la morte delle piante deboli. Lo sfalcio è stato effettuato in entrambe le aziende ed in entrambi gli anni entro la prima decade di agosto, nel 2021 dal prototipo UNIBO, nel 2022 con la falciatrice laterale portata utilizzata (Gaspardo 180) operante ad una velocità di lavoro di 5,5 km/h. L'andatura è stata effettuata ad una velocità di 5 km h-1 realizzando andane distanziate di 5,5 m nel 2023 il 12 e 16 settembre rispettivamente per l'azienda A e B. La fase di pressatura è stata effettuata con una rotopressa Kuhn VB 2190 (Pressa 1) che ha lavorato ad una velocità di 5,5 km h-1 il giorno 14 settembre presso l'azienda agricola A e una rotopressa Feraboli Xtreme 265 (Pressa 2) che ha lavorato ad una velocità di 5,5 km h-1 velocità di 5,0 km h-1 il giorno 10 ottobre presso l'azienda B. Nell'azienda A sono state raccolte 5 rotoballe della varietà Futura 75, per un totale di 13,96 Mg di biomassa; mentre nell'azienda B sono state raccolte 3 rotoballe della varietà Futura 75 per un totale di 0,79 Mg di biomassa. Le rese ottenute da due test stagionali in due aziende specializzate sono mostrate rispettivamente nella tabella 3. La resa dell'azienda A è passata da 82,05 a 13,78 t ha-1, differenza che rimane molto elevata anche alla luce del diverso contenuto di umidità rilevato alla raccolta ma ha influenzato per oltre l'80% la perdita di resa. La differenza di produzione nell'azienda B rimane più contenuta, passando da 91,85 a 22,17 t ha-1 nonostante una certa differenza di umidità del raccolto anche in questo caso ancora più contenuta rispetto all'azienda A ma superiore al 75%.

I tempi di lavorazione erano in linea con le altre colture agricole tradizionali e gli aspetti qualitativi della canapa raccolta erano adeguati, senza danni o bloccaggi. Nella tabella 4 sono riportati i tempi di lavoro ottenuti relativi alle fasi di sfalcio, andatura e pressatura. I principali parametri dello studio prestazionale sono ottenuti da colture di fienagione comunemente conosciute nel contesto regionale.

Tabella 4. Tempi di lavoro e performance delle macchine utilizzate.

Parameter	Unit	Prototipe	mower	windrow	baler1	baler2
Speed	km h ⁻¹	6.00	5.50	5.00	5.50	5.00
TFC	ha h ⁻¹	10.80	9.90	15.00	3.02	2.75
EFC	ha h ⁻¹	8.86	8.18	12.96	1.72	1.62
FE	%	82.00	82.00	72.00	57.00	59.00

TRC: Theoretical field capacity; EFC: Effective Field Capacity; FE: Field Efficiency

Tabella 5. Aspetti economici dei cantieri utilizzati per la raccolta.

Parameter	Unit	Prototipe	mower	windrow	baler1	baler2
Price	Euro	8000	6000	10000	45000	48000
EL	h	6	8	8	6	6
RV	%	35	32.1	32.1	36.6	36.4
IH[a]	%	1	1	1	1	1
RM[a]	%	63	61	44	89	86

EL: Estimated Life; RV: Remaining Value; IH: Insurance and Housing; RM: Repair and Maintenance

[a]Based on purchase price

La tabella 4 riporta i tempi di lavoro e le prestazioni delle macchine, mentre la tabella 5 riporta gli aspetti economici dei cantieri di raccolta.

Nella tabella 6 sono riportati i costi orari e per Tonnellata di prodotto raccolto umido ottenuto. Nei costi orari sono compresi anche gli autisti necessari per i cantieri utilizzati, i costi ottenuti grazie all'adozione di tecnologie diffuse ad eccezione del prototipo utilizzato nel 2021 si mantengono al di sotto dei 220 euro ha⁻¹, valori favorevoli ad una diffusione della coltura.

Tabella 6: Costi orari e per unità di prodotto raccolto con i cantieri analizzati

A	Bergonzini farm	
	2021	2022

Euro ha ⁻¹	212.98	196.55
Euro t ⁻¹	49.87	142.68
<hr/>		
B	Succi farm	
<hr/>		
Euro ha ⁻¹	191.99	219.11
Euro t ⁻¹	20.90	98.84
<hr/>		

Resta il discorso in termini di costi per unità di prodotto raccolto, volontariamente considerato umido in quanto rispecchia le reali condizioni della biomassa trattata. E' importante considerare che al di sotto di una soglia minima di produzione, i costi di raccolta possono rendere antieconomica la raccolta del prodotto stesso, come avvenuto nel 2022 presso l'azienda agricola A dove 142,68 euro t-1 possono superare il valore commerciale della biomassa prodotta. La differenza di produzione ottenuta nei due anni in entrambe le aziende è da attribuire all'andamento climatico della stagione monitorata ed in particolare alla distribuzione degli eventi piovosi nel corso dell'anno. La riduzione della resa non ha influito sul funzionamento e sulle prestazioni delle linee di meccanizzazione proposte che restano di potenziale interesse per le piccole aziende agricole che iniziano ad avvicinarsi alla coltivazione della canapa soprattutto nelle aree marginali. Il prodotto finale imballato in balle rotonde consente un buon accesso alle catene logistiche disponibili per il trasporto e la lavorazione.

Considerazioni conclusive

I risultati della valutazione sul campo sottolineano come punti chiave per la coltivazione della canapa l'adeguata gestione delle colture e la raccolta meccanica per migliorare la qualità della biomassa per diversi scopi a livello aziendale. Per raggiungere il potenziale atteso di filiera di valorizzazione della canapa è necessario un'adeguata gestione della coltura dal punto di vista agronomico e il giusto approccio nella meccanizzazione della raccolta per ottenere materia prima di alta qualità a basso costo. Tenendo conto dell'elevata adattabilità della coltura e della situazione italiana caratterizzata da una rete molto eterogenea di aziende agricole e contoterzisti, la possibilità di adattare macchine convenzionali sviluppate per altre colture (es. fienagione) alle esigenze della coltivazione della canapa può rappresentare una reale possibilità di valorizzare lo sviluppo della filiera della canapa in Italia. La disponibilità della giusta quantità di materie prime di canapa corrisponderà alle esigenze dei diversi sistemi di lavorazione (es. fibra primaria per tessuti, fibra secondaria per isolamento e altri biomateriali per il settore delle costruzioni). Contemporaneamente sono necessarie nuove tecnologie appositamente sviluppate (ad esempio la raccolta delle infiorescenze) per processare adeguatamente le frazioni di canapa a maggior valore aggiunto destinate alla bioraffineria.

Questi due anni di prove hanno permesso di valutare il comportamento della varietà di canapa Futura 75 in condizioni di stress idrico causato dalla totale assenza di piogge nei mesi di giugno, luglio e agosto, mesi molto importanti per lo sviluppo della coltura. A parità di terreni e tecniche di coltivazione, un'azienda agricola ha avuto una riduzione di oltre l'80% mentre l'altra del 75% e questo aspetto va attentamente considerato per la diffusione della coltura della canapa in quest'area italiana. Le tecnologie seguite che avevano già dato buoni risultati ai migliori livelli produttivi sono state

favorite dalla riduzione delle rese, confermando la possibilità di utilizzare tecnologie convenzionali. I costi di raccolta meccanica sono stati sempre inferiori a 220 euro ha⁻¹, quindi entro valori contenuti per il ciclo colturale della canapa. Le precipitazioni e soprattutto la sua distribuzione nei mesi estivi possono rappresentare un limite alla coltivazione della canapa.

Bibliografia:

- [1] Amaducci, S.; Scordia, D.; Liu, F.H.; Zhang, Q.; Guo, H.; Testa, G.; Cosentino, S.L. Key Cultivation Techniques for Hemp in Europe and China. *Ind. Crops Prod.* **2015**, *68*, 2–16, doi:10.1016/j.indcrop.2014.06.041.
- [2] Sorrentino, G. Introduction to Emerging Industrial Applications of Cannabis (*Cannabis Sativa* L.). *Rend. Lincei* **2021**, *32*, 233–243, doi:10.1007/s12210-021-00979-1.
- [3] Piotrowski, S.; Carus, M.; Carrez, D. European Bioeconomy in Figures. *Ind. Biotechnol.* **2016**, *12*, 78–82, doi:10.1089/ind.2016.29030.spi.
- [4] Carus, M. Record Cultivation of Industrial Hemp in Europe in 2016. *Eiha* **2017**.
- [5] Ahmed, A.T.M.F.; Islam, M.Z.; Mahmud, M.S.; Sarker, M.E.; Islam, M.R. Hemp as a Potential Raw Material toward a Sustainable World: A Review. *Heliyon* **2022**, *8*, e08753, doi:10.1016/j.heliyon.2022.e08753.
- [6] European Commission Hemp Cultivation in Europe. Available online: https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/plants-and-plant-products/plant-products/hemp_
- [7] Baraniecki, P.; Latterini, F.; Stefanoni, W.; Frankowski, J.; Wielgusz, K.; Pari, L. Assessment of the Working Performance of an Innovative Prototype to Harvest Hemp Seed in Two Different Conditions of Terrain Slope. *Agronomy* **2022**, *12*, 185.
- [8] Tang, K.; Struik, P.C.; Yin, X.; Thouminot, C.; Bjelková, M.; Stramkale, V.; Amaducci, S. Comparing Hemp (*Cannabis Sativa* L.) Cultivars for Dual-Purpose Production under Contrasting Environments. *Ind. Crops Prod.* **2016**, *87*, 33–44, doi:10.1016/j.indcrop.2016.04.026.
- [9] Calzolari, D.; Magagnini, G.; Lucini, L.; Grassi, G.; Appendino, G.B.; Amaducci, S. High Added-Value Compounds from Cannabis Threshing Residues. *Ind. Crops Prod.* **2017**, *108*, 558–563, doi:10.1016/j.indcrop.2017.06.063.
- [10] Assirelli, A.; Faugno, s.; Stagno, F.; Sannino, M.; Santangelo, E.; Paoletti, A.; Amaducci, S. hemp cultivation techniques evaluation for sowing seed production. 29th European Biomass Conference and Exhibition, *EUBCE Eur. Biomass Conf. Exhib. Proc.* **2021**, 26–29.
- [11] Pari, L.; Assirelli, A.; Acampora, A.; Del Giudice, A.; Santangelo, E. 2015. "A new prototype for increasing the particle size of chopped *Arundo donax* (L.)" *Biomass and Bioenergy* **74**, 288-2952 DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.01.025 -s2.0-84923286293
- [12] Assirelli, A.; Santangelo, E.; Spinelli, R.; Acampora, A.; Croce, S.; Civitarese, V.; Pari, L. 2013. "Mechanization of rhizome extraction in giant reed (*Arundo donax* L.) nurseries" *Applied Engineering in Agriculture* n.4 489-494 DOI:10.13031/aea.29.9797
- [13] Del Giudice, A.; Assirelli, A.; Gallucci, F.; Bellacima, R.; Pari, L.; Santangelo, E. Production of Energy Feedstock from the Riparian Vegetation of *Arundo Donax* (L.): Suitability of the Chopping Systems. *Ecol. Eng.* **2017**, *102*, 459–467, doi:10.1016/j.ecoleng.2017.01.040.

- [14] Assirelli Alberto; Santangelo Enrico; Brambilla Massimo; Bisaglia Carlo; Civitarese Vincenzo; Caracciolo Giuseppina; Spinelli Raffaele. 2019. "TECHNIQUEST FOR THE TRANSPORTATION OF COMPLETE-TREES FROM THE TERMINATION OF PEACH ORCHARDS" *Biomass and Bioenergy* 130 DOI 10.1016/j.biombioe.2019.105378
- [15] Paris E.; Assirelli A.; Carnevale M.; Gallucci F.; Rocuzzo G.; Pagano M.; Santangelo E. 2019. Residues from harvesting of tree nuts: An appraisal of energy value of walnut and almond husks. 27th European Biomass Conference and Exhibition Proceedings, 2019, pp. 303–306 ISSN 22825819
- [16] Faugno S.; Sannino M.; Pacifico S.; Cervelli E.; Stagno F.; Assirelli, A. New insights in hemp seed phenols and polyphenols through uhplc-esi-qtof-ms/ms analysis. European Biomass Conference and Exhibition Proceedings, 2019, pp. 339–343 ISSN 22825819
- [17] Faugno, S.; Civitarese, V.; Assirelli, A.; Sperandio, G.; Saulino, L.; Crimaldi, M.; Sannino, M. Chip Quality as a Function of Harvesting Methodology. *Chem. Eng. Trans.* **2017**, *58*, 271–276, doi:10.3303/CET1758046.
- [18] Assirelli, A.; Re, L.D.; Esposito, S.; Cocchi, A.; Santangelo, E. The Mechanical Harvesting of Hemp Using In-Field Stand-Retting: A Simpler Approach Converted to the Production of Fibers for Industrial Use. *Sustain.* **2020**, *12*, 1–12, doi:10.3390/su12218795.
- [19] Michael Carus European Hemp Industry: Cultivation, Processing and Applications for Fibres, Shivs, Seeds and Flowers. **2017**, *1994*, 1–9.
- [20] Assirelli, A.; Caracciolo, G.; Cacchi, M.; Sirri, S.; Pallottino, F.; Costa, C. Evaluation of the Detachment Force Needed for Mechanical Thinning of Green Peach Fruits. *Sustain.* **2018**, *10*, doi:10.3390/su10072291.
- [21] Bentini, M.; Martelli, R. Prototype for the harvesting of cultivated herbaceous energy crops, an economic and technical evaluation. *Biomass Bioenergy*, **2013**, *57*, 229–237, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.07.008>.
- [22] Sausserde, R.; Adamovics, A.; Ivanovs, S.; Bulgakov, V. (2013). Investigations into growing and harvesting industrial hemp. *J. Res. Appl. Agric. Eng.*, **2013**, *58*(4), 150–154.
- [23] Amaducci, S.; Errani, M.; Venturi, G. Response of Hemp to Plant Population and Nitrogen Fertilisation. *Ital. J. Agron.* **2002**, *6*, 103–111.
- [24] Salentijn, E.M.J.; Zhang, Q.; Amaducci, S.; Yang, M.; Trindade, L.M. New Developments in Fiber Hemp (*Cannabis Sativa* L.) Breeding. *Ind. Crops Prod.* **2015**, *68*, 32–41, doi:10.1016/j.indcrop.2014.08.011.
- [25] Amaducci, S.; Errani, M.; Venturi, G. Plant Population Effects on Fibre Hemp Morphology and Production. *J. Ind. Hemp* **2002**, *7*, 33–60, doi:10.1300/J237v07n02_04.
- [26] Rahman Khan, M.; Chen, Y.; Laguë, C.; Landry, H.; Peng, Q.; Zhong, W.; Zhong, W. Decortication of Hemp (*Cannabis Sativa*) Fibers Using Drop Weight Impact: Fiber Yield and Properties. **2010**, 1–10.
- [27] ASABE. ASABE Standard EP496.3 FEB2006 (R2015): Agricultural Machinery Management; ASABE: St. Joseph, MI, USA, 2015.
- [28] Srivastava, A.K.; Goering, C.E.; Rohrbach, R.P.; Buckmaster, D.R. Engineering Principles of Agricultural Machines; American Society of Agricultural and Biological Engineers: St. Joseph, MI, USA, 2006; pp. 1–588.
- [29] ASABE. ASABE Standard D497.7 March 2011.
- [30] A.P.I.M.A. Associazione Provinciale Imprese di Meccanizzazione Agricola. Available online: <https://www.apima-associazioni.com/> (accessed on 05 November 2022).

- [31] Salentijn, E.M.J.; Zhang, Q.; Amaducci, S.; Yang, M.; Trindade, L.M. New Developments in Fiber Hemp (*Cannabis Sativa* L.) Breeding. *Ind. Crops Prod.* 2015, 68, 32–41, doi:10.1016/j.indcrop.2014.08.011.
- [32] Amaducci, S.; Errani, M.; Venturi, G. Response of Hemp to Plant Population and Nitrogen Fertilisation. *Ital. J. Agron.* 2002, 6, 103–111.

Azione 3: Prove di lavorazione in campo

1. Introduzione

In Italia, la canapa industriale (*Cannabis sativa* L.), che può essere considerata come un eccellente modello di coltura multi-output, è principalmente coltivata per la singola produzione di seme, e le fibre contenute nello stelo non vengono recuperate nonostante loro potenziale per una moltitudine di usi finali. Questo è maggiormente dovuto al fatto che la lavorazione dello stelo di canapa per estrarre le fibre dal canapulo richiede impianti specializzati che sono inesistenti in Italia e da cui il costo di sviluppo è troppo alto rispetto alla dimensione della produzione di canapa Italiana per giustificare loro costruzione. Dunque, lo sviluppo di impianti in capacità di estrarre la fibra dello stelo su scala aziendale permetterebbe ai produttori primari di canapa industriale di beneficiare di guadagni addizionali, valutando gli steli di canapa come residui della produzione di seme. Nell'ambito del progetto Multicanapa, finanziato dal PSR Emilia-Romagna 2014-2020 – Misura 16.1.01 – Focus Area 2A, e in seguito delle prove già realizzate nell'ambito del progetto GRACE BBI, sono state realizzate prove di separazione meccanica delle fibre di steli di canapa industriale non-macerate usando macchine industriali già commercializzate. Gli obiettivi sono di determinare la disposizione dell'impianto che massimizza la resa di fibra (frazione grossa dopo vagliatura separazione) mentre limitando il numero di fasi di lavorazione per ottimizzare l'efficienza di uso dell'energia e la redditività dell'impianto. In aggiunta, l'identificazione dei colli di bottiglia che restringono l'efficienza dell'impianto consisterà un obiettivo supplementare nell'ottico di un sviluppo ulteriore dell'impianto. Per raggiungere questi obiettivi, saranno realizzate diverse prove in cui saranno valutate diverse combinazioni dei parametri dell'impianto e diverse caratteristiche del materiale utilizzato in entrata (considerando parametri agronomici).

2. Funzionamento dell'impianto.

L'impianto mira a macinare steli di canapa per separare le fibre dal canapulo, al fine di fornire materiale per la fabbricazione di mobili di arredamento. A tal fine, steli non-macerati di canapa vengono inserite nell'impianto da cui escono tre frazioni: una frazione grossa che consiste in maggior parte in fibre, e due frazioni (media e fine) che consistono in una miscela di fibra e di canapulo. L'impianto consiste in tre macchine che vengono usate in serie: (i) un bio-tritratore a martelli (Figura 1A) (successivamente denominato "**tritratore**"), (ii) un mulino a coltelli con 120 coltelli (Figura 1B) (successivamente denominato "**mulino**"), e (iii) un setaccio meccanico (Figura 1C) per la fase di vagliatura separazione (successivamente denominato "**vibrovaglio**"). L'energia necessaria per il funzionamento dell'impianto è fornita da un trattore (gasolio) collegato con un cardano, sia per l'uso del bio-tritratore che per l'uso del mulino a coltelli; mentre la vagliatura separazione viene realizzata con energia elettrica fornita da una presa industriale (320 V, 52 mA).

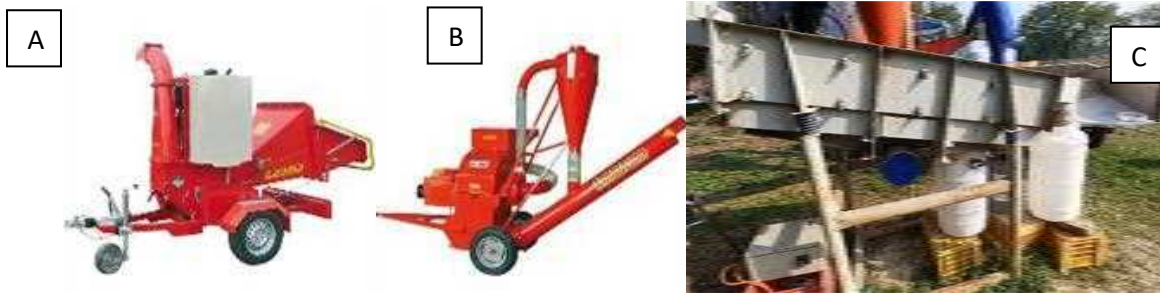


Figura 1: le 3 macchine dell'impianto. A: il bio-trituratore. B: il mulino frangitutto. C: il vibrovaglio.

2.1. Fase di triturazione

Gli steli di canapa non-macerati vengono inseriti nel tritratore manualmente, da un operatore. Gli steli triturati escono attraverso una griglia con buchi tondi di diametro di 8 cm. È da notare che questa griglia può essere sostituita con una griglia a buchi paralleli, però il materiale ottenuto in uscita dal tritratore utilizzando quest'ultima configurazione non è abbastanza triturato, e conseguentemente, è stato deciso di non realizzare prove coinvolgendo la griglia a buchi paralleli. Il materiale ottenuto in uscita del bio-tritratore consiste in una miscela di fibra corta e di canapulo (Figura 2), che viene doppiamente inserita nel mulino a coltelli.



Figura 2: la miscela di fibra corta e di canapulo ottenuto dopo triturazione a martelli.

2.2. Fase di molinatura

Il materiale ottenuto nella fase di triturazione può venire inserito nel mulino a coltelli sia manualmente che in modo automatico, disponendo l'impianto in tal modo che la biomassa trattata nel tritratore cada direttamente nella tramoggia del mulino, però questa disposizione richiede l'uso simultaneo di due trattrici. Una volta nel mulino, il materiale viene tagliato da 120 coltelli a lama di tungsteno (è anche possibile utilizzare il mulino frangitutto 180M con 180 coltelli), e passa attraverso un crivello con buchi tondi (Figura 3). Parecchi crivelli sono disponibili e possono essere sostituiti in alcune minuti dall'operatore, che può scegliere fra crivelli con buchi da 2, 6, 10, 12 e 15 mm di diametro, a seconda delle caratteristiche desiderate del materiale in uscita, e del materiale utilizzato in entrata. Dopo la tagliatura, il materiale viene trasferito da una vite di Archimede, sia verso un dispositivo di stoccaggio temporaneo nell'otico di una seconda (o terza) fase di molinatura (per es. un carrello agricolo), sia verso il vibrovaglio per la fase di vagliatura separazione. È importante notare (i)

che la dimensione del crivello utilizzato costituisce il parametro variabile di questa operazione, (ii) che più di una lavorazione possa essere (e spesso sarà) necessaria e (iii), che il mulino viene spesso utilizzato in modo collegato sia col trituratore che col vibrovaglio. In aggiunto, la lavorazione diretta a 6 o a 2 mm del materiale uscito dal trituratore non è consigliata (e conseguentemente non è stata provata) per ragione di sicurezza (rischio di fuoco). Quindi, la determinazione del numero di passaggi del materiale nel mulino e della serie di crivelli da utilizzare costituiscono due degli obiettivi principali delle prove descritte nel presente documento.



Figura 3: due dei crivelli che possono essere utilizzati nel mulino a coltelli: a sinistra, il crivello da 10 mm, a destra, quello da 6 mm.

2.3. Fase di vagliatura separazione

Dopo l'ultima molinatura, la vite di Archimede porta il materiale fino al vibrovaglio dove viene separato il canapulo dalla fibra (Figura 4). Due setacci disposti in parallelo permettono di separare il materiale in tre frazioni: grossa, media, e fine. La frazione grossa consiste in fibre pulite in parte dal canapulo, sebbene il percentuale di canapulo rimanente sia dipendente di numerosi fattori (per es. ultimo crivello usato, setaccio usato, flusso di materiale nel vibrovaglio). Nelle frazioni medie e fine vengono miscelati fibre e canapulo. I due setacci consistono in un setaccio in posizione bassa da 0.3×1.2 mm che non può essere sostituito, rendendo conseguentemente le dimensioni delle particole nella frazione fine invariabile. In posizione alta si trova un setaccio sostituibile fra setacci da tre dimensioni diverse: un setaccio di 2×6 mm (successivamente denominato "**setaccio da 6 mm**"), uno da 6.6×20 mm (successivamente denominato "**setaccio da 10 mm**"), e uno da 12×12 mm (successivamente denominato "**setaccio da 12 mm**").



Figura 4: vagliatura separazione. La vita di Archimede del mulino (in arancio) porta il materiale mulinato fino al top dei setacci. La combinazione dell'agitazione e dell'angolo dei setacci permette la separazione del materiale in 3 frazioni (grossa, media e fine) che vengono raccolte in contenitori diversi (non visibile su questa fotografia).

3. Materiali e metodi

3.1. Materiale utilizzato e parametri sperimentali

Il materiale vegetale utilizzato sono steli da due varietà Francese di canapa industriale (*Cannabis sativa* L.) registrate nel catalogo Europeo delle varietà commerciali: 'Fibror 79' e 'Futura 75'; che erano coltivati in campi sperimentali nell'anno 2020 nella pianura padana. Gli steli sono stati raccolti a la maturità del seme e non sono stati macerati.

I diversi parametri sperimentati possono essere distinti fra parametri dell'impianto e parametri agronomici. I parametri legati all'impianto costituiscono (i) nel numero di passaggi del materiale nel mulino, (ii) nello scelto dei crivelli fra 15, 10, 6, e 2 mm di diametro, (iii) nello scelto del setaccio superiore nella fase di vagliatura separazione fra i setacci da 6 e 10, e (iv) nel numero di passaggi nella vagliatura separazione. I parametri agronomici provati sono (i) il scelto varietale (fra le varietà 'Fibror 79' e 'Futura 75') e (ii) la densità di semina (fra densità di 22.5, 45, e 67.5 kg ha⁻¹ che miravano rispettivamente densità di 100, 200, e 300 piante al metro quadro dopo emergenza).

Le due varietà utilizzate sono adattate all'ambito della pianura padana in termini di precocità di fioritura, e si differenziano dal fatto che 'Fibror 79' sia leggermente meno produttiva di 'Futura 75' in termini di biomassa aerea, sotto condizione di disponibilità azotata limitante. Tuttavia, 'Fibror 79' raggiunge una resa di fibra supera a quella di 'Futura 75', a causa di un contenuto di fibra più alto nello stelo che sia pari a circa 36 %, a confronto del 29 % di 'Futura 75' (valori misurate su parcelle seminate a 45 kg/ha). In aggiunta, 'Fibror 79' è caratterizzata da un'efficienza di decorticazione più alta rispetto a 'Futura 75'. Le tre densità di semina rappresentano densità ottimale per la coltivazione di canapa destinata (i) alla singola produzione di semi (22.5 kg/ha), (ii) a la duplice attitudine produttiva di semi e di steli (45 kg/ha), e (iii) alla singola produzione di fibra (67.5 kg/ha).

3.2. Organizzazione delle prove

In seguito alle 7 prove già realizzate nell'ambito del progetto GRACE BBI, 10 prove addizionale sono state realizzate per valutare i vari effetti suddetti. Le caratteristiche tecniche di ogni prova sono

riportate nella Tabella 1; gli obiettivi corrispondenti ad ogni prova sono riportati nella Tabella 2. Le prove n°1 a 6 portavano su la variazione dei parametri tecnici (per es. diametro di molinatura, dimensione setacci), mentre le prove n°7 a 10 portavano sulla valutazione degli effetti agronomici (varietà, densità di semina).

Alcune informazioni sono da considerare sul funzionamento e su vari limiti dell'impianto:

- la lavorazione diretta a 2 o 6 mm nel mulino (doppio triturazione) non è consigliata per prevenire danni o un uso precoce del mulino e dei suoi componenti.
- la fase di separazione deve essere realizzata con un setaccio alto di dimensione leggermente più importante rispetto al diametro dell'ultimo crivello utilizzato, sebbene una prova è stata condotta per valutare la possibilità di utilizzare un setaccio da 6 dopo una molinatura a 6 mm.

Tabella 1: caratteristiche tecniche di ogni prova realizzata. Sono state realizzate prove sulla disposizione dell'impianto (facendo variare i crivelli e i setacci) dalla prova 1 alla prova 6. Dalla prova 7 alla prova 10 sono invece state realizzate prove sul materiale utilizzato in entrata col l'obiettivo di valutare i vari effetti agronomici, sia quello della varietà che quello della densità di semina, su la resa di fibra.

Prova	Materiale in entrata	Triturazione	Molinatura				Vagliatura separazione	
			Ø = 15 mm	Ø = 10 mm	Ø = 6 mm	Ø = 2 mm	10	6
1	Ballone misto di Fibror e Futura seminati a 45 kg ha ⁻¹	•		•	•	•		•
2		•		•	•		•	
3		•	•		•		•	
4		•	•		•			•
5		•	•		•			••
6		•	•		•	•		•
7	Fibror 22.5 kg ha ⁻¹	•		•	•		•	
8	Fibror 67.5 kg ha ⁻¹	•		•	•		•	
9	Fibror 45 kg ha ⁻¹	•		•	•		•	
10	Futura 45 kg ha ⁻¹	•		•	•		•	

Tabella 2: obiettivo di ogni prova.

Prova	Descrizione dell'obiettivo
1	Prova di riferimento.
2	Valutare l'effetto di una lavorazione più grossolana (molinatura a 6 mm e vagliatura separazione a 10 mm).
3	Valutare l'effetto di una prima molinatura da 15 mm rispetto ad una prima molinatura da 10 mm (comparazione con prova n°2).
4	Valutare la fattibilità dell'utilizzazione di un setaccio da 6 mm dopo un'ultima molinatura da 6 mm, invece di un setaccio da 10 mm (comparazione con prova n°3).
5	Valutare, dopo una prima separazione a 6 mm, l'efficienza di recupero di fibra nelle due frazioni le più fine (consistendo nelle frazioni di canapulo e fibre) lavorando una volta supplementare a 6 mm (comparazione con prova n°4).
6	Valutare l'effetto di una prima molinatura da 15 mm rispetto ad una prima molinatura da 10 mm (comparazione con prova n°1).
7	Prova di riferimento per valutare l'effetto della densità di semina.
8	Valutare l'effetto della densità di semina (comparazione con prova n°7).
9	Valutare l'effetto della densità di semina (comparazione con prova n°7).
10	Valutare l'effetto della varietà (comparazione con prova n°9).

3.3. Misure realizzate

Dopo ogni prova è stata misurata la resa di ogni delle tre frazioni ottenute (grossa, media, fine) per valutare l'efficienza di ogni disposizione dell'impianto sul recupero di fibra (frazione grossa). In aggiunta, diversi coefficienti utile alla realizzazione di un Life Cycle Assessment (LCA) e Life Cycle Cost (LCC) sono stati recuperati:

Sono stati stimati i coefficienti di recupero del materiale (%) per ogni fase di lavorazione a l'eccezione della fase di triturazione per cui un'efficienza di recupero del materiale di 100 % sarà considerata. Per determinare i coefficienti di recupero del materiale del mulino e del vibrovaglio, è stato pesato il materiale in entrata e in uscita delle due machine utilizzate in modo collegato. La

differenza tra i due valori è stata considerata come la perdita totale delle due macchine. È poi stata realizzata una prova in cui è stato alimentato manualmente il vibrovaglio per determinare il percentuale di perdita di materiale strettamente dovuta alla fase di separazione, pesando il materiale in entrata e in uscita di questa fase. La perdita strettamente dovuta al mulino è poi stata stimata come essendo la differenza fra la perdita totale e la perdita dovuta al vibrovaglio.

I flussi di biomassa (kg di materiale per minute) per ogni fase di lavorazione sono anche stati stimati. Il flusso di biomassa del trituratore è stato stimato con una rotoballa intera: è stato pesato il materiale recuperato dopo triturazione e molinatura a 10 mm (perché le due macchine sono state utilizzate in modo collegato) e questo valore è stato corretto dal percentuale di materiale perso durante la fase di molinatura (calcolato come descritto precedentemente) per ottenere la quantità di biomassa lavorata nel trituratore. Il flusso di biomassa nel trituratore (kg/min) è poi stato calcolato come essendo la quantità di biomassa tritata per minuto di lavoro.

La determinazione del flusso di biomassa nel mulino è più complessa perché il mulino viene spesso utilizzato collegato sia col trituratore che col vibrovaglio, ma raramente da solo. Essendo la macchina col flusso non-limitante in ciascuna situazione, il flusso di biomassa nel mulino sarà comunque limitato dal flusso di biomassa dalla macchina con quale sia collegato. In aggiunto, deve essere considerato che un percentuale non trascurabile di biomassa viene perso durante la fase di molinatura, causando una differenza tra i flussi di biomassa in entrata e in uscita dell'impianto. Di conseguenza, saranno calcolati quattro flussi in totale legati all'uso del mulino: un flusso di biomassa in entrata del mulino collegato al trituratore e un flusso in uscita delle due macchine, a quelli si aggiungono un flusso di biomassa in entrata e un flusso di biomassa in uscita del mulino collegato al vibrovaglio.

Il consumo energetico di ogni fase di lavorazione è stato valutato, sia considerando il consumo di gasolio dalle trattrici per le fasi di triturazione e di molinatura, che considerando il consumo elettrico della fase di vagliatura separazione. Il consumo giornaliero delle trattrici è stato misurato 4 volte. Per ciascuna fase di lavorazione sono state ricordate le durate di funzionamento di ogni macchina (sia il trituratore che il mulino) per determinare il valore medio del tasso di consumo del gasolio della trattrice usata ($\text{kg}_{\text{gasolio}}/\text{min}$). La trattrice usata in queste prove era una Landini Globus 65 (serie 1999-2004) equipaggiata di un motore Perkins modello 4.236 a 4 cilindri (3.9 Litri) da 67 cavalli di potenza massima a 2200 rpm motore. È stata usata una presa di forza (PdF) a velocità 540E. Le due prime prove sono state realizzate a 700 rpm PdF mentre le prove seguente sono tutte state realizzate ad 850 rpm PdF. Nelle situazioni in cui due trattrici erano necessarie (uso contemporaneo del trituratore e del mulino), è anche stata usata una trattrice FIAT 880 equipaggiata da un motore OM CO3/130 da 4 cilindri (4.5 Litri) da 88 cavalli di potenza massima a 2400 rpm motore. Il consumo energetico della fase di vagliatura separazione (kWh) è stato calcolato come essendo il prodotto del tempo di lavorazione, dell'intensità (52 mA) e della tensione (320 V) dell'impianto elettrico.

4. Risultati

4.1. Resa e efficienza di separazione

4.1.1. Parametri dell'impianto

La prova n°1 con un'ultima molinatura a 2 mm e una separazione a 6 ha permesso l'ottenimento di una frazione di fibra da 29.9 %, di 19.8 % di frazione media e di 50.3 % di frazione fine. Il passaggio ad una lavorazione più grossolana (ultima molinatura a 6 mm e separazione a 10) ha causato una forte riduzione della resa di fibra che è caduta a 7.3 % del materiale totale in uscita. La frazione fine è anche stata ridotta (30.0 %), mentre la frazione media è stata aumentata notevolmente per

raggiungere il 62.7 % (Tabella 3). Però, questa differenza di separazione sembra accompagnata di una differenza di qualità della separazione, la fibra venendo più pulita nella prova n°2 rispetto alla prova n°1 dopo osservazione visuale. Tuttavia, la caratterizzazione della differenza di efficienza di separazione non può essere sicura senza quantificazione biochimica.

Il confronto fra le prove n°3 e 2 ha mostrato che il cambio del crivello nella prima fase di molinatura non ha avuto di effetti significanti sulla resa finale di ogni frazione. Tuttavia, il confronto simile realizzato fra le prove n°6 e 1 ha portato ad una differenza non trascurabile di resa di fibra (15.8 % nella prova n°6 al confronto del 29.9 % della prova n°1) (Tabella 3). Quest'ultima differenza potrebbe essere spiegata dall'eterogeneità della rotoballa utilizzata (un parametro che non è stato anticipato durante la scrittura del protocollo) poiché sia costituita da 2 varietà diverse che erano disposte in parcella sperimentale in campo, e è possibile che il materiale di solo una varietà sia stato lavorato nella prova n°6 mentre un miscchio sarebbe venuto per la prova n°1, causando un effetto varietà non voluto. In particolare, i valori di resa delle tre frazioni osservate nella prova n°6 (15.8 %, 17.4 % e 66.8 % per le frazioni grossa, media, e fine, rispettivamente) sono molto simile ai valori ottenute facendo la stessa prova ma utilizzando in entrata la varietà 'Futura 75' seminata a 45 kg/ha, in una prova realizzata nell'ambito del progetto GRACE BBI (15.2 %, 20.7 % e 64.1 % per le frazioni grossa, media, e fine, rispettivamente)

La prova n°4 ha evidenziato che l'uso di un setaccio da 6 dopo una molinatura a 6 mm non sia compatibile con una separazione efficiente delle fibre dal canapulo nella frazione grossa, come previsto dal sig. Losi in anticipo della prova, e sebbene è stata ottenuta una frazione di fibra di 32.8 %, questa frazione è venuta poco pulita per la presenza di canapulo (osservazione visuale). Il riprocessamento delle frazioni media e fine ottenute in questo modo sul setaccio da 6 (prova n°5) ha permesso di recuperare una quantità ancora più importante di fibra per raggiungere il 48.4 % addizionandola alla resa di fibra ottenuta nella prova n°4 (Tabella 3), nonostante sia sempre poco pulita per la presenza di canapulo.

Tabella 3: resa di ogni frazione ottenuta in uscita del vibrovaglio per le prove portando sugli effetti causati dagli parametri dell'impianto.

Prova	Materiale utilizzato (varietà e densità di semina)	Fase di lavorazione diverse dalla tritrazione		% frazione grossa (fibra)	% frazione media	% frazione fine
		Molinatura	Separazione			
1	misto Fibror e Futura 45 kg/ha	10 / 6 / 2	6	29.9	19.8	50.3
2		10 / 6	10	7.3	62.7	30.0
3		15 / 6	10	7.4	61.7	30.8
4		15 / 6	6	32.8	49.2	18.0
5		15 / 6	6 / 6	48.4	44.7	6.9
6		15 / 6 / 2	6	15.8	17.4	66.8

Si osserva in generale che due tipi di risultati possono essere ottenuti facendo variare la disposizione e i parametri dell'impianto. In primis, si può ottenere una frazione di fibra che raggiunge circa il 25-30 % del materiale in uscita utilizzando un'ultima molinatura a 2 mm e un setaccio da 6, ma la separazione delle fibre dal canapulo viene relativamente poco efficiente e molto residui di canapulo finiscono nella frazione grossa con le fibre, anche se quest'ultima conclusione si basa su osservazione visuale che sono soggette a errore. Invece, utilizzando un crivello da 6 mm per l'ultima molinatura e un setaccio da 10, la resa di fibra cade a circa 7 % del materiale totale ottenuto in uscita, ma la frazione di fibra viene più pulita con pochi residui di canapulo, sebbene una separazione efficace a 100 % non sembra possibile con questo impianto. Considerando che nell'ambito del progetto GRACE BBI sono state realizzate prove con un'ultima molinatura a 2 mm e una separazione a 6, le prove seguente mirando a valutare i effetti agronomici saranno realizzate con un'ultima molinatura a 6 mm e una separazione a 10.

4.1.2. Parametri agronomici

L'effetto della varietà è stato valutato fra le varietà 'Fibror 79' e 'Futura 75' seminate tutte due a 45 kg/ha (prove n°9 e 10): 'Fibror 79' ha raggiunto una resa di fibra significativamente supera (19.1 %) rispetto a quella di 'Futura 75' (2.3 %), e la lavorazione di 'Futura 75' ha invece portato ad una produzione superiore delle frazioni media e fine. Nonostante la differenza di resa di fibra tra le due varietà, l'efficienza di separazione del canapulo della fibra sembra poco influenzato dalla varietà anche se, qui ancora, questa conclusione si basa su un'osservazione visuale, e 'Fibror 79' sembra conseguentemente più interessante da lavorare che 'Futura 75' per la resa supera di fibra.

L'effetto della densità di semina è anche stato chiaro, con una resa di fibra che cresce all'incremento della densità di semina per una disposizione data dell'impianto (Tabella 4). Dopo un'ultima molinatura a 6 mm e una separazione a 10, la resa di fibra ha aumentato da 4.0 % per una coltura seminata a 22.5 kg/ha, per raggiungere il 19.1 % quando seminata a 45 kg/ha e il 25.7 % quando seminata a 67.5 kg/ha. Queste conclusioni sono simile a quelle ottenute nell'ambito del progetto GRACE dopo un'ultima molinatura a 2 mm e una separazione a 6.

Tabella 4: resa di ogni frazione ottenuta in uscita del vibrovaglio per le prove portando sugli effetti agronomici.

Prova	Materiale utilizzato (varietà e densità di semina)	Fase di lavorazione diverse dalla triturazione		% frazione grossa (fibra)	% frazione media	% frazione fine
		Molinatura	Separazione			
7	Fibror 22.5 kg/ha	10 / 6	10	4.0	59.5	36.6
8	Fibror 67.5 kg/ha	10 / 6	10	25.7	50.7	23.6
9	Fibror 45 kg/ha	10 / 6	10	19.1	55.1	25.8
10	Futura 45 kg/ha	10 / 6	10	2.3	62.1	35.7

4.2. Calcolazione dei coefficienti di lavorazione

4.2.1. Coefficienti di recupero del materiale

Perché non è stata misurata l'efficienza di recupero del materiale durante la fase di triturazione, sarà considerata equivalente al 100 % anche se questo valore è chiaramente ottimistica. Il coefficiente di recupero del mulino (collegato al vibrovaglio) invece è stato misurato 8 volte. Un valore medio di 80.7 ± 0.5 % (media \pm errore standard, $n = 6$) è stato ritenuto considerando 6 misure fra le 8. Due delle misure sono infatti state considerate come outlier e quindi escluse, molto probabilmente poiché il vento si era alzato portando a l'abbassamento del coefficiente di recupero, con valori di 73.0 % e 64.0 % (mentre le altre 6 valore erano comprese fra 78.5 % e 82 %). Il coefficiente riportato di 80.7 % è perciò strettamente legato ad un funzionamento dell'impianto nell'assenza di vento. L'impatto del vento è conseguentemente non da trascurare per il funzionamento del mulino. L'efficienza di recupero del vibrovaglio è stata misurata una volta sola, alimentandolo a mano, e un'efficienza di 100 % (nell'assenza di vento) è stata rilevata. Questo valore sembra ancora ottimistica e probabilmente più bassa ma la perdita reale può essere stata nascosta dall'errore di peso all'aperto, e conseguentemente anche se il percentuale di recupero del vibrovaglio non è di 100 %, non dovrebbe essere tanto inferiore e il valore di 100 % sarà ritenuto. Si deve tuttavia considerare che in presenza di vento vengono perdite di materiale che possono essere valutate come essendo la differenza fra il valore medio del percentuale di perdita del mulino (19.3 %) e le perdite totale misurate in presenza di vento (27.0 % e 36.0 %), cioè fra circa 7 e 15 %, e dunque il vento deve essere considerato come un fattore causando notevoli perdite di materiale.

Tabella 5: coefficienti di recupero della biomassa.

Coefficienti di recupero del materiale (senza vento)	
Triturazione	100 %
Molinatura	80.7 %
Vagliatura separazione	100 %

4.2.2. Flussi di materiale fra i componenti dell'impianto

Il flusso di biomassa nelle fasi di triturazione e di prima molinatura sono state misurate una volta con una rotoballa di 'Futura 75' seminato a 45 kg/ha. Nel tempo di 54 minuti di lavorazione del trituratore e di 58 minuti di lavorazione del mulino, sono stati recuperati 94.2 kg di biomassa triturata e molinata a 10 mm, portando il flusso di materiale recuperato a 1.62 kg/min, e il flusso di materiale in entrata a 2.01 kg/min per il mulino, correggendo il valore del flusso di materiale recuperato col coefficiente di recupero del materiale del mulino (80.7 %). Il flusso di materiale del trituratore è stato valutato a 2.16 kg/min. Questo valore supera leggermente quella del mulino perché il mulino deve essere lasciato acceso per più di tempo dopo aver spento il trituratore (4 minute di più rispetto al trituratore nella prova considerata).

È stato ovvio che il flusso di materiale nelle fasi di ultima molinatura e di separazione veniva limitate dal vibrovaglio, e dunque il flusso di biomassa può essere considerato indipendente del crivello utilizzato nella fase di molinatura. Dunque, 7 misure di flusso di biomassa nell'insieme mulino + vibrovaglio sono state ricordate, indipendentemente della disposizione dell'impianto. Un valore medio di flusso di biomassa in entrata di 0.424 ± 0.018 kg/min ($n = 7$) e un valore medio di flusso di biomassa in uscita di 0.342 ± 0.019 kg/min ($n = 7$) sono state ricordate. È comunque evidente che la fase di vagliatura separazione è la fase limitante dell'impianto, considerando che il flusso di materiale in uscita della prima molinatura sia pari a circa 4 volte il flusso di materiale in entrata delle fasi seguente di ultima molinatura e di vagliatura separazione.

Tabella 6: flussi di materiale nelle diverse fasi dell'impianto. È da considerare che, quando il mulino è utilizzato legato ad un'altra macchina, sia il trituratore che il vibrovaglio, il flusso di materiale nel mulino non è il flusso limitante, ma il fatto che il flusso di biomassa in entrata del mulino legato al trituratore sia leggermente inferiore al flusso del trituratore è dovuto al fatto che deve rimanere acceso per alcune minuti di più che il trituratore. La distinzione fra questi 2 flussi sarà rilevante durante il calcolo dei LCA e LCC.

Flussi di materiale (kg/min)		
Trituratore		2.16
Mulino (legato al trituratore)	Flusso in entrata	2.01
Mulino (legato al trituratore)	Flusso in uscita	1.62
vibrovaglio + mulino	Flusso in entrata	0.424
vibrovaglio + mulino	Flusso in uscita	0.342

4.2.3. Consumo energetico

Il consumo energetico dell'impianto è stato misurato da un lato considerando la quantità di gasolio consumato facendo girare il trituratore e il mulino, e da l'altro lato considerando la potenza elettrica necessaria al funzionamento del vibrovaglio. Quindi, ad ogni prova saranno legati due valori di consumo energetico che devono essere tutte due considerate.

Per valutare il consumo energetico di questo trattore, è stata misurata la quantità di gasolio consumata ogni giorno di lavoro, facendo il pieno del trattore primo d'iniziare il lavoro, e pesando la quantità di gasolio necessaria per riempire il serbatoio alla fine del giorno. La durata di uso del trattore è anche stata misurata, per ogni prova, permettendo di ottenere un valore medio del tasso

di consumo di 0.1036 ± 0.0045 kg/min (media \pm errore standard, $n = 4$) per una velocità di 850 rpm della presa di forza.

Il consumo energetico del vibrovaglio è stato valutato come il prodotto della durata di funzionamento (misurata per ogni prova) dell'intensità, e della tensione che raggiunge 16.64 W.

5. Conclusioni

La resa di fibra ottenuta dopo lavorazione nell'impianto è stata fortemente influenzata dagli parametri dell'impianto, ma anche dagli parametri agronomici. Alla fine delle prove relative agli parametri dell'impianto (per es. diametro crivelli, setaccio utilizzato), è stato chiaro che 2 disposizioni particolari sembravano d'interesse: oppure una disposizione implicando una fase di triturazione seguita da due fasi di molinatura a 10 e a 6 mm, e poi una fase di separazione col setaccio di 10, che sembra permettere di ottenere una pulizia più efficace delle fibre; oppure una disposizione implicando una fase di triturazione seguita da due fasi di molinatura a 10 e a 2 mm, e poi una fase di separazione col setaccio di 6, che permette chiaramente di massimizzare la resa di fibra.

Gli effetti della varietà e della densità di semina sono anche stati chiaramente significativi, la resa massima di fibra (25.7 %) essendo stata ottenuta con la varietà 'Fibror 79' seminata a 67.5 kg/ha. È da notare che lo stesso materiale utilizzato in entrata dell'impianto (stessa varietà e stessa densità di semina) ma lavorato con un'ultima molinatura da 2 mm e una separazione di 6 ha raggiunto la resa di fibra di 52.8 %, il valore più alto registrato fra tutte le prove realizzate. Invece, la resa di fibra cade a l'abbassamento della densità di semina, o utilizzando l'altra varietà provata ('Futura 75').

È da ritenere che due elementi limitano fortemente l'efficienza dell'impianto. In primis, una quantità importante di materiale (pari a circa 20 % in assenza di vento) viene persa durante ogni fase di molinatura. In secondo, la fase di vagliatura separazione è chiaramente limitante, poiché il flusso di biomassa in entrata di questa fase è pari a circa 4 volte più basso rispetto al flusso di biomassa in uscita delle fasi precedente di triturazione e di molinatura. La limitazione delle perdite di biomassa nelle fasi di molinatura e l'aumentazione del flusso di biomassa nella fase di vagliatura separazione sono due condizioni determinanti per migliorare la produttività e la redditività dell'impianto. Prove realizzate ulteriormente nell'ambito della realizzazione del LCC dovrebbero permettere di quantificare il potenziale d'incremento di produzione e di redditività dell'impianto nell'ipotesi di un'assenza (o per lo meno di una riduzione) di questi difetti.

Azione 4: Analisi economico/ambientale ed indagine di mercato

1. Analisi delle emissioni di carbonio

Le emissioni di carbonio legate alla coltivazione della canapa e alla lavorazione della materia prima sono state quantificate per ogni fase lavorativa, comprendendo tutte le fasi agronomiche e di lavorazione della materia prima (steli) che mira a tritare gli steli fino ad ottenere tre frazioni di materiale trasformato: una frazione di fibra corta con pochi residui di canapulo, una frazione di canapulo di dimensione media, ed una frazione di canapulo fine, ciascuna frazione può essere utilizzata per diverse destinazioni di mercato.

1.1. Emissioni nella fase agronomica

1.1.1. Fonti di emissioni

Nel presente documento, la fase agronomica comprende le diverse fasi della coltivazione (ad esempio aratura, raccolta), a cui si devono aggiungere il trasporto del materiale dal campo fino all'impianto di lavorazione o di essiccazione dei semi e l'essiccazione dei semi. In totale sono 17 le fonti di emissioni per la fase agronomica, e possono essere divise in due categorie: le emissioni fisse e le emissioni variabile, quest'ultime variano a seconda delle scelte agronomiche e dei percorsi produttivi, mentre le emissioni fisse rimangono le stesse per ciascuno scenario produttivo. Al fine di quantificare gli effetti delle scelte tecniche della coltivazione e dei vari percorsi produttivi sulle emissioni di carbonio, sono stati elaborati diversi scenari di coltivazione (descritti nel paragrafo 1.1.2).

Alcuni fattori che possono influenzare le emissioni di carbonio, non sono stati considerati nel presente documento, come ad esempio scenari in cui sono ridotte le fasi di lavorazione del suolo (es. "no tillage"). Gli edifici necessari alla filiera non sono stati inclusi nell'analisi, da un lato visto la complessità della stima del loro impatto sulle emissioni globali nella produzione di canapa, e d'altra parte visto che sono stati considerati fattori che presentano un impatto trascurabile (dal 0 a 2 %) sul bilancio totale (van der Werf, 2004). Le emissioni legate al consumo di gasolio agricolo considerano solamente il carbonio contenuto nel carburante e non vengono considerati i diversi fonti di emissioni legate all'estrazione, al trasporto e alla trasformazione degli idrocarburi. L'irrigazione non è considerata in questo documento.

Rientrano a far parte nella categoria delle emissioni fisse la produzione di macchine di campo, l'aratura, il passaggio di frangizolle, l'erpatura, la semina, l'andatura, l'imballatura e il caricamento delle balle sul camion che trasporta le balle all'impianto di trasformazione.

Le fonti di emissioni variabile comprendono la produzione dei fertilizzanti (Urea – 46 %, P_2O_5 – 18 %, K_2O – 60%) e la loro distribuzione, la produzione dei sementi, le emissioni di ossido nitrico (N_2O) legate alla fertilizzazione azotata, la raccolta, il trasporto e l'essiccazione dei semi, e il trasporto degli steli dal luogo di coltivazione fino all'impianto di lavorazione. Queste fonti di emissioni causano una variazione delle emissioni della coltivazione della canapa a seconda dei vari scenari descritti nel paragrafo 1.1.2.

1.1.2. Scenari di coltivazione

Nel presente documento, vengono considerati diversi scenari di produzione della canapa al fine di quantificare l'effetto di varie scelte agronomiche e di tipologia produttiva sulle emissioni di carbonio. Sono considerate tre fonti di variabilità indotte: (i) la fertilizzazione (senza fertilizzazione o fertilizzazione seguendo i valori di buona pratica agricola riportati da van der Werf, 2004), (ii) la tipologia produttiva (coltivazione per fibra singola o coltivazione a duplice attitudine produttiva di fibra e semi) e (iii) la distanza fra il luogo di coltivazione e l'impianto di lavorazione degli steli (considerate distanze tra i 10 e 50 km). L'effetto dell'assenza di fertilizzazione sulla produttività della canapa viene anche considerata in quattro scenari addizionali, in tal modo di potere simulare (i) una situazione in cui la canapa non è limitata dalla disponibilità di nutrienti in quanto fertilizzata (scenari n° 1 a 4), (ii) una situazione in cui la canapa non è limitata dalla disponibilità in nutrienti anche in assenza di fertilizzazione minerale (ad esempio la semina viene effettuata in appezzamenti con elevate dotazioni in elementi nutritivi, scenari n° 5 a 8), e (iii) una situazione in cui l'assenza di fertilizzazione causa un calo della resa di steli e semi (scenari n° 9 a 12). Ci sono quindi in totale 12 scenari elencate in Tabella 1.

Tabella 1. Caratteristiche dei 12 scenario considerati. Nd: non definibile.

Scenario	Fertilizzazione	Tipologia produttiva	Distanza dall'impianto (km)	Resa steli (Mg ha ⁻¹)	Resa semi (Mg ha ⁻¹)
1	Si	Fibra sola	10	7.0	Nd
2	Si	Fibra sola	50	7.0	Nd
3	Si	Fibra e semi	10	7.0	0.8
4	Si	Fibra e semi	50	7.0	0.8
5	No	Fibra sola	10	7.0	Nd
6	No	Fibra sola	50	7.0	Nd
7	No	Fibra e semi	10	7.0	0.8
8	No	Fibra e semi	50	7.0	0.8
9	No	Fibra sola	10	5.0	Nd
10	No	Fibra sola	50	5.0	Nd
11	No	Fibra e semi	10	5.0	0.5
12	No	Fibra e semi	50	5.0	0.5

Nel caso in cui la canapa viene fertilizzata, vengono aggiunti alle emissioni fisse le emissioni di carbonio legate alla produzione dei fertilizzanti impiegati, il consumo di gasolio legato all'azione di fertilizzazione e le emissioni di N₂O convertite in equivalente CO₂. Nel caso in cui la tipologia produttiva passa dalla coltivazione per produzione di sola fibra verso una coltivazione a duplice attitudine produttiva, cambiano le emissioni legate alla produzione di sementi (visto che una coltura a duplice attitudine produttiva è seminata a 45 kg ha⁻¹ mentre la coltivazione per la sola produzione di steli richiede una densità di 67.5 kg ha⁻¹). In più, variano le emissioni legate alla tipologia di raccolta (la mietitrebbia rispetto alla barra sfalciante) e vengono aggiunte le emissioni del trasporto dei semi e del loro essiccamento, considerando un impianto elettrico per l'essiccamento. Nel caso in cui varia la distanza dal luogo di essiccamento degli steli, cambiano solamente le emissioni legate al trasporto degli steli. Nel caso in cui la produttività di steli e semi è bassa, cambiano solamente le emissioni legate all'essiccamento di ciascuno dei materiali e quelle legate al loro trasporto.

1.1.3. Valutazione delle emissioni in CO₂equivalente.

Nel presente documento, la quantificazione delle emissioni di carbonio di ciascuna fase di lavorazione è stata realizzata sulla base dei valori presentati in letteratura scientifica oppure da

statistiche Europee. Al fine di poter normalizzare l'impronta carbonica di ciascuna fase di lavorazione, tutte le emissioni sono state convertite in kg di CO₂equivalente (kg_{CO₂eq}). In dettaglio, i valori di consumo di gasolio nelle diverse fasi agronomiche sono stati ottenuti da Lask et al. (2021). Tuttavia, il consumo di gasolio per la raccolta di sola fibra (realizzata con barra falciante e non con mietitrebbia) è stato considerato uguale a quello dell'andatura. Allo stesso modo, il consumo di gasolio per la semina è stato considerato uguale a quello della fertilizzazione.

La conversione del consumo di gasolio in emissione di carbonio viene basata su una percentuale di carbonio nel gasolio pari all'86 %. Questo porta il coefficiente di conversione del gasolio in kg_{gasolio} ha⁻¹ in emissioni in kg_{CO₂eq} ha⁻¹ ad un valore di 3.15, oppure il coefficiente di conversione del diesel in L ha⁻¹ verso emissioni in kg_{CO₂eq} ha⁻¹ ad un valore di 2.68 (considerando una densità di 0.85 kg L⁻¹), che corrisponde al valore riportata in letteratura scientifica (Roer et al., 2012).

Le emissioni di carbonio legate alla produzione delle macchine agricole sono state ottenute da Wang e Dalal (2015) e corrispondono a pratiche agronomiche di "*conventional tillage*", che vengono considerate le stesse per ciascuno dei 12 scenari.

La determinazione del consumo di gasolio per il trasporto degli steli dal campo fino all'impianto di lavorazione è stata basata sui valori pubblicati da Hastings et al. (2017) che hanno riportato un valore medio di consumo di gasolio di 0.29 Litri di gasolio per km per un camion standard caricato con 21.5 Mg di steli. Considerando una densità di 0.85 kg L⁻¹ per il gasolio, questo porta il consumo di gasolio per il trasporto ad un valore di 0.016 kg_{gasolio} Mg_{steli}⁻¹ km⁻¹.

Le emissioni di CO₂ per la produzione di sementi sono state calcolate a secondo della metodologia di van der Werf (2004), calcolando le emissioni totale di carbonio delle diverse fasi agronomiche, che vanno dall'aratura fino al trasporto degli steli all'impianto di stigliatura e fino all'essiccamento dei semi (però senza considerare le emissioni di carbonio legate alla produzione di sementi del ciclo precedente), e quello nell'ambito dello scenario n°4 (*Tabella 1*). Questo scenario è il meno vantaggioso, in cui la canapa viene fertilizzata e coltivata per la doppia produzione di steli e semi e in cui gli steli devono essere trasporto per 50 km. In questo scenario, le emissioni totali vengono divise per una produttività di 0.8 Mg ha⁻¹ di semi (resa bassa che permette di rimanere nell'ottica di uno scenario poco vantaggioso). Si ottiene alla fine un valore di emissioni per la produzione di sementi di 0.691 kg_{CO₂eq} kg_{semi}⁻¹, e questo valore viene moltiplicato dalla densità di semina usata in ciascuno scenario.

Le emissioni di CO₂ legate alla fertilizzazione sono in parte legate alla produzione di ciascuno dei fertilizzanti considerati nel presente documento, all'emissione di N₂O legato alla fertilizzazione azotata, e al consumo di gasolio richiesto per la fertilizzazione *per se*. Nel presente documento, la fertilizzazione in N, P e K viene realizzata (negli scenari n° 1 a 4) rispettivamente con urea (46 %), perfosfato minerale (18.5 %) e cloruro potassico (60 %). I valori di emissione di carbonio dovute alla produzione dei fertilizzanti sono stati recuperati da Brentrup et al. (2018) e valgono 0.88 kg_{CO₂eq} kg_N⁻¹, 0.08 kg_{CO₂eq} kg_{P₂O₅}⁻¹, e 0.25 kg_{CO₂eq} kg_{K₂O}⁻¹, rispettivamente. Le emissioni dirette di N₂O legate alla fertilizzazione azotata sono state stimate secondo la metodologia usata da Mosier et al. (1998), ed è stato considerato un fattore d'emissioni di 0.0125 kg_{N₂O-N} kg_{N applicato}⁻¹. L'equivalente CO₂ delle emissioni di N₂O è stato successivamente calcolato usando il fattore GWP₁₀₀ (265 kg_{CO₂eq} kg_{N₂O-N}⁻¹) pubblicato nel 5th assesment report dall'IPCC (Myhre et al., 2013).

I valori di emissioni di carbonio legate al trasporto del seme dal luogo di coltivazione fino all'impianto di essiccamento sono state ottenute da Jayasundara et al. (2014), considerando che il trasporto di semi di mais consuma una quantità simile di gasolio al trasporto di semi di canapa. Per il calcolo del consumo di carbonio legato al trasporto di semi, viene anche considerato una resa di semi di 0.8 Mg ha⁻¹ (0.5 Mg ha⁻¹ per gli scenari n° 9 a 12) e una distanza media fra luogo di coltivazione e

impianto di essiccamento di 10 km. Dallo stesso studio è stato ottenuto il valore di consumo elettrico per l'essiccamento del seme di 16.6 kWh Mg⁻¹, che corrisponde a valori di 13.3 kWh ha⁻¹ per gli scenari n° 1 ad 8 oppure a 8.3 kWh ha⁻¹ per gli scenari n° 9 a 12 (considerando la differenza di resa di semi all'ettaro).

La conversione del consumo elettrico in kWh in kg_{CO2eq} è stata realizzata usando il fattore d'emissione per il consumo elettrico italiano dell'anno 2020 pari a 0.267 Mg_{CO2} MWh⁻¹ pubblicato da Bastos et al. (2020), ottenuto usando il database Eurostat e la metodologia dell'4th assesment report dell'IPCC.

1.1.4. Risultati

In ordine d'importanza, le maggiori fonti di emissioni di CO₂ sono le emissioni di N₂O legate alla fertilizzazione azotata (emissioni stimate a 248 kg_{CO2eq} ha⁻¹), le emissioni legate al consumo di gasolio per le fasi agronomiche che vanno dall'aratura fino al caricamento delle balle sul camion (fra 165 e 185 kg_{CO2eq} ha⁻¹ dipendendo dalla tipologia di raccolta e della realizzazione di una fertilizzazione o no), le emissioni legate alla produzione dei fertilizzanti nel caso in cui vengono applicati seguendo le buone pratiche agronomiche definite da van der Werf (2004) (97 kg_{CO2eq} ha⁻¹), la produzione dei sementi (fra 33 e 50 kg_{CO2eq} ha⁻¹), la produzione delle macchine (34 kg_{CO2eq} ha⁻¹), il trasporto delle balle dal campo all'impianto di lavorazione (fra 2.5 e 20.5 kg_{CO2eq} ha⁻¹), il trasporto e l'essiccamento dei semi nel caso in cui vengano prodotti (fra 2.4 e 3.9 kg_{CO2eq} ha⁻¹ a seconda della resa di semi) (Tabella 2).

Tabella 2. Consumo energetico ed emissioni di carbonio per ogni fase della coltivazione, dell'essiccamento dei semi e del trasporto del materiale dal campo fino all'impianto di lavorazione (steli) o di essiccamento (semi). Le emissioni fisse sono caratterizzate da un unico valore, mentre le emissioni variabili sono caratterizzate da due valori che corrispondono ai valori minimi e massimi possibile. Nd: non definibile.

Fase del processo	Nota	gasolio (kg _{gasolio} ha ⁻¹)	Emissione (kg _{CO2eq} ha ⁻¹)
Produzione delle macchine		Nd	34
Aratura		17	52
Frangizolle		15	47
Erpicatura		14	43
Produzione sementi	Da 45 a 67.5 kg ha ⁻¹ a seconda della tipologia di produzione	Nd	33 – 50
Produzione Urea (46 %)	0 – 75 kg _N ha ⁻¹	Nd	0 – 66
Produzione P ₂ O ₅ (18 %)	0 – 38 kg _{P2O5} ha ⁻¹	Nd	0 – 3
Produzione K ₂ O (60 %)	0 – 113 kg _{K2O} ha ⁻¹	Nd	0 – 28
Emissioni N ₂ O	0 – 0.94 kg _{N2O-N} ha ⁻¹	Nd	0 – 248
Semina		0.2	0.6
Fertilizzazione		0 – 0.2	0 – 0.6
Raccolta	A seconda della tipologia di produzione	3 – 9	9 – 28
Trasporto semi (0.013 kg _{gasolio} Mg _{semi} ⁻¹ km ⁻¹)	Distanza fra luogo di produzione e impianto di essiccamento (10 km).	0 – 0.1	0 – 0.3
Essiccamento semi	Consumo energetico riportato in kWh ha ⁻¹ di elettricità.	0 – 13 kWh ha ⁻¹	0 – 3.6
Andanatura		3	9
Imballatura		0.8	2.7
Caricamento balle su mezzo di trasporto		0.4	1.3
Trasporto balle verso impianto (0.0161 kg _{gasolio} Mg _{steli} ⁻¹ km ⁻¹)	Distanza fra luogo di produzione e impianto (da 10 a 50 km).	0.8 – 5.6	2.5 – 20.5

Fra i 12 scenari, le emissioni variano da un minimo di 252 kg_{CO₂eq} ha⁻¹ (scenario n°9) fino ad un massimo di 622 kg_{CO₂eq} ha⁻¹ per lo scenario n°4 (Figura 1, Tabella 3). Questi due scenari sono diversi in tutti i fattori studiati (fertilizzazione, tipologia produttiva, distanza tra campo e impianto di stigliatura, resa di steli e semi). Per la maggiore parte, questa variabilità è dovuta alla fertilizzazione (93.3 %) tra cui le emissioni di N₂O hanno un ruolo prevalente (67 % della variazione totale delle emissioni fra gli scenari 4 e 9). Le altre fonti di variazione hanno un impatto relativo bassissimo e quasi trascurabile: la

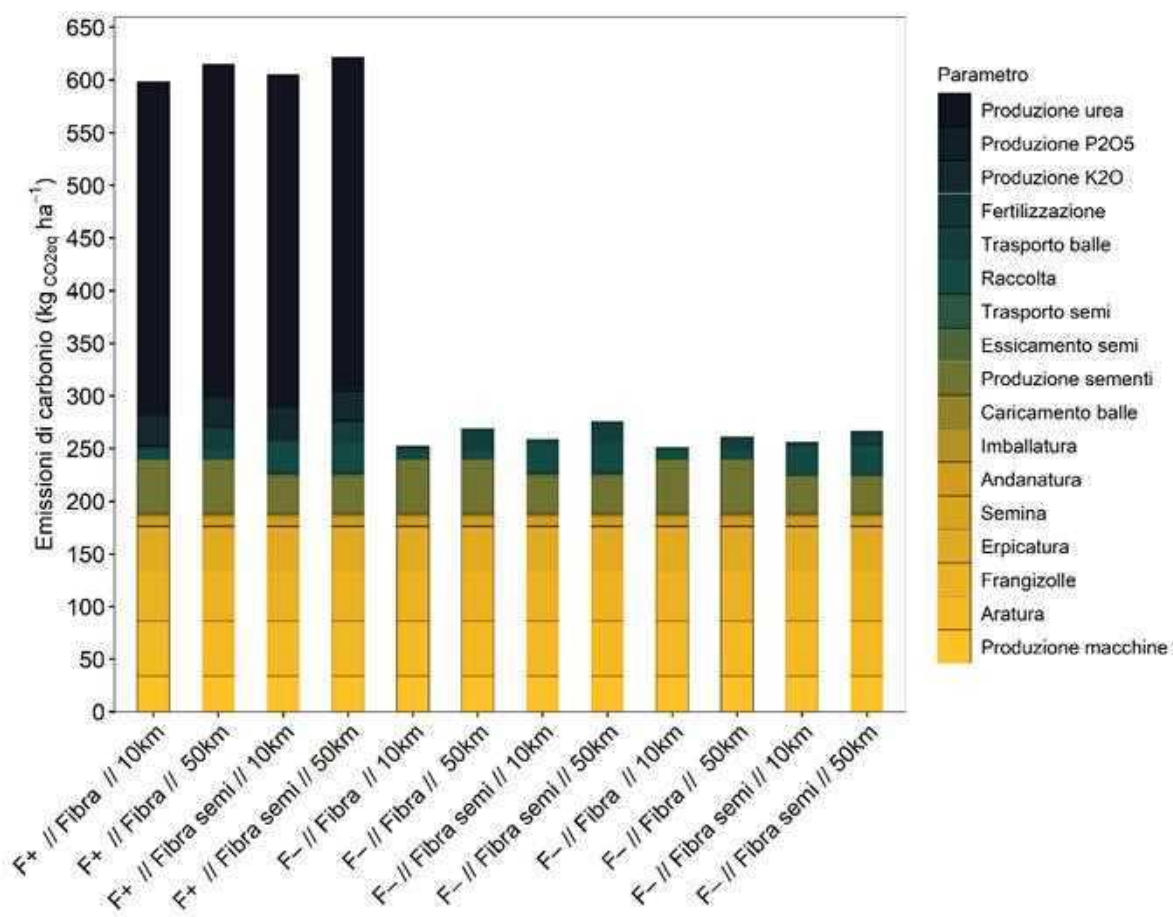


Figura 1. Emissioni di CO₂equivalente di ogni scenario studiato (dallo scenario n° 1 al 12 andando da sinistra a destra) considerando ogni fase di lavorazione. Le emissioni fisse sono rappresentate in basso (andando dalla produzione delle macchine fino al caricamento delle balle), e le emissioni variabile sono nella parte alta delle barre. Scenari con e senza fertilizzazione sono rispettivamente indicati con “F+” o “F-”; scenari in cui la canapa viene prodotta solamente per fibra sono indicati con “Fibra”, mentre una duplice attitudine produttiva è indicata con “Fibra semi”; “10km” e “50km” rappresentano la distanza tra campo e impianto.

Tabella 3. Emissioni totali di carbonio delle diverse fasi agronomiche per ogni scenario, dall’aratura fino al trasporto degli steli all’impianto di lavorazione e fino all’essiccamento dei semi nei casi in cui vengano raccolti.

Scenario	Fertilizzazione	Tipologia produttiva	Distanza dall’impianto di lavorazione degli steli (km)	Resa steli (Mg ha ⁻¹)	Resa semi (Mg ha ⁻¹)	Emissioni di CO ₂ (kg _{CO₂eq} ha ⁻¹)
1	Si	Solo fibra	10	7.0	0.8	599
2	Si	Solo fibra	50	7.0	0.8	616
3	Si	Fibra e semi	10	7.0	0.8	605
4	Si	Fibra e semi	50	7.0	0.8	622
5	No	Solo fibra	10	7.0	0.8	253
6	No	Solo fibra	50	7.0	0.8	270
7	No	Fibra e semi	10	7.0	0.8	259
8	No	Fibra e semi	50	7.0	0.8	276
9	No	Solo fibra	10	5.0	0.5	252
10	No	Solo fibra	50	5.0	0.5	262

11	No	Fibra e semi	10	5.0	0.5	257
12	No	Fibra e semi	50	5.0	0.5	267

distanza tra campo e impianto di lavorazione degli steli causa il 3.3 % della variabilità massima, la tipologia produttiva causa l'1.6 %, e la differenza di resa causa l'1.8 %. Si osserva infatti che gli scenari in cui viene effettuata la fertilizzazione della canapa (dallo scenario n° 1 al 4) emettono significativamente più carbonio che gli scenari in cui non viene effettuata la fertilizzazione (dallo scenario n° 5 al 12) e che le altre fonti di variazione (distanza tra il campo e l'impianto di lavorazione, la tipologia produttiva e la differenza di resa) hanno un effetto minore sulle emissioni totali (Figura 1).

1.2. Emissioni nella fase di trasformazione

Le emissioni legate alla trasformazione degli steli di canapa sono strettamente legate al consumo elettrico dell'impianto di lavorazione, il quale è composto da 27 componenti che totalizzano un consumo elettrico pari a 660 kWh. Quest'impianto è stimato avere la capacità di trasformare 1 tonnellata di steli per ora; quindi, l'efficienza elettrica viene uguale a $1.52 \text{ kg}_{\text{steli}} \text{ kWh}^{-1}$. Considerando una resa media di steli di 7.0 Mg ha^{-1} (dallo scenario n° 1 al 8) e una giornata lavorativa di sette ore, si può lavorare uno ettaro al giorno, con un consumo all'ettaro (o al giorno) pari a 4620 kWh, che corrispondono ad un'equivalente di emissioni di CO_2 di $1234 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{eq}} \text{ ha}^{-1}$. Questo valore corrisponde a circa due volte le emissioni di carbonio delle fasi agronomiche degli scenari i più emissivi di carbonio (scenari n°1 a 4), e quindi rappresenta la maggiore parte dell'impatto ambientale della produzione di canapa.

Considerando invece una resa di steli di 5.0 Mg ha^{-1} (dallo scenario n° 9 al 12), un ettaro può essere lavorato in cinque ore e quindi avrà un consumo elettrico di 3300 kWh, che equivale a $881 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{eq}} \text{ ha}^{-1}$. Questo valore apparentemente vantaggioso è solamente dovuto alla bassa resa di steli; perciò, il paragone tra i diversi scenari è più rilevante normalizzando le emissioni di carbonio per quantità di steli prodotti (Tabella 4).

Tabella 4. Emissioni totali in CO_2 equivalente per le diverse fasi agronomiche e di prima trasformazione, per ciascuno scenario, normalizzato per unità di superficie coltivata e per quantità di steli prodotti.

Scenario	Fertilizzazione	Tipologia produttiva	Resa steli (Mg ha^{-1})	Resa semi (Mg ha^{-1})	Emissioni di CO_2 ($\text{kg}_{\text{CO}_2\text{eq}} \text{ ha}^{-1}$)	Emissioni di CO_2 ($\text{kg}_{\text{CO}_2\text{eq}} \text{ Mg}_{\text{steli}}^{-1}$)
1	Si	Solo fibra	7.0	0.8	1832	262
2	Si	Solo fibra	7.0	0.8	1849	264
3	Si	Fibra e semi	7.0	0.8	1839	263
4	Si	Fibra e semi	7.0	0.8	1856	265
5	No	Solo fibra	7.0	0.8	1486	212
6	No	Solo fibra	7.0	0.8	1503	215
7	No	Fibra e semi	7.0	0.8	1493	213
8	No	Fibra e semi	7.0	0.8	1510	216
9	No	Solo fibra	5.0	0.5	1133	227
10	No	Solo fibra	5.0	0.5	1143	229
11	No	Fibra e semi	5.0	0.5	1138	228
12	No	Fibra e semi	5.0	0.5	1148	230

A seconda dei risultati ottenuti, sono stati suddivisi i 12 scenari in tre diversi gruppi: (i) gli scenari in cui la canapa viene fertilizzata e ha una resa elevata di steli e semi (scenari n° 1 a 4), (ii) gli scenari in cui la canapa non è fertilizzata avendo comunque un'elevata resa di steli e semi (scenari n° 5 a 8) e (iii) gli scenari in cui la canapa non è fertilizzata ha una ridotta resa di steli e semi (scenari n° 9 a 12).

Considerando le emissioni normalizzate per unità di steli prodotti, si osserva che gli scenari più vantaggiosi sono quelli in cui la canapa non è fertilizzata e ha un'elevata resa (scenari n°5 a 8) con emissioni mediane di 214 kg_{CO2eq} Mg_{steli}⁻¹. Questo valore raggiunge 228.5 kg_{CO2eq} Mg_{steli}⁻¹ per gli scenari in cui la canapa non è fertilizzata raggiungendo però elevate rese di steli e semi (scenari n° 9 a 12), e si alza fino al 263.5 kg_{CO2eq} Mg_{steli}⁻¹ per gli scenari in cui la canapa è fertilizzata.

1.3. Carbonio stoccato

Se la coltivazione e la trasformazione della canapa causano emissioni nette di carbonio, l'assimilazione del carbonio atmosferico fra la fotosintesi può invece causare un effetto di sequestro del carbonio che controbilancia le emissioni. A seconda di Finnan and Styles (2013), il carbonio della biomassa sotterraneo delle radici viene mineralizzato ed ossidato dopo le lavorazioni del suolo successive alla raccolta, e quindi non contribuisce al sequestro sul lungo periodo. Sebbene discutibile, conserveremo questa ipotesi per rimanere nell'ottica di scenari poco vantaggiosi. Quindi, secondo la metodologia di Finnan and Styles (2013), il carbonio assimilato dalla fotosintesi e traslocato verso le radici non è stato considerato avere un effetto sul sequestro di carbonio. Invece, il carbonio costitutivo della biomassa aerea, che costituisce circa 41 – 45 % della biomassa aerea (Adamovics et al., 2017; Marrot et al., 2022) può contribuire alla mitigazione delle emissioni di carbonio legate alla coltivazione e alla trasformazione della canapa, a seconda degli usi che vengono fatti dalla biomassa suddetta.

L'impianto di lavorazione degli steli considerato nel presente lavoro dovrebbe permettere l'ottenimento di quattro frazioni di materie semi-lavorate: (i) fibra corta per la produzione di pannelli termo-fonoassorbenti (resa aspettata di 35 % della biomassa in entrata dall'impianto), (ii) un mix di fibra corta e canapulo per lettiera animali (resa aspettata di 45 % della biomassa in entrata dall'impianto), (iii) frazione fine di canapulo che possono essere utilizzate come ammendanti in campo (resa aspettata di 10 % della biomassa in entrata dall'impianto). Il rimanente 10 % è costituito dalla polvera. Le percentuali attribuite a ciascuna di queste quattro frazioni provengono dalle prove realizzate nell'impianto sperimentale di prima trasformazione dal Sig. Losi, e potrebbero corrispondere a situazione in cui una canapa seminata per una duplice attitudine produttiva di steli e semi (seminata a 45 kg ha⁻¹) sarebbe stata lavorata con due fasi di macinazione a 15 e a 6, seguite da una vagliatura a 6 mm. Nel presente documento, il 35 % della biomassa raccolta fornisce fibra corta per la produzione di pannelli termo-fonoassorbenti che viene considerata una fonte di stoccaggio di carbonio a lungo periodo. Negli scenari dall'uno all'otto, questo corrisponde ad una quantità di 4043 kg_{CO2eq} ha⁻¹ che vengono stoccate in maniera permanente. Nel caso in cui vengano prodotte solamente 5 tonnellate di steli ad ettaro (dallo scenario n° 9 al 12), la quantità di carbonio stoccato cala a 2888 kg_{CO2eq} ha⁻¹. Le altre frazioni ottenute non sono considerate soluzione di stoccaggio al lungo termine.

Tabella 5. Bilancio finale dell'impronta carbonica della produzione e della prima trasformazione della canapa per ciascuno dei 12 scenari studiati.

Scenario	Fertilizzazione	Tipologia produttiva	Resa steli (Mg ha ⁻¹)	Emissioni/sequestro di CO ₂ (kg _{CO2eq} ha ⁻¹)			Bilancio (kg _{CO2eq} ha ⁻¹)
				Coltivazione	Trasformazione	Stoccaggio	
1	Si	Fibra sola	7.0	599	1234	-4043	-2252
2	Si	Fibra sola	7.0	616	1234	-4043	-2233
3	Si	Fibra e semi	7.0	605	1234	-4043	-2242
4	Si	Fibra e semi	7.0	622	1234	-4043	-2225
5	No	Fibra sola	7.0	253	1234	-4043	-2594
6	No	Fibra sola	7.0	270	1234	-4043	-2577
7	No	Fibra e semi	7.0	259	1234	-4043	-2586
8	No	Fibra e semi	7.0	276	1234	-4043	-2569
9	No	Fibra sola	5.0	252	881	-2888	-1792
10	No	Fibra sola	5.0	262	881	-2888	-1782
11	No	Fibra e semi	5.0	257	881	-2888	-1786

12	No	Fibra e semi	5.0	267	881	-2888	-1776
----	----	--------------	-----	-----	-----	-------	-------

Sul bilancio finale, ciascuno dei 12 scenari ha un bilancio di emissioni/sequestro negativo o, meglio, ciascuno dei 12 scenari permette di sequestrare più carbonio rispetto a quello che viene consumato nelle fasi agronomiche e di prima trasformazione, con valori di sequestro che variano tra 1776 kg_{CO2eq} ha⁻¹ (scenario n° 12) e 2594 kg_{CO2eq} ha⁻¹ (scenario n° 5) (Tabella 5). Distinguendo nuovamente i tre gruppi, la situazione in cui la canapa non è fertilizzata e raggiunge alte rese di steli e semi (dallo scenario n°5 al 8) ha un valore medio di sequestro di 2581.5 kg_{CO2eq} ha⁻¹. La situazione in cui la canapa è fertilizzata (dallo scenario n°1 al 4) ha un valore medio di sequestro di 2238 kg_{CO2eq} ha⁻¹. La situazione meno vantaggiosa è quella in cui la canapa non è fertilizzata e ha una bassa resa di steli e semi (valore medio di sequestro di 1784 kg_{CO2eq} ha⁻¹).

Per determinare valori di emissioni/sequestro per ciascuno dei quattro tipi di semi-lavorati, viene considerato lo scenario n°4, in cui la canapa è coltivata per la duplice produzione di steli e semi, viene fertilizzata ed è coltivata a 50 km dell'impianto di lavorazione degli steli. La frazione grossolana di fibra (35 % del materiale in uscita dell'impianto) ha un bilancio di 112 kg_{CO2eq} Mg_{prodotto}⁻¹ (carbonio sequestro). La frazione media (45 % del materiale in uscita dell'impianto) ha un bilancio di 144 kg_{CO2eq} Mg_{prodotto}⁻¹ (carbonio sequestro). La frazione fine di canapulo e le polveri (10 % del materiale in uscita per ciascuna frazione) hanno un bilancio di 32 kg_{CO2eq} Mg_{prodotto}⁻¹ (carbonio sequestro).

1.4. Conclusioni sulle emissioni di carbonio

Il bilancio di carbonio della canapa rimane positivo per l'ambiente poiché permette di stoccare più carbonio rispetto a quello che viene emesso durante la produzione e la trasformazione della canapa. Questo è vero per ciascuno dei 12 scenari di produzione esaminati. Si ritiene che fra i fattori più importanti sul bilancio di carbonio delle fasi di coltivazione e di trasformazione, la fertilizzazione ha un ruolo maggiore sulle emissioni delle fasi agronomiche (in particolare le emissioni di N₂O), mentre gli altri fattori studiati (distanza fra campo ed impianto di lavorazione degli steli, tipologia produttiva, e resa) hanno effetti trascurabili sulle emissioni legate alle attività agronomiche. La fase di trasformazione invece ha un consumo energetico abbastanza elevato considerando che è pari al doppio delle emissioni delle attività agronomiche negli scenari più emissivi. Complessivamente la canapa permette un sequestro di carbonio più elevato che le emissioni totale delle fasi agronomiche e di trasformazione, in ogni scenario studiato. È interessante notare che, sebbene la fertilizzazione abbia effetti non trascurabili sulle emissioni nelle diverse fasi agronomiche, se permette di aumentare la produttività di steli di due tonnellate all'ettaro, l'aumentazione delle emissioni legata alla fertilizzazione viene contrabbilanciata dall'incremento di sequestro permesso dall'aumentazione della biomassa. Quindi, la resa di steli è un fattore principale del bilancio di carbonio della coltivazione della canapa.

2. Analisi del ciclo di vita economico

L'analisi del ciclo di vita economico per la produzione di canapa riprende gli stessi scenari di produzione usati nell'analisi dell'impronta carbonica realizzata precedentemente. Una metodologia molto simile viene utilizzata per caratterizzare i vari costi delle diverse fasi agronomiche, del trasporto, e della trasformazione. Perciò, ciascuna fase agronomica viene classificata come costo fisso oppure variabile, a seconda degli scenari studiati. Nello stesso modo in cui è stata effettuata l'analisi del ciclo di vita ambientale, l'analisi del ciclo di vita economica è stata realizzata nell'ambito di diversi scenari

nelle diverse fasi agronomiche, usando i 12 scenari usati precedentemente. Per ciascuno degli scenari è stato stimato il costo di ciascuna fase e i vari costi addizionali (come, ad esempio, il costo dell'acquisto e della manutenzione delle macchine agricole). Di nuovo, le fonti di costo sono state classificate in due categorie: costi fissi e costi variabili che variano a seconda dello scenario produttivo.

2.1. Costi di produzione nella fase agronomica

Le fonti di costo sono molto simili alle fonti di emissioni di CO₂. Nei costi fissi sono considerati l'acquisto e la manutenzione dei macchinari agricoli, il consumo di gasolio per l'aratura, il passaggio di frangizolle, l'erpicoltura, la semina, l'andatura, l'imballatura, il caricamento delle balle sul camion, l'affitto del terreno e la manodopera. Nei costi variabili sono considerati la fertilizzazione, la raccolta, il trasporto delle balle e del seme, l'essiccamento del seme e l'acquisto delle sementi.

2.1.1. Valutazione dei costi

Il prezzo d'acquisto e della manutenzione delle macchine agricole necessarie per la coltivazione della canapa è stato ottenuto da Canaj et al. (2022) che hanno riportato un prezzo di 15 € h⁻¹. Sebbene questi autori non abbiano lavorato sulla canapa, i macchinari utilizzati per la coltivazione della canapa sono molto simili a quelli necessari per la coltivazione delle altre colture. Le ore per ciascuna fase lavorativa sono state ottenute da Bacenetti et al. (2013) che riportano 1.10 h ha⁻¹ per l'aratura, 1.7 h ha⁻¹ per l'erpicoltura (si presume che il passaggio di frangizolle ha lo stesso impegno), 0.9 h ha⁻¹ per la semina, 0.8 h ha⁻¹ per la raccolta, e si presume che ciascuna delle fasi di andatura ed imballatura richiedono 1 h ha⁻¹, per un totale di 8.2 h ha⁻¹ ore lavorate, portando il prezzo totale dell'uso delle macchine a 123 € ha⁻¹. Questo valore è molto simile ai 126 € ha⁻¹ riportati per la produzione del frumento in Emilia-Romagna (Tamburini et al., 2015), una coltura che richiede un impegno dal punto di vista lavorativo simile alla canapa. Questi ultimi autori hanno anche riportato un costo di carburante per le fasi agronomiche di 43.2 € ha⁻¹, quando la nostra stima per il percorso il più costoso essendo di 56.88 € ha⁻¹. La differenza può essere dovuta da diversi fattori come, ad esempio, il fatto che 8 anni separano il nostro studio con quello di Tamburini et al. (2015).

Per il costo del gasolio agricolo viene considerato il valore medio dell'anno 2023 (da gennaio a settembre) pari a 1.15 € L⁻¹. Considerando una densità di 0.85 kg L⁻¹, il prezzo diventa 0.9775 € kg⁻¹. Il prezzo di ciascuna fase di lavorazione viene stimato considerando i valori di consumo di gasolio utilizzati nell'analisi del ciclo di vita ambientale.

Il prezzo della manodopera viene stimato dallo studio di Tamburini et al. (2015) i quali riportato un valore pari a 95.72 € ha⁻¹ per il frumento in Emilia-Romagna.

Il costo del trasporto delle rotoballe dal campo all'impianto di lavorazione è stato stimato sulla base del costo del trasporto delle rotoballe usato nel progetto per valutare l'impianto sperimentale di trasformazione degli steli di canapa. Queste rotoballe sono state spedite dall'azienda sperimentale Cerzoo (PC) verso l'Az. Agr. Losi (MO). Il costo finale di trasporto è stato valutato pari a 0.63 € Mg⁻¹ km⁻¹. Il costo di trasporto del seme è stato stimato essere lo stesso.

Il prezzo d'acquisto del seme è stato stimato dall'acquisto di sementi da Hemp-it, i maggiori produttori di sementi di canapa industriale in Europa e comprende il prezzo legato alla produzione del seme (5.50 € kg⁻¹) a cui si aggiungono le spese amministrative, di confezionamento e di spedizione (1.21

€ kg⁻¹). È da considerare che questo valore è stato ottenuto da un acquisto di 335 kg di sementi, e che acquisti più elevati potrebbero permettere di abbassare il costo d'acquisto delle sementi.

Per quanto riguarda i fertilizzanti, i prezzi riportati nel presente documento corrispondono ai prezzi pubblicati dalla borsa delle merci di Mantova al 28 settembre 2023 per l'acquisto di fertilizzanti all'ingrosso, e sono riportati nella Tabella 6. I valori delle quantità di fertilizzante applicate variano a seconda degli scenari considerati.

Il costo dell'elettricità è quello riportato al 28 di settembre 2023, che vale 0.11835 € kWh⁻¹.

Il costo del terreno è stato stimato sulla base del costo dell'affitto del terreno per usi agricoli. Considerando che non c'è l'IMU per proprietari che coltivano direttamente, il solo costo che si può considerare è quello dell'affitto, nel caso in cui l'agricoltore non sia proprietario del terreno coltivato. L'affitto varia solitamente tra 600 e 700 € all'ettaro all'anno nella zona di Bologna. Nel presente documento, si considera un valore dell'affitto di 700 € all'ettaro all'anno per rimanere nell'ottica di uno scenario poco vantaggioso.

Tabella 6. Consumo di gasolio e costi stimati per ciascuna fase di coltivazione della canapa. Nd: non definibile.

Fase del processo	Nota	Gasolio (kg ha ⁻¹)	Costi stimati (€ ha ⁻¹)
Acquisto e manutenzione macchinaria	Prezzo legato alla macchinaria	Nd	123
Aratura	Prezzi legati al consumo di gasolio	16.62	16.25
Frangizolle		14.78	14.45
Erpicoltura		13.57	13.26
Semina		0.2	0.20
Fertilizzazione		0 – 0.2	0.20
Raccolta		2.94 – 9.03	2.87 – 8.83
Andanatura		2.94	2.87
Imballatura		0.84	0.82
Caricamento balle su mezzo di trasporto		0.42	0.41
Trasporto steli verso impianto (0.63 € Mg ⁻¹ km ⁻¹)	Distanza fra luogo di produzione e impianto (da 10 a 50 km).	1.13 – 5.64	31.5 – 220.5
Acquisto sementi	Da 45 a 67.5 kg ha ⁻¹ a seconda della tipologia di produzione (6.71 € kg ⁻¹)	Nd	301.95 – 452.93
Acquisto urea (46 %)	0 – 75 kg _N ha ⁻¹ (0.546 € kg ⁻¹)	Nd	0.00 – 89.02
Acquisto P ₂ O ₅ (18 %)	0 – 38 kg _{P₂O₅} ha ⁻¹ (0.371 € kg ⁻¹)	Nd	0.00 – 14.10
Acquisto K ₂ O (60%)	0 – 113 kg _{K₂O} ha ⁻¹ (0.616 € kg ⁻¹)	Nd	0.00 – 69.61
Trasporto semi (0.013 kg Mg ⁻¹ km ⁻¹)	Distanza fra luogo di produzione e impianto di essiccamento (10 km).	0.107	0.11
Essiccamento semi	Consumo energetico riportato in kWh ha ⁻¹ di elettricità.	8.30 – 13.28 kWh ha ⁻¹	0.98 – 1.57
Costo personale		Nd	95.72
Costo terreno / affitto		Nd	700.00

2.1.2. Risultati

Il costo totale della produzione agricola della canapa varia a seconda dello scenario tra 1313.39 € ha⁻¹ (scenario n°11) e 1816.21 € ha⁻¹ (scenario n°2). La fonte di costo più elevata è il costo dell'affitto del terreno (700 € ha⁻¹ anno⁻¹) che rappresenta il 41 % - 58 % del costo totale della produzione agricola della canapa nei vari scenari. Al di fuori del costo del terreno, la coltivazione della canapa richiede investimenti compresi tra 515.39 € ha⁻¹ e 1018.21 € ha⁻¹ a seconda dello scenario produttivo preso in considerazione (scenario n° 11 – meno costoso, scenario n° 2 – più costoso). Tra le voci di costo, quella più importante è l'acquisto delle sementi (che varia tra 19 % e 33 % del costo totale della produzione,

a seconda del scenario), seguito dal costo delle operazioni di fertilizzazione (l'acquisto dei fertilizzanti e la fertilizzazione sono stimati a 172.93 € ha⁻¹, che rappresenta il 10 % - 12 % del costo totale a seconda del scenario), l'acquisto e la manutenzione dei macchinari (stimata a 123 € ha⁻¹, che rappresenta il 7 % - 10 % del costo totale di produzione) e il costo del personale (stimato a 95.72 € ha⁻¹, che rappresenta il 6 % - 8 % del costo totale di produzione). Anche il trasporto degli steli può essere considerata una fonte di costi non trascurabile, considerando che varia tra 44.1 € ha⁻¹ (10 km di distanza tra campo e impianto) e 220.5 € ha⁻¹ (50 km di distanza tra campo e impianto). L'impatto dell'acquisto del gasolio per le operazioni agronomiche varia tra i 51.13 e i 57.09 € ha⁻¹ e rimane un fonte di costo minore della produzione della canapa (Tabella 7). Anche il trasporto e l'essiccamento dei semi sono fonte di costi trascurabile.

Tabella 7. Differenti fonti di costi della coltivazione della canapa.

Scenario	acquisto / manutenzione macchinaria	Gasolio	acquisto fertilizzanti	Trasporto balle	trasporto semi	essiccamento semi	acquisto sementi	manodopera	affitto	costi totali (€ ha ⁻¹)
1	123	51.33	172.73	44.1	0	0	452.93	95.72	700	1639.81
2	123	51.33	172.73	220.5	0	0	452.93	95.72	700	1816.21
3	123	57.29	172.73	44.1	5.04	1.57	301.95	95.72	700	1501.40
4	123	57.29	172.73	220.5	5.04	1.57	301.95	95.72	700	1677.80
5	123	51.13	0	44.1	0	0	452.93	95.72	700	1466.88
6	123	51.13	0	220.5	0	0	452.93	95.72	700	1643.28
7	123	57.09	0	44.1	5.04	1.57	301.95	95.72	700	1328.47
8	123	57.09	0	220.5	5.04	1.57	301.95	95.72	700	1504.87
9	123	51.13	0	31.5	0	0	452.93	95.72	700	1454.28
10	123	51.13	0	157.5	0	0	452.93	95.72	700	1580.28
11	123	57.09	0	31.5	3.15	0.98	301.95	95.72	700	1313.39
12	123	57.09	0	157.5	3.15	0.98	301.95	95.72	700	1439.39

Si osserva in generale che, gli scenari più vantaggiosi sono quelli in cui la canapa viene coltivata per una duplice attitudine produttiva, in quanto i costi di produzione vengono già recuperati dalla sola produzione di semi negli scenari n° 3, 4, 7 e 8.

Anche una differenza di resa di steli pari a 2 Mg ha⁻¹ ha un effetto non trascurabile sul punto di pareggio. Questo è visibile nella differenza tra gli scenari n° 5 e 9 in cui il punto di pareggio passa da 195.55 € Mg⁻¹ (nello scenario in cui la resa di steli è di 7 Mg ha⁻¹) a 271.26 € Mg⁻¹ (per lo scenario in cui la canapa produce 5 Mg ha⁻¹ di steli).

Tabella 8. Punti di pareggio per la vendita di steli per ogni scenario. Valori negativi indicano che la sola vendita dei semi permette di compensare i costi di produzione.

Scenario	Punto di pareggio per gli steli (€ Mg ⁻¹)
1	234.26
2	259.46
3	-14.09
4	11.11
5	209.55
6	234.75
7	-38.79
8	-13.59
9	290.86
10	316.06
11	62.68
12	87.88

Il ruolo della fertilizzazione sul bilancio finanziario finale non è anch'esso trascurabile poiché può rappresentare fino al 12 % del costo globale (scenario n°3). Però, viene controbilanciato

dall'incremento della resa di steli di 2 Mg ha⁻¹. Infatti, il punto di pareggio per la vendita di steli, è più bassa per una coltura fertilizzata che produce 7 Mg ha⁻¹ di steli che una coltura non fertilizzata che ne produce solamente 5 Mg ha⁻¹. Si può quindi considerare che, come nell'ambito dell'analisi delle emissioni di carbonio, la fertilizzazione può essere vantaggiosa se permette di aumentare la produttività di steli. Diventa quindi importante determinare se la fertilizzazione è necessaria o meno, poiché permette di ottimizzare il bilancio in modo significativo.

La determinazione del punto di pareggio per la vendita di steli, si può considerare un prezzo di vendita di 2000.00 € Mg⁻¹ per i semi, e considerando i valori di produttività di steli e semi per ciascuno scenario. Questo punto di pareggio è riportato per ogni scenario in Tabella 8.

La distanza tra il campo e l'impianto di lavorazione rimane di minor importanza sul bilancio finale.

Per stimare il margine lordo, viene considerato un prezzo di vendita degli steli di 230 € Mg⁻¹. Questo prezzo verrà considerato anche nella sezione successiva nell'analisi del ciclo di vita economico dell'impianto di lavorazione degli steli di canapa. Diventa chiaro osservando i valori stimati di margine lordo (Tabella 9) che gli scenari più vantaggiosi coinvolgono la duplice attitudine produttiva di steli e semi, come si osserva dalla differenza di margine lordo tra lo scenario n° 1 (fibra sola, margine lordo di -29.81 € ha⁻¹) e lo scenario n° 3 (fibra e semi, margine lordo di 1708.60 € ha⁻¹). La resa di steli e semi può essere considerata come il secondo fattore il più importante nella determinazione del margine lordo. Questo lo si osserva nella differenza presente tra lo scenario n° 7 (no fertilizzazione, resa alta e margine lordo di 1881.53 € ha⁻¹) e lo scenario n° 11 (no fertilizzazione, resa bassa di steli e semi, margine lordo di 836.60 € ha⁻¹). Quest'ultima osservazione evidenzia l'importanza delle scelte tecniche che vengono prese per ottimizzare la redditività della coltivazione della canapa.

Tabella 9. Bilancio economico finale delle fasi agronomiche.

Scenario	Costi totali (€ ha ⁻¹)	Punto di pareggio per gli steli (€ Mg ⁻¹)	Margine lordo (€ ha ⁻¹)
1	1639.81	234.26	-29.81
2	1816.21	259.46	-206.21
3	1501.40	-14.09	1708.60
4	1677.80	11.11	1532.20
5	1466.88	209.55	143.12
6	1643.28	234.75	-33.28
7	1328.47	-38.79	1881.53
8	1504.87	-13.59	1705.13
9	454.28	290.86	-304.28
10	1580.28	316.06	-430.28
11	1313.39	62.68	836.60
12	1439.39	87.88	710.61

2.2. Costo dell'impianto di prima lavorazione degli steli

In totale i costi dell'impianto possono essere divisi in due categorie: i costi d'acquisto e i costi di funzionamento. È stato stimato un costo di 1600000.00 € per l'acquisto delle 27 unità lavorative dell'impianto e, considerando un ammortamento di 7 anni, viene trasformato in un costo annuale di 228571.00 €.

Come altri costi annuali, ci sono: costo dell'elettricità, della manodopera, della materia prima (steli di canapa), assicurazione, amministrativi, affitto, di consulenza e manutenzione.

Il calcolo del costo annuale dell'energia viene realizzato considerando una capacità lavorativa dell'impianto di 1 tonnellate di steli all'ora, considerando 7 ore lavorative al giorno per 220 giorni lavorativi all'anno e un consumo elettrico di 660 kWh. Questo porta ad un costo totale per l'energia di 120290.90 €.

Il prezzo d'acquisto della materia prima è stato fissato a 230 € Mg⁻¹ di steli di canapa.

Tabella 10. Costi annuali stimati per il funzionamento dell'impianto di lavorazione degli steli di canapa.

Fonte di costi	Prezzo	Costo annuale stimato (€)
Acquisto materia prima	230 € Mg ⁻¹	486220.00
Energia elettrica	0.11835 € kWh ⁻¹	120290.90
Manodopera		200000.00
Amministrativi		50000.00
Consulenza		30000.00
Affitto		75000.00
Manutenzione, costi addizionali		45000.00
Ammortamento		228571.00
Costi totali		1 235 082.90

La fattibilità economica di tale impianto è strettamente legata ai prezzi di vendita delle materiali semi lavorati ottenuti in uscita dall'impianto. Questi prezzi dovendo essere simili o inferiori rispetto a quelli di materiali simile già disponibili sul mercato.

I prezzi di vendita del canapulo destinato alla bioedilizia (frazione fine e polvere) sono stati ottenuti dall'azienda SENINI S.R.L., per la quale il canapulo grossolano (0 – 25 mm) è venduto a 1281.00 € Mg⁻¹ (IVA 22 % inclusa), e il canapulo fine (0 – 6 mm) a 1152.91 € Mg⁻¹. Sul mercato delle lettiere per animali, il canapulo si vende generalmente ad un prezzo al dettaglio di 2.20 – 2.30 € kg⁻¹. Per altre lettiere, i prezzi variano tra 1.24 € kg⁻¹ e 2.05 € kg⁻¹, per quantità che superano i 10 kg. La fibra per la realizzazione di pannelli termo-fonoisolanti è vendita a 3.58 € kg⁻¹ (Canawool) o 3.00 € kg⁻¹ (Canapuglia) (prezzi al dettaglio).

Considerando un margine abbastanza elevato per potere tenere conto di altri fonti di costi (logistica, distribuzione, packaging...etc.), possono essere definiti prezzi di vendita di 1.10 € kg⁻¹, 0.90 € kg⁻¹, 0.60 € kg⁻¹ e 0.4 € kg⁻¹ rispettivamente per le frazioni di fibra, canapulo medio, canapulo fine e polvere. Considerando che la produzione finale dell'impianto sarebbe quindi di 35 % di frazione grossolana di fibra, di 45 % di frazione media di canapulo, di 10 % di frazione fine e di 10 % di polvere, e considerando una produzione annuale di 1540 tonnellate di steli, si produrrebbero 539 Mg di fibra, 693 Mg di frazione media, e 154 Mg di frazione fine e di polvere. Questa produzione annuale potrebbe quindi essere valutata a 1370600.00 €, superando i costi annuali di funzionamento dell'impianto, permettendo un margine lordo di 135517.10 €.

Bibliografia

- Adamovics, A., Ivanovs, S., Bulgakov, V., 2017. Investigations about the impact of the sowing time and rate of the biomass yield and quality of industrial hemp. *Agronomy Research*, 15 (4), 1455–1462. <https://doi.org/10.15159/ar.17.002>
- Bacenetti, J., Fusi, A., Negri, M., Bocchi, S., Fiala, M., 2016. Organic production systems: Sustainability assessment of rice in Italy. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 225, 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.03.046>
- Bastos, J., Lo Vullo, E., Muntean, M., Duerr, M., Kona, A., Bertoldi, P., 2020. GHG Emission Factors for Electricity Consumption. European Commission, Joint Research Centre (JRC). [Dataset] PID: <http://data.europa.eu/89h/919df040-0252-4e4e-ad82-c054896e1641>
- Brentrup, F., Lammel, J., Stephani, T., Christensen, B., 2018. Updated carbon footprint values for mineral fertilizers from different world regions. 11th International Conference on Life Cycle Assessment of Food in Conjunction with the 6th LCA AgriFood Asia and the 7th International Conference on Green and Sustainable Innovation (ICGSI). 17-19 October 2018.
- Canaj, K., Parente, A., D'Imperio, M., Boari, F., Buono, V., Toriello, M., Mehmeti, A., Montesano, F.F., 2022. Can Precise Irrigation Support the Sustainability of Protected Cultivation? A Life-Cycle Assessment and Life-Cycle Cost Analysis. *Water* 14, 6. <https://doi.org/10.3390/w14010006>
- Finnan, J., Styles, D., 2013. Hemp: A more sustainable annual energy crop for climate and energy policy. *Energy Policy* 58, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.02.046>
- Hastings, A., Mos, M., Yesufu, J.A., McCalmont, J., Schwarz, K., Shafei, R., Ashman, C., Nunn, C., Schuele, H., Cosentino, S., Scalici, G., Scordia, D., Wagner, M., Clifton-Brown, J., 2017. Economic and Environmental Assessment of Seed and Rhizome Propagated Miscanthus in the UK. *Frontiers in Plant Science* 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01058>
- Jayasundara, S., Wagner-Riddle, C., Dias, G., Kariyapperuma, K.A., 2014. Energy and greenhouse gas intensity of corn (*Zea mays* L.) production in Ontario: A regional assessment. *Can. J. Soil. Sci.* 94, 77–95. <https://doi.org/10.4141/cjss2013-044>
- Lask, J., Kam, J., Weik, J., Kiesel, A., Wagner, M., Lewandowski, I., 2021. A parsimonious model for calculating the greenhouse gas emissions of miscanthus cultivation using current commercial practice in the United Kingdom. *GCB Bioenergy* 13, 1087–1098. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12840>
- Marrot, L., Candelier, K., Valette, J., Lanvin, C., Horvat, B., Legan, L., DeVallance, D.B., 2022. Valorization of Hemp Stalk Waste Through Thermochemical Conversion for Energy and Electrical Applications. *Waste Biomass Valor* 13, 2267–2285. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01640-6>
- Mosier, A., Kroeze, C., Nevison, C., Oenema, O., Seitzinger, S., van Cleemput, O., 1998. Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 52, 225–248. <https://doi.org/10.1023/A:1009740530221>
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., Zhang, H., 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>
- Roer, A.-G., Korsath, A., Henriksen, T.M., Michelsen, O., Strømman, A.H., 2012. The influence of system boundaries on life cycle assessment of grain production in central southeast Norway. *Agricultural Systems* 111, 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.05.007>
- Tamburini, E., Pedrini, P., Marchetti, M.G., Fano, E.A., Castaldelli, G., 2015. Life Cycle Based Evaluation of Environmental and Economic Impacts of Agricultural Productions in the Mediterranean Area. *Sustainability* 7, 2915–2935. <https://doi.org/10.3390/su7032915>
- van der Werf, H.M.G., 2004. Life Cycle Analysis of field production of fibre hemp, the effect of production practices on environmental impacts. *Euphytica* 140, 13–23. <https://doi.org/10.1007/s10681-004-4750-2>
- Wang, W., Dalal, R.C., 2015. Nitrogen management is the key for low-emission wheat production in Australia: A life cycle perspective. *European Journal of Agronomy* 66, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.02.007>

