DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE AGRARIE E DEL TERRITORIO

VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE DELLA PRODUZIONE DI FRAGOLA IN COLTIVAZIONE PROTETTA

ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF STRAWBERRY PRODUCTION UNDER PROTECTED CULTIVATION

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
FRANCESCO AVELLINI

Relatore:
PROF. ESTER FOPPA PEDRETTI

Correlatore:
DOTT. DANIELE DUCA
DOTT. ALESSIO ILARI

ANNO ACCADEMICO 2019-2020

SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE 4

ELENCO DELLE FIGURE 5

ELENCO DEI GRAFICI 6

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI 7

PREMESSA 9

CAPITOLO 1 INTRODUZIONE 11

1.1 Stato dell'arte 12

CAPITOLO 2 LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) 16

2.1 Obbiettivo e scopo 18

2.2 Life Cycle Inventory (LCI) 19

2.3 Life Cycle Impact Assessment (LCIA) 21

2.4 Interpretazione 23

2.5 Reporting 23

CAPITOLO 3 IL SOFTWARE SIMAPRO 24

3.1 Goal and Scope 24

3.2 Inventory 25

3.3 Impact Assessment 26

3.4 Interpretation 26

3.5 General data 27

CAPITOLO 4 CASO DI STUDIO 28

4.1 Obbiettivo 28

4.2 Scopo 28

4.3 Inventario LCI 32

4.4 Risultati 38

4.5 Discussione 47

CONCLUSIONI 51

BIBLIOGRAFIA 52

SITOGRAFIA 54

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 4-1: Dati d'inventario per la coltivazione in suolo 33
Tabella 4-2: Dati d'inventario per la coltivazione fuorisuolo 33
Tabella 4-3: Dati d'inventario delle fertilizzazioni in coltura al suolo 34
Tabella 4-4: Dati d'inventario delle fertilizzazioni in coltura fuorisuolo 35
Tabella 4-5: Dati d'inventario dei trattamenti fitosanitari in coltura al suolo 35
Tabella 4-6: Dati d'inventario dei trattamenti fitosanitari in coltura fuorisuolo 36
Tabella 4-7: Emissioni dei fertilizzanti in coltura al suolo 37
Tabella 4-8: Dati d'inventario di packaging in coltura al suolo 37
Tabella 4-9: Dati d'inventario di packaging in coltura fuorisuolo 38
Tabella 4-10: Impatto ambientale dei due sistemi di coltivazione in studio 38
Tabella 4-11: Impatto ambientale del sistema di coltivazione in suolo sotto tunnel 39
Tabella 4-12: Impatto ambientale del sistema di coltivazione fuorisuolo 40
Tabella 4-13: Variazione percentuale d'impatto sulla base della resa 46
Tabella 4-14: Confronto dell'impatto nella sostituzione della cassetta in PP con un cartoncino usa e getta in coltivazione sotto tunnel 47

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 2-1: Esempio di un insieme di processi unitari in un sistema produttivo 17
Figura 2-2: Fasi del processo LCA 18
Figura 2-3: Elementi della fase LCIA 22
Figura 3-1: Processo di creazione del database EcoInvent (fonte: manuale di introduzione al SimaPro) 25
Figura 4-1: Confini del sistema per la valutazione del ciclo di vita della produzione di fragola (linea tratteggiata) 31

ELENCO DEI GRAFICI

Grafico 4-1: Confronto delle fasi di coltivazione e packaging per entrambi i sistemi di coltivazione (T=tunnel, F=fuorisuolo) 41
Grafico 4-2: Confronto degli input utilizzati nei due sistemi di coltivazione (T=tunnel, F=fuorisuolo) 41
Grafico 4-3: Contributo d'impatto delle fasi di coltivazione e packaging nella coltivazione in suolo 42
Grafico 4-4: Contributo d'impatto dei diversi input nella coltivazione in suolo 43
Grafico 4-5: Contributo d'impatto delle fasi di coltivazione e packaging nella coltivazione fuorisuolo 44
Grafico 4-6: Contributo d'impatto dei diversi input nella coltivazione soilless 45
Grafico 4-7: Confronto della sensitività sulle rese in entrambi i sistemi di coltivazione . 46

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

PAC	Politica Agricola Comune
GHGs	Gas serra (Greenhouse gases)
IR	Raggi infrarossi
OF	Coltivazione in campo aperto (Open Field)
GH	Coltivazione in serra (Greenhouse)
SHSA	Sustainability Hot Spot Analysis
PEF	Product Environmental Footprint
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
FU	Functional Unit
cv	Cultivar
PP	Polipropilene
ADP	Abiotic depletion
ADP_f	Abiotic depletion (fossil fuels)
GWP	Global warming
ODP	Ozone layer depletion
HTP	Human toxicity
FEP	Fresh water aquatic ecotoxicity
MEP	Marine aquatic ecotoxicity
TEP	Terrestrial ecotoxicity
POCP	Photochemical oxidation

AP	Acidification
EP	Eutrophication
MSETP	Marine sedimental ecotoxicity
CF	Carbon Footprint

PREMESSA

Dal secondo dopoguerra in poi il mondo occidentale, in particolare l'Europa, ha risposto all'imperativo dominante di incrementare la produzione di beni per soddisfare, in un primo tempo, alle esigenze primarie di popolazioni stremate da anni di conflitto e, in decenni più recenti, agli imperativi consumistici. L'agricoltura del nostro continente, peraltro guidata da politiche che hanno innanzitutto provveduto a "mettere in sicurezza" la popolazione europea, è stata spinta ad un forte aumento delle produzioni utili sia a rispondere ad una domanda di beni sempre più ampia ma anche da speculazioni nate in ambiti lobbistici (si ricorda a questo proposito l'annosa vicenda delle "quote latte").

Per tanto nel 1962 nasce in ambito europeo la politica agricola comune (PAC), che viene gestita e finanziata con risorse del bilancio UE. Come già detto in precedenza, questa nuova politica a favore dell'agricoltura nasce dalla guerra mondiale e dagli anni successivi ad essa, con l'obbiettivo di garantire un prezzo predeterminato dei beni così da garantire ai produttori un reddito di base con cui sostenersi. In pratica la Comunità era disposta ad acquistare qualsiasi prodotto in qualsiasi momento, per far sì che il prezzo non scendesse sotto a quello predeterminato. In questa prima fase erano importanti due elementi essenziali:

1. che nella Comunità Europea non circolassero merci estere, perché avrebbero perturbato il sistema, con la Comunità che avrebbe dovuto acquistare lei stessa queste merci per mantenere il mercato in equilibrio con un prezzo sostenuto;
2. la ricollocazione delle merci acquistate dalla Comunità Europea, e quindi l'incentivazione di aiuti e meccanismi per liberare i magazzini, o sul mercato interno o sul quello estero con incentivi all'esportazione.

Purtroppo, questo sistema, nato con una sua precisa logica, doveva essere utilizzato con buon senso e moderazione. Invece, proprio per andare incontro a certe sezioni di mercato, furono fissati prezzi troppo elevati che portarono ad una stimolazione di sovra-produzione, generando un'agricoltura produttrice slegata dal mercato. Da un lato si generarono alcune distorsioni riguardanti le forme agricole europee (es. produzione di latte in Olanda o produzione di cereali in Francia), dall'altro un fatto ancora più grave che riguarda le

esportazioni: nei paesi in via di sviluppo vennero riversate molte derrate in eccesso a discapito dell'economia locale.

Alla fine degli anni '90 si cerca di cambiare rotta: non più prezzi garantiti legati alla produzione ma sostegni legati alla presenza di aziende agricole (erogazione diretta agli agricoltori). E quindi nel 2003 la PAC viene riformata nell'ottica di fornire un sostegno al reddito, con agricoltori che si impregnino a rispettare le norme in ambito ambientale, sicurezza alimentare e benessere animale. In questa nuova forma di politica il contributo viene definito "disaccoppiato" alla produzione, a prescindere se produce e che cosa produce. Tutto ciò ha portato effetti positivi, ed in particolare meno pressione nei paesi in via di sviluppo, ma al tempo stesso si sono generate nuove distorsioni: non è più necessario che un'agricoltura produca per un mercato locale perché l'aiuto è slegato dalla produzione e quindi l'agricoltore percepisce il contributo anche se la produzione non viene attuata.

In questo panorama l'agricoltura si è quindi trasformata in un sistema intensivo e tutto ciò ha portato ad un uso sempre più spinto di input e risorse, tenendo poco conto delle ripercussioni sul piano ambientale. In sintesi, l'intensivazione della produzione agricola ha portato alla perdita di biodiversità, al consumo di risorse non rinnovabili e all'inquinamento ambientale. La combinazione di tutti questi fattori ha portato e porterà alla perdita della qualità dei suoli, minacciando tutti i sistemi agricoli produttivi. Tuttavia, anche grazie a profonde revisioni della politica agricola comunitaria (PAC) che dal 2013 viene riformata profondamente, promuovendo il rafforzamento della competitività del settore agricolo, mediante l'innovazione e la sostenibilità economica, sociale e ambientale delle produzioni. Quindi fra i diversi obbiettivi della PAC vi è anche l'agricoltura sostenibile anche da un punto di vista ambientale: agli agricoltori si chiede, da una parte di produrre alimenti però in una gestione del sistema che protegga l'ambiente e salvaguardi la biodiversità.

Capitolo 1
INTRODUZIONE

Nelle problematiche di tipo ambientale ricorre spesso il termine "*Greenhouse gases*" (GHGs). Il termine GHGs indica i gas di origine naturale od antropica che a livello dell'atmosfera sono in grado di assorbire e riemettere i raggi infrarossi (United Nations, 1992). In GHGs il gas più abbondante è la CO_2, a cui segue metano (CH_4), protossido di azoto (N_2O), Clorofluorocarburi (CFC) e altri gas minori. La presenza massiccia di questi gas a livello atmosferico aumenta la riflessione dei raggi infrarossi (IR), e questo genera un aumento di quello che viene definito "effetto serra". E questo aumento di IR provoca di conseguenza un aumento delle temperature medie del pianeta, con i risultati a cui negli ultimi anni stiamo assistendo.

Perciò si sta sempre più affermando il concetto di sostenibilità. Merwin e Pritts [1] affermano che un sistema sostenibile è un sistema che ottimizza le risorse per soddisfare la domanda, ma allo stesso tempo protegge e conserva le risorse ambientali essenziali. Quindi con il concetto di sostenibilità si fa riferimento ad un sistema che fa uso delle risorse, ma in modo razionale ed equilibrato, tenendo conto degli impatti negativi che gravano sulle risorse e sull'ambiente. D. Valiante *et al.* affermano che quindi l'approccio ambientale sta diventando una risorsa strategica importante per la gestione sostenibile dei prodotti alimentari [2] e M.D. Stevens *et al.* affermano che le nuove pratiche agricole dovrebbero essere valutate al fine di migliore la sostenibilità, come capacità di conservazione del suolo, dell'acqua, dell'ambiente [3]. D. Valiante *et al.* affermano inoltre che questa tipologia di approccio è interessante perché richiede una comprensione approfondita delle questioni complesse relative al sistema di produzione di un determinato prodotto [2].

Fra i prodotti alimentari, la fragola è uno dei frutti ampiamente consumati al mondo e negli ultimi anni la sua coltivazione ha visto un incremento piuttosto elevato di superficie, che è stato accompagnato anche da un'intensificazione delle tecniche di produzione, con lo scopo di ottenere il massimo reddito. Una coltivazione più intensiva è sicuramente un sistema più soggetto ai rischi ambientali già citati precedentemente.

1.1 **Stato dell'arte**

La coltivazione della fragola può essere praticata in pieno campo (OF) o in coltura protetta in serra (GH). In generale la fragola viene considerata una coltura con un alto consumo di risorse. La pianta ha un apparato radicale piuttosto superficiale e, quindi, richiede un consumo di acqua piuttosto elevato. Inoltre, durante il ciclo produttivo richiede un uso piuttosto elevato di fertilizzanti e fitofarmaci per il controllo delle diverse avversità. Pertanto, nella letteratura internazionale sono presenti diversi lavori, con lo scopo di valutare la sostenibilità della coltivazione della fragola con differenti tecniche agricole.

La coltivazione in pieno campo può essere svolta con pratiche colturali diverse, a seconda della regione in cui ci si trova. M.D. Stevens *et al.*, in uno studio svolto negli USA (Beltsville, MD), hanno lavorato su tre sistemi di coltivazione a campo aperto che comprendevano l'uso di pacciamature in plastica, pacciamature con "cover crop" e sistemi convenzionali con uso di fumiganti per il suolo [3]. In questo lavoro sono state anche analizzate le perdite per "run off" nonché i residui di fitofarmaci presenti nel suolo. O. Rysin *et al.*, con una sperimentazione condotta nel sud-est degli USA, hanno studiato le differenze fra tre sistemi di coltivazione in pieno campo: convenzionale con uso di fumiganti, "composto system" senza uso di fumiganti e biologico, con pratiche che richiamano l'agricoltura biologica [4]. Oltre ad una valutazione economica fra i tre sistemi di coltivazione, sono stati anche analizzati indicatori per la salute umana e per la qualità dell'ambiente.

Per quanto riguarda la coltivazione in serra B. Khoshnevisan *et al.* affermano che le serre sono considerate un sistema di produzione intensivo rispetto al pieno campo, in termini di investimento, costi e consumo di energia [5]. In particolare, il maggior consumo di energia è causa di numerose problematiche ambientali come il surriscaldamento globale e la produzione di gas ad effetto serra (GHGs). In uno studio svolto nel 2013, lo stesso autore afferma che nelle serre si è raggiunta una elevata produttività grazie al progresso tecnico, ad un uso elevatissimo di fertilizzanti chimici e fitofarmaci e al controllo dei parametri ambientali all'interno della serra stessa (temperatura, luce, composizione atmosfera).

Nella letteratura sono presenti numerosi lavori di confronto dei consumi energetici e delle emissioni di gas serra fra coltivazioni a campo aperto e coltivazione in serra. In tutti i lavori presi in esame le emissioni da GH sono sempre superiori alla coltivazione in OF. Questi valori più elevati sono sempre riconducibili, naturalmente, ad un uso di risorse più elevato. L'ambiente protetto ha necessità di essere rifornito di acqua, non intercettando le precipitazioni; di conseguenza sono necessari sistemi di approvvigionamento ed irrigazione che garantiscano l'acqua per le piante. Altri aspetti possono anche riguardare l'uso di

fertilizzanti chimici e fitofarmaci che in serra possono essere più elevati, ma la voce più elevata è data dall'uso di risorse naturali od elettricità per il riscaldamento della serra. Infatti, nella coltivazione in GH è importante il riscaldamento dell'ambiente a temperature ottimali al fine di ottenere una produzione valida. B. Khoshnevisan *et al.* hanno confrontato i consumi energetici fra OF e GH basandosi su dati di realtà presenti in Iran [6]. Dalla valutazione dell'efficienza dell'uso dell'energia è emerso che l'apporto energetico per le serre in MJ era circa quaranta volte superiore a quello del campo aperto, così come le emissioni di $CO_{2\ eq}$ risultavano anch'esse circa quaranta volte superiori. In un altro lavoro, svolto da E. Soode-Schimonsky *et al.*, si confrontano coltivazioni di fragole in Estonia e Germania, coltivate in OF, GH e Polytunnel (tunnel in polietilene o policarbonato) [7]. Anche in questo caso la coltivazione in GH risulta avere valori cinque volte superiori alla coltivazione in OP convenzionale. Lo stesso autore conclude dicendo che per la coltivazione in GH un grande problema rimane il riscaldamento e anche l'uso di risorse energetiche alternative, come ad esempio il legno, in sostituzione del combustibile fossile porta comunque alla formazione di particolato e, di conseguenza, ad una penalizzazione della sostenibilità.

La valutazione della sostenibilità ambientale di qualsiasi prodotto rimane al giorno d'oggi una metodologia d'indagine piuttosto difficile e complessa, perché si pone come obbiettivo la valutazione di tutti i processi che contribuiscono alla produzione del bene. Soprattutto in campo agricolo, e quindi anche con la fragola, queste problematiche tendono ad essere più evidenti. Infatti, per ogni tipologia di prodotto esistono numerose varianti del processo produttivo che possono riguardare in particolar modo la modalità di coltivazione, il post-harvester e il trasporto. Per tale ragione in letteratura si possono trovare diversi lavori che prendono in esame strumenti di valutazione diversi. E. Soode *et al.*, in un lavoro svolto in Germania su diversi prodotti agricoli, affermano infatti che ad uno stesso prodotto non può essere assegnato un preciso valore per quanto riguarda le emissioni in carbonio e che quest'ultimo dipende dalla tipologia di riscaldamento (se in GH), dal tipo di coltivazione, dal tipo di trasporto, e anche dal comportamento del consumatore [8]. Katrin Bienge, Justus von Geibler e Michael Lettenmeier, in un Symposium a Vienna nel 2009, propongono la "Sustainability hot spot analysis" (SHSA, definito come uno strumento di valutazione qualitativa, che stima l'intensità delle risorse di un prodotto lungo la catena. Vengono presi in considerazione criteri ecologici ed impatti ambientali. Dopo la definizione dei confini del sistema con le diverse fasi del ciclo di vita del prodotto, vengono presi in considerazione gli impatti direttamente collegati al prodotto stesso e viene assegnato a ciascuna fase o aspetto del ciclo una pertinenza, cioè un punteggio che esprime il collegamento più o meno diretto del

prodotto con l'impatto ecologico e sociale. SHSA risulta quindi un'analisi qualitativa che può indicare quale fase o aspetto del ciclo di un prodotto è più incidente sul campo ambientale. Quindi può fornire uno studio preparatorio per condurre analisi LCA (Life Cycle Assesment). M.D. Stevens *et al.*, in uno studio di confronto fra sistemi di coltivazione di fragole a campo aperto, analizzano gli effetti ambientali sotto forma di perdite di run-off, erosione e residui di fitofarmaci presenti nelle acque di run-off [3]. Per i campioni di deflusso si sono quindi valutati la presenza di solidi, di nitrati e la concentrazione di fitofarmaci. E.Soode-Schimonsky *et al.*, in uno studio fra coltivazioni di fragole in Estonia e Germania, hanno utilizzato il "Product Environmental Footprint" (PEF) [7]. Il PEF è una metodologia che, sulla base di vari criteri, consente di misurare le prestazioni ambientali lungo il ciclo di vita di un prodotto. Questo processo è basato sulla LCA, di cui si parlerà successivamente, e che viene utilizzata al fine di calcolare la "performance" ambientale di un prodotto durante il suo percorso di vita. Le informazioni che fornisce il PEF hanno l'obbiettivo di valutare gli impatti ambientali dei prodotti, fornendo un risultato che in primo luogo ci dà una idea del peso che quel prodotto ha a livello ambientale. D. Valiante *et al.*, B. Khoshnevisan *et al.* e S.M.H. Tabatabaie, G.S. Murthy *et al.* hanno messo a confronto coltivazioni di fragole mediante il sistema LCA [2][5][9]. Questa metodologia riguarda la valutazione degli input, degli output e dei potenziali impatti ambientali di un sistema di produzione, attraverso l'analisi del ciclo di vita di un prodotto.

I confini del sistema definiscono quali sono i processi e gli input delle unità incluse nella LCA, o comunque sia definiscono i limiti entro cui viene svolta la valutazione. Nel confronto fra coltivazioni di fragole in Iran [5] non sono stati presi in considerazione il trasporto, il post-harvest e lo smaltimento dei rifiuti. Pertanto, i dati della valutazione sono collegati ad un prodotto appena prima della vendita. Anche S.M.H. Tabatabaie, G.S. Murthy *et al.* limitano il loro lavoro ad un prodotto (fragola) prima della sua vendita o del suo trasporto [9]. Invece, un'analisi di prodotti ortofrutticoli in Germania ha coinvolto tutto il ciclo, dalla fase di presemina alle fasi di consumo in casa, dall'acquisizione delle materie prime allo smaltimento finale [7]. Anche D. Valiante *et al.*, nello studio di impatto ambientale fra coltivazione di fragole in Italia e Svizzera, hanno utilizzato un approccio "cradle-to-farm gate", e di conseguenza, il ciclo di vita di ogni processo agricolo è stato incluso all'interno il confine del sistema [2]. Pertanto, la comparazione di lavori differenti, riguarda non solo la tipologia di metodologia che è stata applicata, ma anche i confini del sistema preso in esame. Come afferma anche S. Clune *et al.*, in un lavoro sulle emissioni di gas serra di diversi tipologie di prodotti alimentari, gli scostamenti che ci sono fra i diversi valori ricavati dalla letteratura per

uno stesso prodotto possono essere dovuti sia ai diversi approcci LCA, ma anche alla posizione geografica, i metodi di raccolta dei dati primari, i processi presi in considerazione [10].

Un altro aspetto che emerge dall'analisi della letteratura internazionale riguarda l'unità funzionale. Questa può essere definita come l'unità a cui vengono poi riferiti i risultati finali. E. Soode *et al.* considera per la fragola come unità funzionale 1 kg di fragole in cestini di plastica poi acquistati dai consumatori, mentre S.M.H. Tabatabaie, G.S. Murthy *et al.* lavorano con 1 kg di fragole appena prima del trasporto o della vendita [8][9]. Invece B. Khoshnevisan *et al.*, nel confronto fra coltivazioni OF e GH di fragole in Iran, hanno definito come unità funzionale 1 ton di fragole prodotte [5].

Un ulteriore aspetto emergente dai lavori analizzati riguarda le emissioni di N nei vari processi. Nei lavori analizzati le emissioni vengono sempre calcolate come stima degli apporti di N al sistema. B. Khoshnevisan *et al.* stimano le emissioni di N_2O come 1,25 kg per 100 kg di N apportato [5]. In un altro lavoro vengono stimate emissioni dirette di N_2O al 1,25% dell'N fornito con i fertilizzanti [9]. In un ulteriore lavoro le emissioni di N_2O vengono stimate all'1% dell'N fornito per quelle dirette, mentre 1% per volatilizzazione e 0,75% per lisciviazione per quanto riguarda l'N_2O indiretto.

E. Soode *et al.*, in un lavoro svolto in Germania su diversi prodotti agricoli, affermano che anche il comportamento del consumatore può influire sul potenziale ambientale di un prodotto. Infatti, in questa valutazione, viene costituito un panel di consumatori relativo alla stagione delle fragole, per andare a valutare i dati relativi al consumatore [8]. Durante lo studio i clienti hanno collaborato nella compilazione di un questionario tramite il quale sono stati rilevati dati importanti per il calcolo della fase di consumo. L'indagine ha riguardato tre aspetti: il viaggio per l'acquisto, l'uso del prodotto e il fine vita del prodotto. Sebbene le voci maggiori di impatto ambientale siano originate da altre fasi del ciclo del prodotto, è emerso che anche il consumatore, sebbene in misura minore, può influenzare l'impatto ambientale di una data merce.

Dall'analisi dei lavori riguardanti lo studio della sostenibilità ambientale emerge che tale valutazione risulta piuttosto articolata e complessa, poiché riguarda l'analisi del ciclo di un prodotto considerando tutti gli input ad esso collegati. Infatti, un primo step riguarda proprio l'acquisizione dei dati, che in alcuni lavori sono stati ricavati tramite sondaggi, interviste o questionari direttamente nelle aziende prese in esame. Un secondo punto critico comprende il problema di trovare criteri univoci per assegnare a ciascun input il giusto peso all'interno del sistema. Di qui la difficoltà di reperire dati, magari mancanti, da altri Paesi dove ci possono essere contesti differenti da quelli in studio

Capitolo 2
LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)

L'aumento d'importanza della protezione ambientale e della consapevolezza dei possibili impatti sull'ambiente associati ai processi produttivi, hanno generato un interesse sempre crescente nella creazione e nello sviluppo di metodi di valutazione dei suddetti impatti. Life Cycle Assessment (LCA) è una delle metodologie più applicate in ambito della valutazione della sostenibilità ambientale. Tale metodologia è regolamentata dalle norme internazionali ISO 14040[11] e ISO 14044[12]. La norma ISO 14044 descrive in dettaglio i requisiti per condurre una LCA.

Una valutazione LCA affronta gli aspetti ambientali e i potenziali impatti relativi all'uso delle risorse materiali ed energetiche, durante il ciclo di vita di un prodotto, partendo dall'acquisizione delle materie prime fino al riciclaggio e allo smaltimento finale. È una compilazione e valutazione degli input/output e successivo calcolo dei potenziali impatti ambientali di un sistema di prodotto nel suo ciclo di vita "dalla culla alla tomba". Quindi una valutazione di questo tipo può essere utile per: valutare le prestazioni ambientali di prodotti in alcuni punti del loro ciclo di vita; promuovere un marketing legato ad un'etichettatura ecologica che tenga conto dell'incidenza ambientale del prodotto; pianificare strategie e progetti con priorità ecologica; valutare e selezionare gli indicatori delle prestazioni ambientali.

Infatti, LCA è una delle numerose tecniche di gestione ambientale come ad esempio valutazione del rischio, valutazione delle prestazioni ambientali, valutazione dell'impatto ambientale e non sempre è la tecnica più appropriata da utilizzare in tutte le situazioni, poiché il metodo LCA non prende in considerazione gli aspetti sociali ed economici.

Alla base di uno studio LCA vi sono alcuni principi legati a questo metodo di analisi. In primo luogo, si può parlare della prospettiva del ciclo di vita: uno studio LCA dovrebbe considerare l'intero ciclo di vita di un prodotto, dall'acquisizione e l'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento e al trattamento di fine vita. Inoltre, questo metodo di analisi ha come finalità il "Focus ambientale", per cui uno studio LCA si pone come obbiettivo la

valutazione degli aspetti e degli impatti ambientali, sia potenziali che di danno, mentre aspetti sociali od economici, come già detto in precedenza, non sono contemplati.

Un percorso LCA è anche una tecnica iterativa in cui ogni fase utilizza i risultati delle altre fasi. Perciò la completezza di ogni fase contribuisce ad avere uno studio più coerente con l'obbiettivo definito. Infine, sono importanti i principi della trasparenza e della completezza. Con il primo, vista la complessità stessa dello studio e dei sistemi presi in esame, si può arrivare ad una più corretta interpretazione dei dati, mediante un processo chiaramente definito. Uno studio completo è importante perché, prendendo in considerazione tutti gli aspetti che riguardano l'ambiente o le risorse all'interno dei confini definiti, risulta essere esaustivo.

Lo studio LCA lavora sul ciclo di vita di un prodotto che viene modellato come sistema di prodotto. Il sistema di prodotto viene suddiviso in un insieme di processi unitari e ogni processo unitario è collegato ad altri processi mediante flussi di prodotti intermedi, prodotti di rifiuto, o anche altri sistemi di prodotto (Figura 2-1). Questa suddivisione in processi unitari permette di capire meglio e di identificare il flusso di input e output: in alcuni casi ci saranno degli input che serviranno solo per produrre l'output, senza far parte del prodotto di output. I flussi che sono presi in esame comprendono sia l'uso delle risorse ma anche le emissioni nel suolo, in acqua e nell'aria.

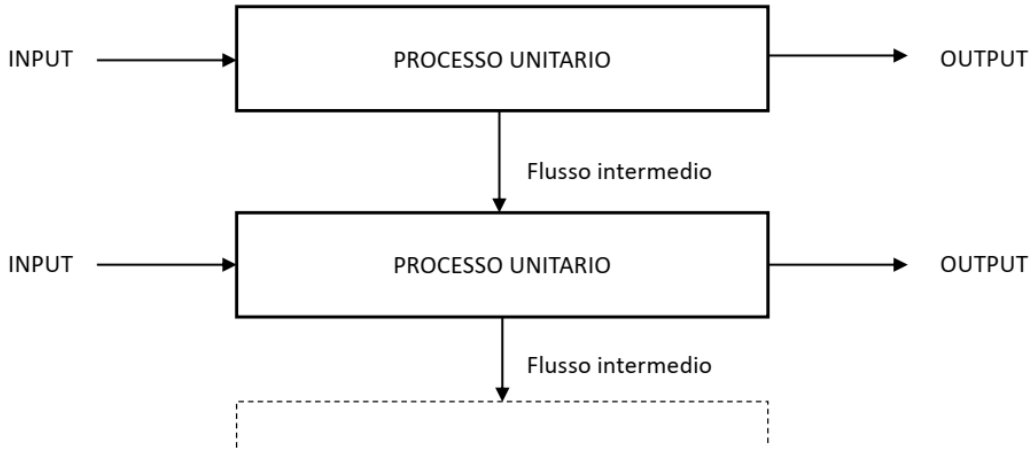

Figura 2-1: Esempio di un insieme di processi unitari in un sistema produttivo

Per ogni processo unitario dovrebbero essere definiti i seguenti punti: dove il processo inizia (materie prime o prodotti intermedi), le operazioni di trasformazione che coinvolgono il processo e il punto finale (prodotto finale o prodotto intermedio). Ogni processo dovrebbe

essere modellato in modo tale che gli input e gli output ai sui limiti siano elementari o flussi di prodotto. Quindi un primo passaggio riguarda l'identificazione dei processi che devono essere inclusi nel sistema preso in esame: una prima analisi può essere condotta a partire dai dati disponibili.

Uno studio LCA si articola in quattro fasi, collegate fra di loro (Figura 2-2):

1. Obbiettivo e scopo del progetto
2. Inventario (Life Cycle Inventory o LCI)
3. Valutazione degli impatti (Life Cycle Impact Assessment o LCIA)
4. Interpretazione

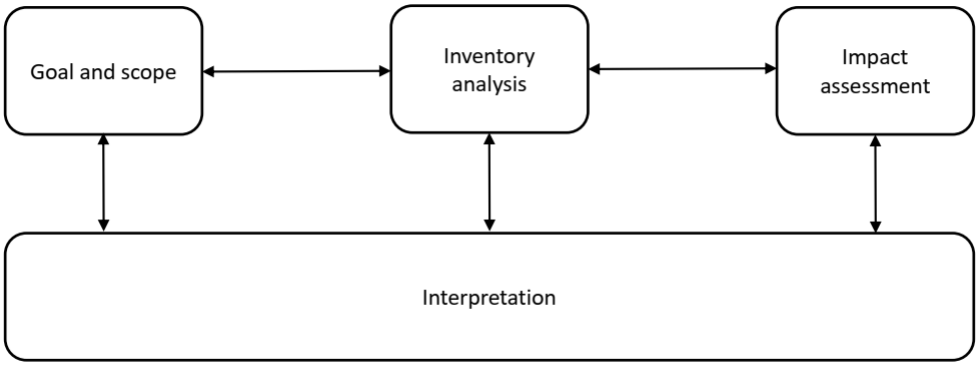

Figura 2-2: Fasi del processo LCA

2.1 **Obbiettivo e scopo**

Lo scopo e l'obbiettivo di uno studio LCA devono essere chiaramente definiti, e inoltre devono essere coerenti con l'applicazione prevista. Potrebbe essere necessario perfezionarli nel corso dello studio per via della natura iterativa dello studio LCA, di cui si parlerà in seguito.

L'obbiettivo di uno studio LCA deve rispondere ai seguenti elementi:

1. l'applicazione prevista
2. la ragione per cui si sta eseguendo lo studio
3. il pubblico previsto, a cui sono destinati i risultati
4. se i risultati dello studio sono destinati per un confronto

Invece, nella definizione dello scopo, occorre soddisfare e descrivere molti punti come: il sistema produttivo che si vuole studiare, le funzioni del sistema produttivo, l'unità funzionale, i limiti del sistema, le procedure di allocazione, la metodologia LCIA e le categorie di impatto,

l'interpretazione da usare, i dati richiesti, le ipotesi, le eventuali limitazioni, la qualità dei dati richiesta.

L'unità funzionale di uno studio LCA descrive in maniera indiretta ciò che si sta analizzando e quindi tutte le fasi successive sono relative a tale unità funzionale. In pratica tale unità definisce la quantificazione delle funzioni individuate, e in altre parole ha lo scopo di fornire un riferimento a cui sono relazionati gli input e gli output (in senso matematico). Quindi l'unità funzionale deve essere definita in modo chiaro, deve essere misurabile e coerente con ogni altra fase dello studio. La scelta di una unità funzionale di riferimento è necessaria per poi garantire la comparabilità dei risultati fra diversi studi LCA. Ma tale comparabilità risulta un aspetto critico quando si mettono a confronto sistemi diversi, anche in riferimento ai limiti presi in considerazione.

In questa fase si definiscono anche i limiti del sistema e il livello di dettaglio del lavoro. Si può comprendere come, a seconda dell'obbiettivo dello studio LCA, può variare notevolmente l'ampiezza e il dettaglio dello studio. In questo caso allora è importante definire i confini del sistema, ovvero i processi unitari da includere nello studio. Quali processi includere nello studio e il livello di dettaglio dei singoli processi devono essere decisi a priori. Alcune fasi del processo possono non essere considerate solo se le conclusioni dello studio non subiscono un cambiamento significativo. I criteri alla base della scelta dei confini del sistema sono importanti per l'attendibilità dei risultati. Nell'impostazione dei confini del sistema si prendono in considerazione i processi di acquisizione materie prime, lavorazione, distribuzione e trasporto, uso di combustibili ed altre fonti di energia, smaltimento dei rifiuti, recupero dei prodotti, manutenzione, operazione aggiuntive, ecc.

I dati che verranno utilizzati dipendono dall'obbiettivo e dallo scopo dello studio. Alcuni dati possono essere raccolti direttamente dai siti di produzione dei processi presi in esame, mentre altri possono essere ricavati da altre fonti. Quindi, in pratica, uno studio LCA può includere sia dati realmente misurati, che dati calcolati e stimati. Inoltre, la qualità dei dati dovrebbe essere specificata all'interno dello scopo dell'LCA. In generale questa caratteristica può comprendere: area geografica dei processi unitari, spazio temporale in cui raccogliere i dati, la precisione, la completezza, la rappresentatività della realtà di studio, la consistenza, la riproducibilità ovvero la capacità di riprodurre i risultati dello studio.

2.2 **Life Cycle Inventory (LCI)**

La fase di inventario viene definita come "Life Cycle Inventory" (LCI) ed è la seconda fase dello studio LCA. In altre parole, è un inventario dei dati in ingresso ed in uscita, compresi nei

limiti del sistema definiti nella fase precedente. Tutti i dati qui raccolti sono necessari al raggiungimento dell'obbiettivo della valutazione. In altre parole, è una fase in cui viene svolta una quantificazione e valutazione degli input e degli output coinvolti nel ciclo di vita di un prodotto. L'inventario implica la raccolta dei dati e la definizione delle procedure per la quantificazione di input e output. Si possono individuare tre passaggi:

1. *Data collection*, ossia la raccolta dei dati all'interno dei confini del sistema, classificabili sotto diversi titoli (input di energia, input di materie prime, prodotti, rifiuti, emissioni, altro ecc.). Per ogni processo incluso entro i limiti del sistema preso in esame devono essere raccolti dati da inserire in un inventario. Questi dati, come già detto in precedenza, possono essere misurati direttamente, calcolati tramite altri dati o stimati, e sono utilizzati per la quantificazione degli input e degli output di ogni processo unitario. Alcuni di questi dati possono anche essere ricavati da fonti pubbliche come la letteratura: allora la fonte deve essere indicata. In questo caso occorre anche prestare attenzione ad alcune caratteristiche importanti di questi dati come il tempo in cui sono stati raccolti od elaborati, ed alcune informazioni aggiuntive sulla loro qualità (area geografica, tipologia di processo, livello tecnologico, ecc.).
2. *Data calculation*, ovvero le procedure di calcolo successive alla raccolta dei dati quali validazione dei dati, correlazione ai processi unitari e ai flussi di riferimento. Qualsiasi procedura di calcolo deve essere documentata. Si deve tener conto che nella determinazione dei flussi elementari associati alla produzione, ogni prodotto reale può riflettere in modo più o meno accentuato le risorse che sono state consumate per essere fabbricato. Nel corso dello studio è importante svolgere un controllo sulla validità dei dati, ovvero un controllo che conferma che la qualità dei dati richiesta sia soddisfatta al fine di raggiungere lo scopo dello studio. Come detto già in precedenza, per ogni processo unitario viene determinato un appropriato flusso, in relazione a tale flusso vengono calcolate le quantità di input e output.
3. *Allocation*, ovvero gli input e gli output devono essere assegnati ai diversi prodotti, seguendo una procedura documentata e coerente. Un concetto di base è che la somma degli input/output di un processo unitario deve essere uguale agli input/output del processo prima dell'allocazione (bilancio di massa ed energia). Nella procedura di ripartizione, quando possibile, si dovrebbe evitare la divisione dei processi unitari in due o più sotto-processi e quindi raccogliere i dati relativi a

questi ultimi. Quando questo non è possibile, si possono ripartire input/output fra differenti prodotti o funzioni, in un modo che tenga conto della relazione fisica fra essi. Nel caso in cui si lavora in parte con prodotti e in parte con rifiuti, è necessario identificare il rapporto fra queste parti, in modo tale da ripartire input/output in modo corretto. Simili principi possono essere applicati nel caso di materiali riciclati o riutilizzati, tenendo conto dei cambiamenti delle proprietà dei materiali. Quando il processo di allocazione non è previsto, si opera con il metodo di sostituzione o degli impatti evitati. Esso considera i sottoprodotti della filiera come sostituti di prodotti di altre filiere. Tale procedura evita quindi la produzione di quest'ultimi a favore dei primi, evitandone quindi l'impatto relativo.

L'output finale della fase LCI è una raccolta di dati relativi alle singole unità di processo normalizzati sull'unità funzionale selezionata.

2.3 **Life Cycle Impact Assessment (LCIA)**

La terza fase di uno studio LCA è denominata Life Cycle Impact Assessment (LCIA). In questa fase l'obbiettivo è quello di comprendere l'importanza ambientale e reperire ulteriori informazioni per valutare i risultati della LCI. In altre parole, viene valutata l'incidenza dei potenziali impatti o del danno ambientale durante il ciclo di vita del prodotto. È una tappa finalizzata a valutare la significatività del potenziale ambientale degli impatti, utilizzando i risultati LCI. In generale, i dati di inventario sono associati a specifiche categorie di impatto ambientale, nella comprensione dell'incidenza ambientale. Questa fase include anche la ricerca e la raccolta di indicatori per le diverse categorie di impatto, che insieme andranno a rappresentare il profilo LCIA del sistema produttivo.

Questa fase consta di elementi obbligatori ed elementi opzionali (facoltativi). La fase LCIA deve includere obbligatoriamente i seguenti passaggi (Figura 2-3):

1. la selezione di categorie d'impatto, indicatori di categoria e modelli di caratterizzazione
2. il collegamento fra i risultati della fase LCI e le categorie di impatto selezionate (Classificazione)
3. il calcolo degli indicatori per ogni categoria attraverso fattori di caratterizzazione (Caratterizzazione)

La scelta e la selezione delle categorie d'impatto, degli indicatori e dei modelli per la caratterizzazione deve essere giustificata, e inoltre deve essere coerente con l'obbiettivo dello studio LCA. Quindi, in altri termini, tutto ciò deve essere in relazione ai problemi ambientali

che il sistema produttivo in esame può originare. Per molti studi LCA esistono già numerose categorie d'impatto ed indicatori. Comunque, qualora quelle già esistenti non siano sufficienti a soddisfare l'obbiettivo dell'LCA, è possibile definirne delle nuove.

Il passo successivo alla definizione e la selezione delle categorie d'impatto è l'assegnazione dei risultati LCI alle suddette categorie, tenendo presente che alcuni risultati sono esclusivi di una categoria d'impatto, mentre altri si riferiscono a più categorie.

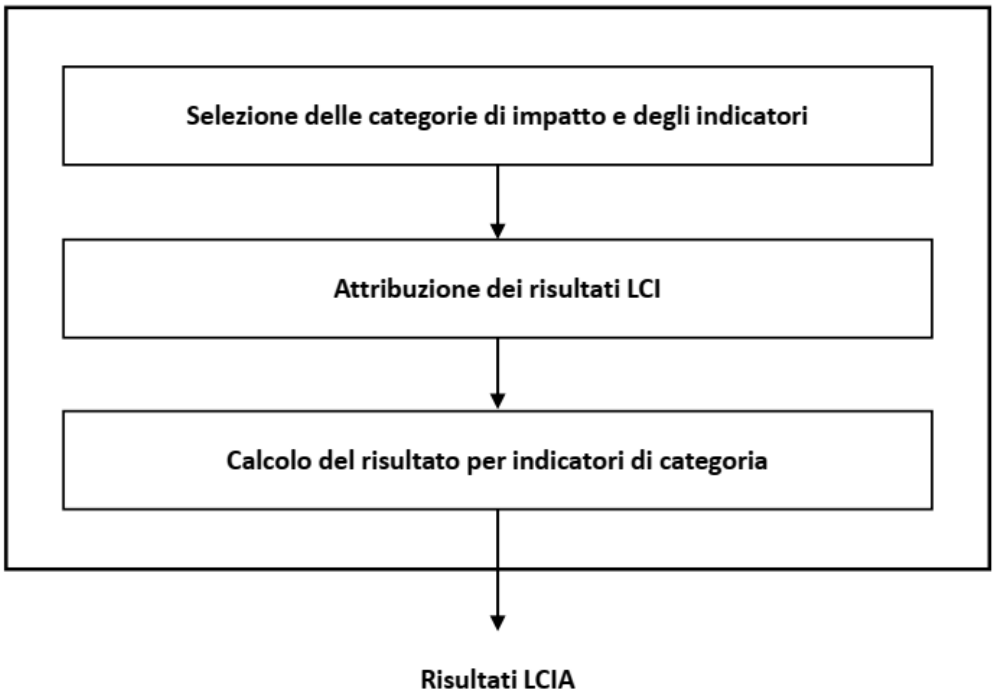

Figura 2-3: Elementi della fase LCIA

La caratterizzazione, ovvero il calcolo dei risultati per gli indicatori, comporta la conversione dei risultati provenienti dall'LCI in una unità comune, e l'aggregazione dei risultati contenuti nella stessa categoria d'impatto. Il metodo che viene utilizzato per il calcolo degli indicatori deve essere scelto e documentato nello studio. Se a questo livello dello studio, ci sono risultati non disponibili o i dati a disposizione non sono sufficienti a soddisfare lo scopo del lavoro, è possibile svolgere un'ulteriore raccolta di dati per compensare eventuali lacune. Per questa ragione lo studio LCA viene definito iterativo, come già affermato in precedenza.

Oltre agli elementi essenziali descritti in precedenza, sulla base dell'obbiettivo e scopo dell'LCA, possono essere presenti alcuni elementi facoltativi e passaggi aggiuntivi, quali la

normalizzazione, il *grouping* delle categorie, la pesatura e l'analisi sulla qualità dei dati. Questi elementi aggiuntivi utilizzano informazioni esterne al *framework* della LCIA.

2.4 **Interpretazione**

L'interpretazione è la fase finale della procedura LCA. In questa fase vengono discussi e riassunti, per poi trarne le conclusioni, i risultati di LCI e LCIA. I risultati dell'analisi di inventario e della valutazione d'impatto vengono valutati in relazione all'obbiettivo e all'ambito definiti nella fase iniziale per definirne la coerenza. I risultati della fase di interpretazione hanno anche lo scopo di fornire un quadro più comprensibile dei risultati LCA.

Questa quarta fase si basa sui seguenti principi:

1. individuazione dei problemi significativi sulla base dei risultati precedenti; l'obbiettivo è quello di strutturare i risultati sulla base dei problemi più rilevanti emersi, sempre in relazione all'obbiettivo dello studio
2. valutazione che consideri la qualità dello studio, con l'obbiettivo di verificare e migliorare l'affidabilità dei risultati dello studio
3. conclusioni, limitazioni e raccomandazioni finali

2.5 **Reporting**

Nello scopo dello studio viene anche definito la tipologia e il formato per la presentazione del lavoro. Si deve tener conto della trasparenza e della completezza con cui lo studio viene esposto, per facilitare la comprensione del pubblico a cui è indirizzato. Nella descrizione devono essere riportati tutti gli elementi essenziali per comprendere tutto il processo di studio che è stato svolto: risultati, dati, metodi, supposizioni, limitazioni, confini del sistema, descrizione dei processi unitari, la scelta delle categorie d'impatto, eventuali successive correzioni allo scopo inizialmente deciso, ecc.

Capitolo 3
IL SOFTWARE SIMAPRO

Al giorno d'oggi, la necessità di poter valutare le prestazioni ambientali dei prodotti ha portato ad avere a disposizione software e strumenti in grado di effettuare queste valutazioni e sviluppare indicatori di impatto ambientale. Fra questi strumenti il più utilizzato è il software LCA SimaPro®, che permette di raccogliere e analizzare le incidenze ambientali di un prodotto nel suo ciclo di vita. Risulta essere uno strumento professionale tramite cui è possibile modellare e analizzare i cicli di vita di un dato prodotto o servizio, seguendo le norme ISO 14040 e ISO 14044. Tramite questo software è possibile svolgere diverse valutazioni fra cui studi Life Cycle Assessment (LCA), il calcolo della Carbon Footprint (CF) di un dato prodotto e anche la sua Water Footprint (WF).

All'interno del software possiamo trovare le seguenti sezioni, che in parte rispecchiano la procedura LCA: Goal and Scope, Inventory, Impact assessment, Interpretation e General data.

3.1 **Goal and Scope**

Nel software è presente un'area in cui descrivere l'obbiettivo e lo scopo del progetto, e questa comprende due sezioni:

1. Un campo di testo in cui è possibile descrivere l'ambito e l'obbiettivo nei diversi aspetti;
2. Una sezione "libreria" in cui è possibile definire le librerie con dati standard più appropriate per il progetto da eseguire, sulla base dell'obbiettivo.

Infatti, nell'esecuzione di una LCA la fase più impegnativa è proprio la raccolta dei dati, di cui si parlerà nella sezione seguente.

3.2 **Inventory**

In questa sezione del software si accede ai processi e alle fasi del prodotto. SimaPro offre una disponibilità di dati secondari ma per alcuni processi o materiali i dati non sempre sono disponibili. In generale possiamo parlare di due tipologie di dati:

1. "*Foreground data*", ovvero dati in primo piano e cioè dati specifici che sono necessari per modellare il sistema poiché descrivono un particolare sistema di produzione
2. "*Background data*", ovvero dati che si riferiscono alla produzione dei materiali, di energia, ai trasporti, allo smaltimento dei rifiuti, e questi dati possono essere reperiti dai database SimaPro o dalla letteratura.

Quindi all'interno di tutte le versioni SimaPro sono incluse diverse banche dati. EcoInvent è una delle banche dati più estese, in cui sono presenti più di 10.000 processi relativi a numerosi settori.

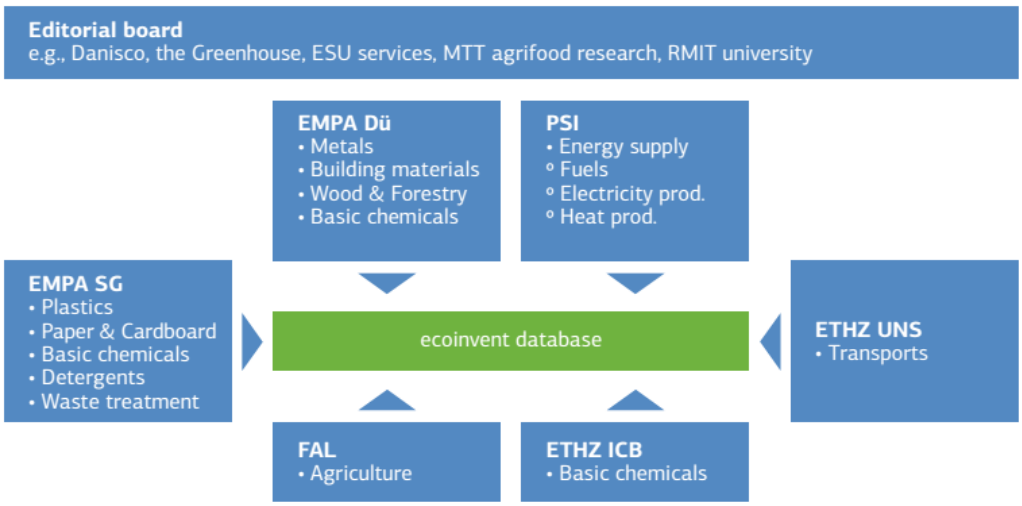

Figura 3-1: Processo di creazione del database EcoInvent (fonte: manuale di introduzione al SimaPro)

Nella Figura 3-1 viene riportato il processo tramite cui viene creato il database EcoInvent. Quest'ultimo è il risultato di un lavoro congiunto fra diverse istituzioni svizzere che forniscono i dati per il database. Ci sarà poi un gruppo di esperti responsabile del controllo della qualità dei dati, a cui si aggiunge la revisione, la convalida e l'eventuale modifica di tutti i nuovi set di dati prima della loro inclusione nel database EcoInvent.

Un'altra banca dati presente all'interno del software è il "Database Input-Output". Questa tipologia di database contiene i dati per settore economico più che in base al tipo di processo.

Quindi, al suo interno, ci sono dati sul settore agricolo, sul settore trasporti, sul settore bancario ecc.

Esistono poi altre banche dati quali Agri-Footprint che contiene dati sui prodotti agricoli quali colture, mangimi, biomassa, prodotti alimentari; ELCD che fornisce dati relativi a materiali, energia, gestioni rifiuti e trasporto; U.S. Life Cycle Inventory Database (USLCI) che fornisce dati per la produzione di materiali negli Stati Uniti.

3.3 **Impact Assessment**

Questa sezione del programma fornisce l'accesso ai metodi di valutazione dell'impatto. SimaPro contiene diversi metodi per la valutazione del potenziale di impatto ambientale del ciclo di vita che viene analizzato (es. TRACI 2.1, IPCC 2013, IMPACT 2002+, ecc.). Ogni metodo contiene poi un diverso numero di categorie di impatto (da 1 a 20). Dalle questioni ambientali rilevanti per lo studio LCA su cui si sta lavorando, consegue la scelta delle categorie d'impatto relative a tali questioni ambientali. Altre categorie d'impatto possono essere aggiunte sulla base dello studio che si vuole svolgere. Il software consente anche di aggiungere o eliminare categorie di impatto all'interno di un metodo, e un passo importante in uno studio compatibile ISO è proprio la selezione delle categorie di impatto appropriate.

3.4 **Interpretation**

Quest'area del programma comprende l'ultimo dei quattro step dell'LCA che è l'interpretazione. Occorre svolgere dei controlli per verificare che le conclusioni ricavate siano adeguatamente supportate dai dati e dalle procedure utilizzate. Nel software, questa sezione è stata concepita come una checklist che tratta delle questioni più rilevanti che emergono dalla ISO 14044. Tutti i dati presenti nei modelli hanno una certa incertezza dovuta a variazione dei dati, correttezza del modello o incompletezza del modello. Occorre quindi utilizzare dei modelli matematici per la gestione e il calcolo dell'incertezza nei risultati LCA. Un'analisi di sensitività viene svolta per valutare la correttezza del modello in termini di scelte soggettive per modellare il sistema. Il principio su cui si basa questa analisi è la modifica delle scelte e il ricalcolo dell'LCA.

La "*Contribution analysis*" può essere uno strumento importante nella comprensione dei risultati. Tramite questa analisi vengono determinati quali processi, input o output giocano un ruolo significativo nei risultati e in questo modo è possibile focalizzare l'attenzione su questi per eventuali proposte di mitigazione o per analisi di sensitività.

3.5 **General data**

Questa sezione contiene dati generali di supporto, comuni per le librerie e i progetti. Questi dati quali script, riferimenti bibliografici, immagini, unità di misura, fattori di conversione delle unità, elenco dei nomi delle sostanze, sono di supporto durante lo studio LCA.

Capitolo 4
CASO DI STUDIO

4.1 **Obbiettivo**

Lo studio LCA prende in esame la produzione della fragola mediante due differenti sistemi di coltivazione: una coltura al suolo in tunnel e una protetta fuori suolo. L'obbiettivo dello studio è la valutazione dell'impatto ambientale di questi due sistemi di coltivazione. Lo studio prevede sia il confronto interno fra i risultati per valutare quale sistema sia a minor impatto ambientale, sia un confronto con dati disponibili nella letteratura per valutare la presenza di sistemi di coltivazione alternativi. I risultati di questo studio saranno destinati ad un pubblico non esperto nel metodo, ma comunque consapevole delle caratteristiche della filiera produttiva alla base dell'analisi.

4.2 **Scopo**

Lo scopo è la seconda parte della prima fase di uno studio LCA e comprende la scelta e la definizione di numerosi temi che saranno funzionali per le successive fasi del processo LCA.

Sistemi di coltivazione

Lo studio prende in esame due sistemi di coltivazione della fragola, i cui rilievi sono stati eseguiti nell'anno 2018. L'analisi verte su una coltura protetta in suolo con tunnel ed una coltura protetta fuori suolo (soilless). La funzione del sistema, ovvero i prodotto/prodotti per i quali il sistema è stato creato, è la produzione di fragole. Nel caso specifico il sistema ha l'unica funzione di produrre fragole, senza la creazione di coprodotti o sottoprodotti.

La fragolicoltura in suolo è una coltivazione primaverile che viene svolta sotto la protezione di tunnel con lo scopo di proteggere al meglio la vegetazione dalle piogge, che incrementano il rischio di attacchi fungini, e ridurre di conseguenza al minimo i trattamenti fitosanitari. Il tunnel è formato da una struttura di ferro zincato con una durata di 7-10 anni e

una copertura in plastica con una vita media di 2-3 anni. La superficie coltivata oggetto di studio è di 0,075 ha. Le piante sono messe a dimora con telo pacciamante in film plastico e hanno una densità di 60.000 pp/ha. La durata della coltivazione è di 11 mesi. Il sistema di irrigazione è un impianto a goccia con manichette forate poste in opera sotto la pacciamatura. Per la fertilizzazione minerale sono state utilizzate varie tipologie di concimi minerali ed organici a titolo noto. Le cultivar (cv) messe a dimora sono: Clery, Sibilla, Asia, Tea, Romina, Fragolaaurea. La raccolta sotto tunnel avviene in primavera, la quantità media di fragole raccolte è stata di 800 g a pianta, con una variabilità compresa fra 600 g e 1100 g. Il prodotto raccolto viene poi commercializzato in vaschetta di plastica riciclata del preso di 500 g. Tali vaschette sono poi poste in cassette di plastica, contenenti 4 kg di prodotto, che andranno a formare bancali di legno di 130 kg.

Negli ultimi anni si sta sempre più affermando la coltivazione fuori suolo o senza suolo (soilless). Le piante sono coltivate in una soluzione nutritiva completa di macro e micro elementi, con o senza l'ausilio di un mezzo artificiale o substrato di crescita. Le motivazioni possono essere diverse: maggior efficienza dell'uso di acqua ed elementi nutritivi, standard qualitativi migliori, protezione dell'ambiente e soluzione alternativa nel caso di presenza di patogeni radicali, salinità dei suoli, suoli inquinati, impossibilità di sterilizzare il terreno, possibilità di coltivazione anche in aree urbane. Il fuori suolo può prevedere diverse tipologie di coltivazione. Nel caso di studio le fragole sono coltivate in sacco di plastica da 12 piante. Il substrato di coltivazione all'interno del sacco è composto da fibra di cocco (40%) e da torba (60%). La protezione della coltura avviene mediante una serra formata da una struttura di ferro zincato con durata di 10-20 anni e copertura in plastica con una vita di 5 anni. La superficie di coltivazione presa in esame è di 0,08 ha, con una densità delle piante di 100.000 pp/ha. La durata della coltura è di 11 mesi, e le cv allevate sono le medesime citate in precedenza. Il sistema di irrigazione è un sistema a goccia capillare, con l'acqua di irrigazione vengono anche forniti gli elementi della nutrizione minerale. La raccolta delle fragole allevate fuori suolo avviene in due tempi: una raccolta autunnale di circa 150 gr di fragole a pianta, e una raccolta primaverile di 600 gr circa a pianta. Le fragole sono commercializzate in vaschette di plastica da 250 gr e riposte in cartoncino usa e getta da 2,5 kg di prodotto. I cartoncini andranno poi a comporre bancali in legno di 130 kg.

Metodo dell'analisi d'impatto

La conversione dei dati provenienti dall'inventario in impatto ambientale è stata eseguita mediante fattori di caratterizzazione forniti dal metodo CML-IA. Il metodo è

fondamentalmente un database che contiene i fattori di caratterizzazione per la valutazione dell'impatto in un ciclo di vita (LCA). Esso prevede sia metodi di caratterizzazione di base menzionati nel "Handbook on LCA" (GWP100, POCP, HTP e AP) che metodi di caratterizzazione non di base (GWP_{20}, HTP_{100} e MSETP). Questo metodo è stato creato nel 2011 da un gruppo di scienziati sotto la guida del CML (Center of Environmental Science of Leiden University), che hanno proposto un insieme di categorie di impatto e metodi di caratterizzazione per la valutazione dell'impatto ambientale. Questo metodo di valutazione lavora con un approccio *midpoint* (valuta il potenziale impatto sull'ambiente). Sono disponibili 2 versioni di questo metodo: per questo lavoro è stata utilizzata la versione "baseline" che comprende 10 categorie di impatto. Alcune di queste categorie sono a scala globale, altre considerano gli impatti su scala regionale mentre altre descrivono potenziali su scala locale. Le categorie prese in esame sono: Global warming (GWP), Stratospheric Ozone depletion (ODP), Human toxicity (HTP), Fresh-water aquatic ecotoxicity (FEP), Marine ecotoxicity (MEP), Terrestrial ecotoxicity (TEP), Photo-oxidant formation (POCP), Acidification (AP), Eutrophication (EP), Abiotic depletion (ADP).

Unità funzionale

L'unità funzionale viene definita come il riferimento a cui sono relazionati gli input e gli output, in conformità alle norme ISO 14040 e ISO 14044. Nello studio in esame, sulla base della letteratura analizzata [2][8][9][7] e alla realtà in studio che fornisce fragole confezionate pronte alla vendita, è stata scelta come unità funzionale (FU) 1 kg di fragole prodotte e destinate alla vendita (nella FU non viene considerata la massa del packaging ma il suo impatto).

Confini del sistema

I confini del sistema (Figura 4-1) definiscono quali sono gli input ed i processi che sono inclusi nello studio LCA. Nella coltivazione della fragola sono stati impiegati diversi input quali fertilizzanti, concimi, combustibili, materiali plastici, materiale di imballaggio per il confezionamento. Lo studio viene riferito alla coltivazione della fragola nell'annata agraria 2018-2019. I processi presi in considerazione comprendono operazioni colturali (lavorazioni, vivaio, trapianto, fertilizzazioni, trattamenti fitosanitari, irrigazione, raccolta) ed operazioni per il packaging (confezionamento, imballaggio). Nello studio LCA non sono stati presi in considerazione i processi a valle delle operazioni di packaging quali trasporto, commercializzazione, utilizzo da parte del consumatore, smaltimento. Quindi lo studio si

riferisce alle fragole, confezionate e pronte per la commercializzazione. Le fasi dal trasporto allo smaltimento non sono state incluse nell'analisi poiché non si disponeva di informazioni utili ed esaustive per la valutazione del loro impatto, ciò avrebbe generato un'eccesiva variabilità inficiando il lavoro svolto.

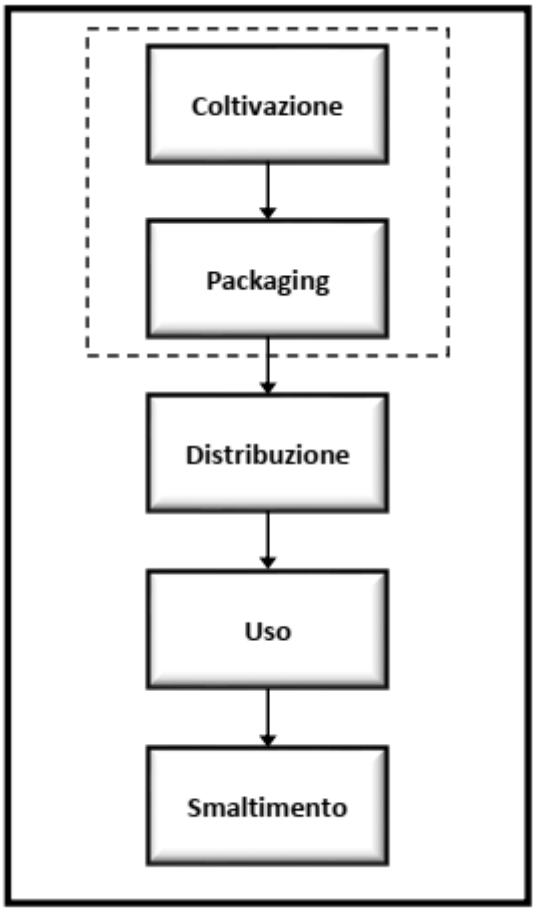

Figura 4-1: Confini del sistema per la valutazione del ciclo di vita della produzione di fragola (linea tratteggiata)

Qualità dei dati

I dati primari immessi nell'inventario sono stati ricavati da colloqui ed interviste con i responsabili aziendali, dai quaderni di campagna e dati documenti tecnici relativi ai prodotti fitosanitari e fertilizzanti. I dati secondari utilizzati sono relativi ai processi presenti nel database del software SimaPro e riguardano processi di produzione dei materiali utilizzati, energia, e combustibili. Nell'analisi d'inventario sono stati inoltre considerati i materiali relativi alle strutture di copertura. Tali strutture, in gergo definiti come beni capitali,

presentano una vita utile superiore rispetto al singolo ciclo colturale della fragola, pertanto l'intera quota è stata ripartita sulla vita utile ed è stata presa in considerazione solo quella relativa all'anno di riferimento.

Tutti i processi di produzione hanno portato a un unico output produttivo, le fragole. I beni capitali sono destinati solamente alla coltivazione delle fragole. Pertanto, nello svolgimento dell'analisi non è stato necessario applicare nessuna procedura di allocazione.

4.3 **Inventario LCI**

L'inventario LCI è la seconda fase dello studio LCA. Questa fase comprende la raccolta di tutti i dati necessari alla valutazione dell'impatto ambientale. Si quantificano tutti gli input ed output compresi nei limiti del sistema definiti nello scopo dello studio. Quindi la fase di inventario prevede in primo luogo la raccolta e il reperimento dei dati, e poi la loro conversione per la quantificazione degli input ed output.

I dati primari caricati nell'inventario, come già detto in precedenza, sono stati ricavati da colloqui ed interviste con i responsabili aziendali, dai quaderni di campagna e da documenti tecnici relativi a fitofarmaci e concimi. Questi dati comprendono sia le fasi di coltivazione che di packaging. L'operazione finale dell'inventario riguarda la quantificazione degli input e degli output in riferimento alla FU di 1 kg di fragole prodotte. Quindi ogni valore riferito a 0,1 ha è stato diviso per la produzione di fragole ricavata dalla medesima superficie, considerando che tra le due unità di processo l'efficienza di trasformazione è del 100%. Di seguito si riportano i dati d'inventario suddivisi per unità di processo.

Coltivazione

Per la fase di coltivazione (Tabella 4-1 e 4-2) i dati raccolti comprendono le piantine allevate, i materiali di costruzione di serre/tunnel, la composizione del substrato di crescita per la coltivazione soilless, il carburante utilizzato nelle operazioni colturali, i trattamenti fitosanitari, le fertilizzazioni, i volumi di irrigazione.

Per ogni dato grezzo raccolto è stato poi necessario svolgere dei calcoli. Poiché le superfici di coltivazione dei due sistemi in valutazione erano differenti, si è scelto di riferire tutti i dati alla superficie di 0,1 ha. Successivamente tutti i dati sono poi stati riferiti alla FU di 1 kg di fragole, senza tener conto del peso del confezionamento.

Nei materiali di costruzione del tunnel, che hanno una durata di più anni, l'intera quota è stata suddivisa per la vita utile ed è stata quindi utilizzata solo quella relativa all'anno di riferimento. Nel caso della coltivazione soilless si aveva a disposizione il peso in kg del

substrato di ogni sacco utilizzato per la coltivazione, con le relative percentuali di materiali (40% fibra di cocco e 60% di torba). Sono state quindi calcolate le rispettive quantità.

Tabella 4-1: Dati d'inventario per la coltivazione in suolo

Coltivazione (tunnel)				
Voce inventario		q.tà (0,1 ha)	u.m.	Valori (FU)
Coltura	Piantine	6000	piante	$1,25E^{+00}$
	Area occupata	0,1	ha	$2,08E^{-05}$
Serre/Tunnel	Plastica polietilene	43,33	kg	$1,35E^{-02}$
	Ferro zincato	42,60	kg	$1,27E^{-02}$
	Telo pacciamante polietilene lineare	63,50	kg	$1,32E^{-02}$
	Manichette irrigazione polietilene alta densità	60,00	kg	$1,25E^{-02}$
Operazioni colturali	Diesel (preparazione terreno)	32,00	kg	$6,67E^{-03}$
	Diesel (stesura telo pacciamante)	20,00	kg	$4,17E^{-03}$
Acqua per irrigazione		4210	m3	$8,77E^{-01}$
Produzione	Produzione fragole	4800	kg	

Tabella 4-2: Dati d'inventario per la coltivazione fuorisuolo

Coltivazione (fuorisuolo)				
Voce inventario		q.tà (0,1 ha)	u.m.	Valori (FU)
Coltura	Piantine	10000	piante	$1,33E^{+00}$
	Area occupata	0,1	ha	$1,33E^{-05}$
Serre/tunnel	Plastica polietilene	36,00	kg	$4,80E^{-03}$
	Ferro zincato	75,80	kg	$2,02E^{-02}$
	Sacco pacciamante polietilene	100	kg	$1,33E^{-02}$
Substrato di crescita	Torba 60%	3000	kg	$4,00E^{-01}$
	Cocco fibra 40%	2000	kg	$2,67E^{-01}$
Operazioni colturali	Gasolio	32,00	kg	$4,27E^{-03}$
	Benzina	28,80	kg	$3,84E^{-03}$
Acqua per irrigazione		2587,20	m3	$3,45E^{-01}$
Produzione	Produzione fragole	7500	kg	

Per le fertilizzazioni nella coltivazione in suolo (Tabella 4-3) si disponeva del piano di concimazione contenente ogni singolo intervento, la tipologia di concime, la quantità distribuita e il suo titolo. Nelle fertilizzazioni in coltivazione soilless (Tabella 4-4) sono state fornite le quantità di prodotti espresse in kg utilizzati direttamente per le concimazioni.

Tabella 4-3: Dati d'inventario delle fertilizzazioni in coltura al suolo

Fertilizzazione (tunnel)				
Voce inventario		q.tà (0,1 ha)	u.m.	Valori (FU)
30/06/2018	Prodigy plus	266,67	kg	$5{,}56E^{-02}$
30/06/2018	Nitrophoska gold	133,33	kg	$2{,}78E^{-02}$
11/08/2018	AICL peters plant starter	4,93	kg	$1{,}03E^{-03}$
18/08/2018	AICL peters plant starter	4,93	kg	$1{,}03E^{-03}$
27/08/2018	AICL all rounder	4,93	kg	$1{,}03E^{-03}$
10/09/2018	AICL all rounder	4,93	kg	$1{,}03E^{-03}$
03/10/2018	AICL all rounder	4,93	kg	$1{,}03E^{-03}$
23/02/2019	AICL peters plant starter	4,93	kg	$1{,}03E^{-03}$
02/03/2019	AICL universol yellow	7,33	kg	$1{,}53E^{-03}$
09/03/2019	AICL 60%violet	3,20	kg	$6{,}67E^{-04}$
	AICL 40%green	2,13	kg	$4{,}44E^{-04}$
16/03/2019	AICL 60%violet	3,20	kg	$6{,}67E^{-04}$
	AICL 40%green	2,13	kg	$4{,}44E^{-04}$
23/03/2019	AICL 60%violet	3,60	kg	$7{,}50E^{-04}$
	AICL 40%green	2,40	kg	$5{,}00E^{-04}$
30/03/2019	AICL 60%violet	3,20	kg	$6{,}67E^{-04}$
	AICL 40%green	2,13	kg	$4{,}44E^{-04}$
06/04/2019	AICL 60%violet	3,60	kg	$7{,}50E^{-04}$
	AICL 40%green	2,40	kg	$5{,}00E^{-04}$
13/04/2019	AICL orange	4,93	kg	$1{,}03E^{-03}$
20/04/2019	AICL 60%violet	4,00	kg	$8{,}33E^{-04}$
	AICL 40%green	2,67	kg	$5{,}56E^{-04}$
13/04/2019	AICL orange	6,00	kg	$1{,}25E^{-03}$
27/04/2019	Calcinit	4,93	kg	$1{,}03E^{-03}$
04/05/2019	AICL 60%violet	2,96	kg	$6{,}17E^{-04}$
	AICL 40%green	1,97	kg	$4{,}11E^{-04}$
11/05/2019	AICL 60%violet	2,96	kg	$6{,}17E^{-04}$
	AICL 40%green	1,97	kg	$4{,}11E^{-04}$
18/05/2019	AICL 60%violet	2,96	kg	$6{,}17E^{-04}$
	AICL 40%green	1,97	kg	$4{,}11E^{-04}$
25/05/2019	AICL 60%violet	2,96	kg	$6{,}17E^{-04}$
	AICL 40%green	1,97	kg	$4{,}11E^{-04}$
01/06/2019	AICL 60%violet	2,96	kg	$6{,}17E^{-04}$
	AICL 40%green	1,97	kg	$4{,}11E^{-04}$
Produzione	Produzione fragole	4800	kg	

Tabella 4-4: Dati d'inventario delle fertilizzazioni in coltura fuorisuolo

Fertilizzazione (fuorisuolo)				
Voce inventario		q.tà (0,1 ha)	u.m.	Valori (FU)
Fertilizzante	Acido nitrico	27	kg	$3{,}60E^{-03}$
	Nitrato ammonico calcio	41	kg	$5{,}47E^{-03}$
	Single superfosfato	41	kg	$5{,}47E^{-03}$
	Solfato di potassio	17	kg	$2{,}27E^{-03}$
	Solfato di magnesio	6	kg	$8{,}00E^{-04}$
Produzione	Produzione fragole	7500	kg	

Per i trattamenti fitosanitari (Tabella 4-5 e 4-6) attraverso le schede del quaderno di campagna sono stati ricavati i dati relativi agli interventi effettuati, ai formulati commerciali, alle loro dosi di applicazione e ai volumi di acqua utilizzati per la distribuzione. Tramite le schede di sicurezza di ogni formulato è stata quindi calcolata la dose di ogni p.a. emesso sulla base di un modello di emissione in aria del 5% [13].

Tabella 4-5: Dati d'inventario dei trattamenti fitosanitari in coltura al suolo

Trattamenti fitosanitari (tunnel)						
Voce inventario	Formulato	p.a.	q.tà (0,1 ha)	u.m.	Valori formulato (FU)	Valori pa/FU emessi[1]
29/05/2018	Laser	spinosad	0,03	kg	$5{,}69E^{-06}$	$1{,}25E^{-07}$
	Serenade Max	*Bacillus subtilis*	0,30	kg	$6{,}25E^{-05}$	$4{,}90E^{-08}$
22/05/2018	Laser	spinosad	0,03	kg	$5{,}69E^{-06}$	$1{,}25E^{-07}$
	Serenade Max	*Bacillus subtilis*	0,30	kg	$6{,}25E^{-05}$	$4{,}90E^{-08}$
12/05/2018	Serenade Max	*Bacillus subtilis*	0,30	kg	$6{,}25E^{-05}$	$4{,}90E^{-08}$
02/05/2018	Serenade Max	*Bacillus subtilis*	0,30	kg	$6{,}25E^{-05}$	$4{,}90E^{-08}$
22/04/2018	Ortiva Top	azoxystrobin	0,10	kg	$2{,}31E^{-05}$	$2{,}60E^{-07}$
	Switch	cyprodinil	0,08	kg	$1{,}67E^{-05}$	$3{,}13E^{-07}$
		fludioxonil				$2{,}08E^{-07}$
07/04/2018	Switch	cyprodinil	0,08	kg	$1{,}67E^{-05}$	$3{,}13E^{-07}$
		fludioxonil				$2{,}08E^{-07}$
	Topas 10 EC	penconazolo	0,05	kg	$1{,}03E^{-05}$	$5{,}21E^{-08}$
28/03/2018	Heliosoufre S	zolfo puro	0,30	kg	$8{,}56E^{-05}$	$2{,}19E^{-06}$
16/03/2018	Apollo SC	clofentezine	0,04	kg	$1{,}00E^{-05}$	$2{,}08E^{-07}$
	Vasco	penconazolo	0,08	kg	$1{,}59E^{-05}$	$1{,}50E^{-08}$
	Acqua trattamento (totale)		800	l	$1{,}67E^{-01}$	
Produzione	Produzione fragole		4800	kg		

[1] emissioni stimate al 5% seguendo il modello proposto da Thierry Boulard 2011, Environmental impact of greenhouse tomato production in France [13]

Tabella 4-6: Dati d'inventario dei trattamenti fitosanitari in coltura fuorisuolo

Trattamenti fitosanitari (fuorisuolo)						
Voce inventario	Formulato	p.a.	q.tà (0,1 ha)	u.m.	Valori formulato (FU)	Valori pa/FU emessi[1]
20/05/2019	Epik SL	acetamiprid	0,13	kg	$1,79E^{-05}$	$4,17E^{-08}$
	Signum	boscalid	0,17	kg	$2,27E^{-05}$	$3,03E^{-07}$
		pyraclostrobin				$7,59E^{-08}$
22/04/2019	Acramite 480SC	bifenazate	0,02	kg	$3,17E^{-06}$	$6,92E^{-08}$
	Asset	piretrina	0,08	kg	$9,31E^{-06}$	$1,78E^{-08}$
	Luna sensation	fluopyram	0,07	kg	$1,02E^{-05}$	$1,09E^{-07}$
		trifloxystrobin				$1,09E^{-07}$
17/04/2019	Heliosoufre S	zolfo puro	0,15	kg	$2,74E^{-05}$	$7,00E^{-07}$
	Nimrod 250 EW	bupirimate	0,10	kg	$1,40E^{-05}$	$1,67E^{-07}$
15/04/2019	Ortiva	azoxystrobin	0,08	kg	$1,07E^{-05}$	$1,33E^{-07}$
09/04/2019	Switch	cyprodinil	0,08	kg	$1,07E^{-05}$	$2,00E^{-07}$
		fludioxonil				$1,33E^{-07}$
06/04/2019	Armicarb 85	potassio bicarbonato	0,50	kg	$6,67E^{-05}$	$2,83E^{-06}$
30/03/2019	Signum	boscalid	0,15	kg	$2,00E^{-05}$	$2,67E^{-08}$
		pyraclostrobin				$6,70E^{-09}$
30/03/2019	Armicarb 85	potassio bicarbonato	0,50	kg	$6,67E^{-05}$	$2,83E^{-06}$
16/03/2019	Mavrik 20 EW	tau-fluvalinate	0,03	kg	$4,00E^{-06}$	$4,80E^{-08}$
	Topas 10 EC	penconazolo	0,05	kg	$6,57E^{-06}$	$3,33E^{-08}$
09/03/2019	Acramite 480SC	bifenazate	0,05	kg	$6,82E^{-06}$	$1,49E^{-07}$
05/03/2019	Arius system plus	quinoxyfen	0,06	kg	$8,45E^{-06}$	$1,74E^{-08}$
		myclobutanil				$1,74E^{-08}$
27/02/2019	Apollo SC	clofentezine	0,06	kg	$9,60E^{-06}$	$2,00E^{-07}$
16/02/2019	Cuprostar	rame metallo	0,40	kg	$7,25E^{-05}$	$7,25E^{-07}$
16/02/2019	Ortiva	azoxystrobin	0,08	kg	$1,07E^{-05}$	$1,33E^{-07}$
16/10/2018	Signum	boscalid	0,15	kg	$2,00E^{-05}$	$2,67E^{-07}$
		pyraclostrobin				$6,70E^{-08}$
	Switch	cyprodinil	0,08	kg	$1,07E^{-05}$	$2,00E^{-07}$
		fludioxonil				$1,33E^{-07}$
27/09/2018	Flipper	sali potassici di acidi grassi	1,00	kg	$1,34E^{-04}$	$3,20E^{-06}$
	Oikos	azadiractina A	0,15	kg	$2,17E^{-05}$	$2,60E^{-08}$
	Acqua trattamento (totale)		1775	l	$2,37E^{-01}$	
Produzione	Produzione fragole		7500	kg		

[1] emissioni stimate al 5% seguendo il modello proposto da Thierry Boulard 2011, Environmental impact of greenhouse tomato production in France [13]

Nella Tabella 4-7 si riportano le emissioni derivanti dai fertilizzanti distribuiti nella coltivazione in suolo. I fattori di emissione sono stati ricavati da PCR detail - Fruits and nuts, 2019 [14]. Nella coltivazione fuorisuolo, essendo gli elementi della fertilizzazione forniti con la soluzione nutritiva all'interno del substrato di coltivazione, le emissioni in aria e in acqua non sono state prese in considerazione.

Tabella 4-7: Emissioni dei fertilizzanti in coltura al suolo

Emissioni fertilizzanti (tunnel)				
Tipologia di emissione	compartimento	q.tà (0,1 ha)	u.m.	Valori (FU)
Emissioni dirette di NH_3	aria	2,19	kg	$4,57E^{-04}$
Emissioni dirette di N_2O	aria	0,45	kg	$9,39E^{-05}$
Emissioni dirette di NO	aria	0,34	kg	$7,04E^{-05}$
Emissioni in acqua NO_3	acqua	1,68	kg	$3,50E^{-04}$
Emissioni indirette N_2O da NH_3	aria	0,02	kg	$4,57E^{-06}$
Emissioni indirette N_2O da NO_3	aria	0,01	kg	$2,63E^{-06}$
Emissioni di P[1]	acqua	1,49	kg	$3,11E^{-04}$

[1] nel sofware SimaPro le emissioni di P sono state ripartite sulla base dei sotto compartimenti "groundwater" e "surfacewater"

Packaging

Per le operazioni di packaging (Tabella 4-8 e 4-9) si disponeva delle masse dei diversi materiali (plastica, cartoncino, pallet) utilizzati nel confezionamento. Anche in questo caso, in relazione alla produzione di fragole raccolte, sono state calcolate le quantità di materiale. Nel caso dei pallet è stato considerato un grado medio di riutilizzo del 55% come rapporto tra pallet reimmessi e pallet nuovi (fonte Rilegno Conai).

Tabella 4-8: Dati d'inventario di packaging in coltura al suolo

Packaging (tunnel)				
Voce inventario		q.tà (0,1 ha)	u.m.	Valori (FU)
Packaging	Vaschetta plastica riciclata PET (RPET)	76,80	kg	$1,60E^{-02}$
	Cassetta polietilene alta densità o polipropilene (PP)	360,00	kg	$7,50E^{-02}$
	Legno pallet EPAL 1200x800	500,43	kg	$1,04E^{-01}$
	Chiodi epal per bancali 90 mm (27)	130,99	kg	$2,73E^{-02}$
	Chiodi epal per bancali 70 mm (27)	101,88	kg	$2,12E^{-02}$
	Chiodi epal per bancali 55 mm (18)	54,29	kg	$1,13E^{-02}$
Produzione	Produzione fragole	4800	kg	

Tabella 4-9: Dati d'inventario di packaging in coltura fuorisuolo

Packaging (fuorisuolo)				
Voce inventario		q.tà (0,1 ha)	u.m.	Valori (FU)
Packaging	Vaschetta plastica riciclata PET (RPET) (termoformatura)	300,00	kg	$4{,}00E^{-02}$
	Cartoncino usa e getta	1050,00	kg	$1{,}40E^{-01}$
	Legno pallet EPAL 1200x800	781,92	kg	$1{,}04E^{-01}$
	Chiodi epal per bancali 90 mm (27)	204,68	kg	$2{,}73E^{-02}$
	Chiodi epal per bancali 70 mm (27)	159,19	kg	$2{,}12E^{-02}$
	Chiodi epal per bancali 55 mm (18)	84,83	kg	$1{,}13E^{-02}$
Produzione	Produzione fragole	7500	kg	

4.4 **Risultati**

I dati d'inventario caricati all'interno del software sono stati poi convertiti in impatto ambientale mediante fattori di caratterizzazione forniti dal metodo CML-IA baseline. Di seguito si riportano i risultati riferiti alla FU di 1 kg di fragole pronte per la vendita. Nella Tabella 4-10 sono riportati i risultati della coltivazione in suolo sotto tunnel e fuorisuolo per le 11 categorie d'impatto. La categoria Abiotic depletion (ADP) viene suddivisa in due ulteriori categorie: ADP che si riferisce al consumo di risorse materiali e ADP_f (fossil fuels) che analizza il consumo di combustibili fossili.

Tabella 4-10: Impatto ambientale dei due sistemi di coltivazione in studio

Categoria d'impatto	**Unità**	**Tunnel**	**Fuorisuolo**
Abiotic depletion (ADP)	kg Sb eq	$1{,}67E^{-06}$	$1{,}86E^{-06}$
Abiotic depletion fossil fuels (ADPf)	MJ	$5{,}83E^{+00}$	$4{,}28E^{+00}$
Global warming (GWP)	kg CO_2 eq	$8{,}55E^{-01}$	$8{,}33E^{-01}$
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	$1{,}81E^{-08}$	$5{,}86E^{-08}$
Human toxicity (HTP)	kg 1,4-DB eq	$1{,}77E^{-01}$	$1{,}63E^{-01}$
Fresh water aquatic ecotoxicity (FEP)	kg 1,4-DB eq	$8{,}15E^{-02}$	$9{,}41E^{-02}$
Marine aquatic ecotoxicity (MEP)	kg 1,4-DB eq	$2{,}64E^{+02}$	$2{,}81E^{+02}$
Terrestrial ecotoxicity (TEP)	kg 1,4-DB eq	$2{,}12E^{-04}$	$6{,}82E^{-04}$
Photochemical oxidation (POCP)	kg C_2H_4 eq	$2{,}53E^{-04}$	$3{,}21E^{-04}$
Acidification (AP)	kg SO_2 eq	$5{,}53E^{-03}$	$6{,}50E^{-03}$
Eutrophication (EP)	kg PO_4^{3-} eq	$1{,}82E^{-03}$	$2{,}03E^{-03}$

Per quanto riguarda la categoria GWP, relativa all'emissione di gas serra nell'aria, nella coltivazione in tunnel è di 8,55E^{-01} kg CO_2 eq mentre nel fuorisuolo è di 8,33E^{-01} kg CO_2 eq. La HTP, che prende in esame gli effetti di sostanze tossiche e che viene espressa in kg di 1,4-diclorobenzene eq, nella coltivazione in suolo è di 1,77E^{-01} mentre nel fuorisuolo è di 1,63E^{-01}. La categoria EP prende in considerazione gli eccessi di macronutrienti nell'ambiente. Nella coltivazione in suolo è di 1,82E^{-03} kg PO_4^{3-} eq mentre per la coltivazione fuorisuolo è di 2,03E^{-03}. In AP viene valutata la presenza di sostanze acidificanti espressa in kg SO_2 eq. Nel tunnel è pari a 5,53E^{-03}, mentre nel fuorisuolo a 6,50E^{-03}.

La Tabella 4-11 e la Tabella 4-12 riportano i risultati rispettivamente della coltivazione al suolo sotto tunnel e della coltivazione fuorisuolo. Nelle due tabelle vengono mostrati i risultati separati della fase di coltivazione e della fase di packaging, sempre in riferimento alla FU di 1 kg di fragole.

Tabella 4-11: Impatto ambientale del sistema di coltivazione in suolo sotto tunnel

	Tunnel		
Categoria d'impatto	**Unità**	**Coltivazione**	**Packaging**
Abiotic depletion (ADP)	kg Sb eq	1,38E^{-06}	2,84E^{-07}
Abiotic depletion fossil fuels (ADPf)	MJ	3,87E^{+00}	1,96E^{+00}
Global warming (GWP)	kg CO_2 eq	4,09E^{-01}	4,46E^{-01}
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	1,17E^{-08}	6,44E^{-09}
Human toxicity (HTP)	kg 1,4-DB eq	7,41E^{-02}	1,03E^{-01}
Fresh water aquatic ecotoxicity (FEP)	kg 1,4-DB eq	4,96E^{-02}	3,19E^{-02}
Marine aquatic ecotoxicity (MEP)	kg 1,4-DB eq	1,31E^{+02}	1,34E^{+02}
Terrestrial ecotoxicity (TEP)	kg 1,4-DB eq	1,02E^{-04}	1,11E^{-04}
Photochemical oxidation (POCP)	kg C_2H_4 eq	1,11E^{-04}	1,42E^{-04}
Acidification (AP)	kg SO_2 eq	3,47E^{-03}	2,06E^{-03}
Eutrophication (EP)	kg PO_4^{3-} eq	1,51E^{-03}	3,05E^{-04}

Tabella 4-12: Impatto ambientale del sistema di coltivazione fuorisuolo

	Fuorisuolo		
Categoria d'impatto	**Unità**	**Coltivazione**	**Packaging**
Abiotic depletion (ADP)	kg Sb eq	$1{,}51E^{-06}$	$3{,}44E^{-07}$
Abiotic depletion fossil fuels (ADPf)	MJ	$1{,}62E^{+00}$	$2{,}66E^{+00}$
Global warming (GWP)	kg CO_2 eq	$5{,}12E^{-01}$	$3{,}20E^{-01}$
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	$3{,}77E^{-08}$	$2{,}09E^{-08}$
Human toxicity (HTP)	kg 1,4-DB eq	$4{,}51E^{-02}$	$1{,}18E^{-01}$
Fresh water aquatic ecotoxicity (FEP)	kg 1,4-DB eq	$5{,}01E^{-02}$	$4{,}40E^{-02}$
Marine aquatic ecotoxicity (MEP)	kg 1,4-DB eq	$1{,}10E^{+02}$	$1{,}71E^{+02}$
Terrestrial ecotoxicity (TEP)	kg 1,4-DB eq	$1{,}24E^{-04}$	$5{,}58E^{-04}$
Photochemical oxidation (POCP)	kg C_2H_4 eq	$2{,}07E^{-04}$	$1{,}15E^{-04}$
Acidification (AP)	kg SO_2 eq	$5{,}09E^{-03}$	$1{,}41E^{-03}$
Eutrophication (EP)	kg PO_4^{3-} eq	$1{,}68E^{-03}$	$3{,}57E^{-04}$

Dalle tabelle si può osservare che nella coltivazione in suolo, per la categoria GWP, la fase di coltivazione è di $4{,}09E^{-01}$ kg CO_2 eq mentre la fase di packaging è di $4{,}46E^{-01}$ kg CO_2 eq. Invece nella coltivazione fuorisuolo la fase di coltivazione è di $5{,}12E^{-01}$ kg CO_2 eq mentre quella di packaging di $3{,}20E^{-01}$ kg CO_2 eq.

Analisi di contribuzione

Attraverso l'analisi di contribuzione si va ad osservare l'incidenza dei vari processi all'interno delle diverse categorie d'impatto. Di seguito, nei Grafici 4-1 e 4-2, vengono mostrate le contribuzioni dei diversi input per le fasi di coltivazione e packaging di entrambi i sistemi di coltivazione. Nel Grafico 4-1 sono messe a confronto le due fasi del sistema di coltivazione e packaging. Invece nel Grafico 4-2 le medesime fasi sono state ripartite nei diversi input che entrano nei diversi processi.

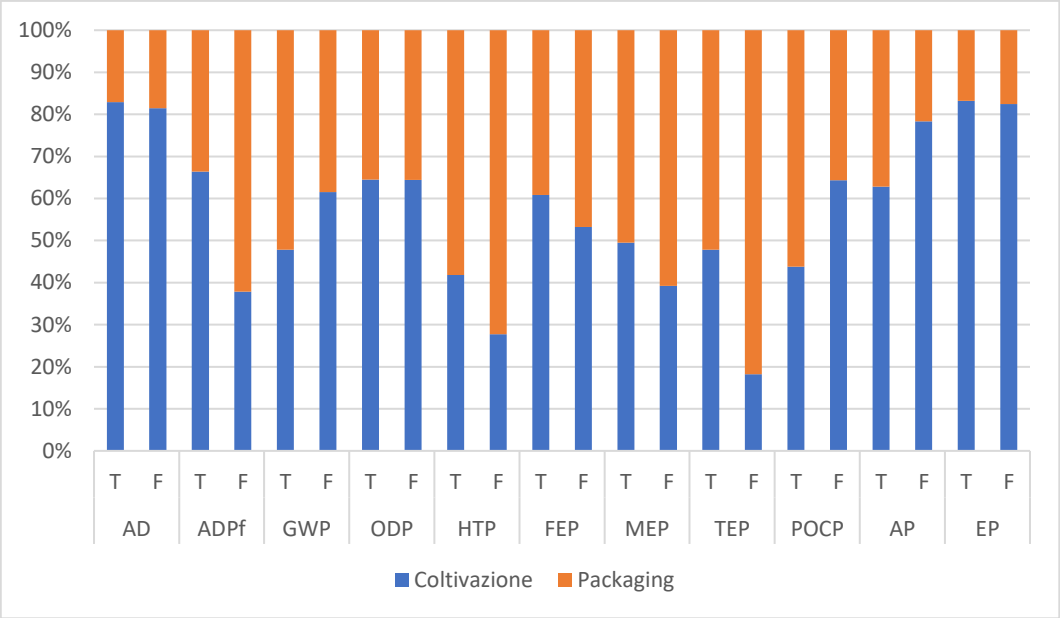

Grafico 4-1: Confronto delle fasi di coltivazione e packaging per entrambi i sistemi di coltivazione (T=tunnel, F=fuorisuolo)

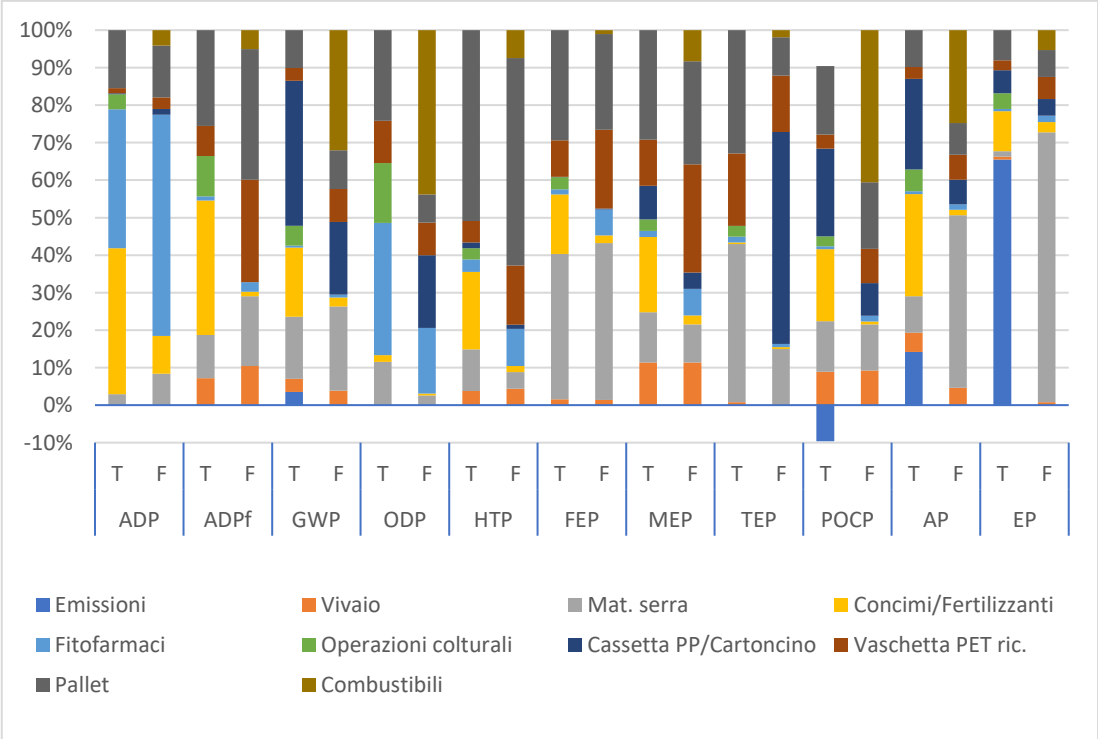

Grafico 4-2: Confronto degli input utilizzati nei due sistemi di coltivazione (T=tunnel, F=fuorisuolo)

Di seguito si prendono in analisi i singoli sistemi di coltivazione.

*** Coltivazione in suolo**

Nel Grafico 4-3 sono mostrate le contribuzioni delle fasi di coltivazione e packaging per la coltivazione protetta in suolo. Si può osservare che la fase di coltivazione risulta piuttosto influente: nelle categorie EP e ADP_f in cui supera l'80% mentre per le restanti categorie i valori oscillano fra il 40% e il 65%.

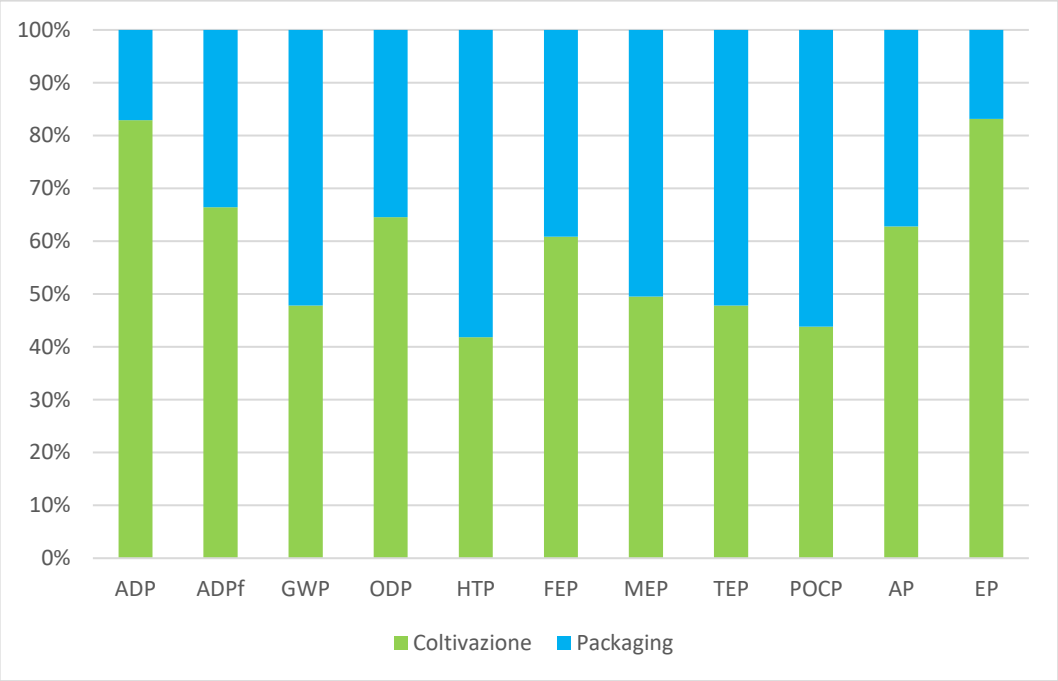

Grafico 4-3: Contributo d'impatto delle fasi di coltivazione e packaging nella coltivazione in suolo

Il Grafico 4-4 mostra la contribuzione dei diversi input per entrambe le fasi di coltivazione e packaging. Nella legenda i diversi input sono stati raggruppati in classi e di seguito descritte. "Emissioni" comprende le emissioni (NH_3, NO, N_2O, NO_3^-, P e Fitofarmaci) che sono state caricate direttamente all'interno del software. "Vivaio" si riferisce esclusivamente al processo di produzione delle piantine utilizzate poi nella coltivazione. "Materiali serra" comprende i materiali utilizzati nella costruzione di serre/tunnel: acciaio zincato, film plastici di copertura della serra, film per la pacciamatura, manichette in plastica per l'irrigazione. La voce "Concimi" raggruppa i fertilizzanti distribuiti durante la fase di coltivazione mentre "Fitofarmaci" i diversi trattamenti fitosanitari. "Operazioni colturali" rappresenta le operazioni di preparazione del terreno e messa a dimora dell'impianto di fragole, compreso il consumo di carburante fossile. Le voci "Vaschetta PET ric.", "Cassetta PP" e "Pallet" si riferiscono ai materiali utilizzati nella fase di packaging.

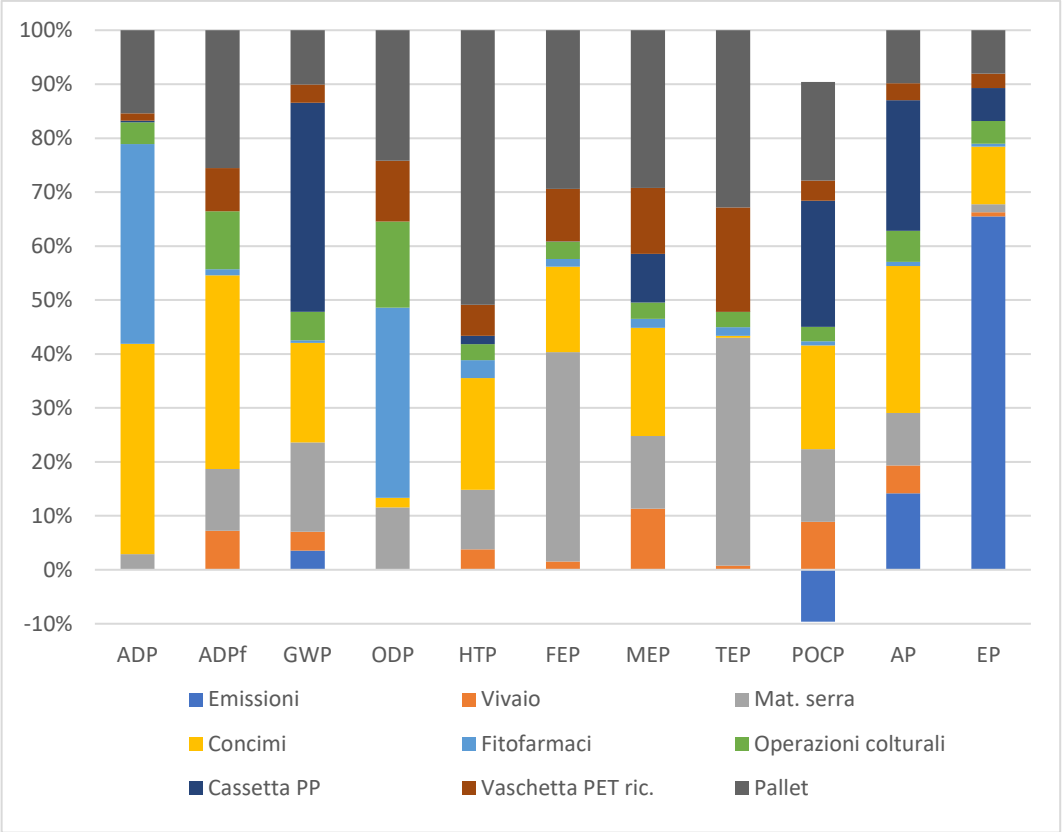

Grafico 4-4: Contributo d'impatto dei diversi input nella coltivazione in suolo

Dal grafico è possibile osserva che, per la fase di coltivazione, le voci "Vivaio" e "Operazioni colturali" risultano avere una bassa incidenza nella quasi totalità dei casi. La voce "Materiali serra", invece, ha un peso maggiore nelle categorie FEP e TEP. L'uso dei concimi ha una incidenza media fra il 20% e il 30%, con contribuzione maggiore nelle categorie ADP, ADP_f, POCP e AP. I fitofarmaci hanno invece una contribuzione maggiore per le categorie ADP e ODP (circa il 35%) mentre per le restanti categorie è piuttosto basso il contributo. "Emissioni" hanno un'incidenza maggiore in AP e EP. Nella categoria POCP si può osservare che tale voce assume un valore negativo circa del 10%. Dai dati elementari si può osservare che la voce negativa è generata da NO.

Per quanto riguarda la fase di packaging "Vaschetta PET ric." ha una incidenza maggiore per la categoria TEP (20%) mentre nelle restanti categorie risulta essere inferiore al 12%. Anche la produzione di cassetta in PP ha una maggior incidenza nelle categorie GWP, POCP e AP. L'uso del pallet ha una incidenza più o meno elevata in quasi tutte le categorie, in particolare è più incidente nelle categorie HTP, FEP, MEP e TEP.

*** Coltivazione fuorisuolo**

Nel Grafico 4-5 sono riportate le contribuzioni delle fasi di coltivazione e packaging per la coltura soilless. Si può osservare che la fase di coltivazione supera il 50% nelle categorie ADP, GWP, ODP, FEP, POCP, AP ed EP. Nelle categorie ADP_f, HTP, MEP e TEP risulta essere più incidente la fase di packaging.

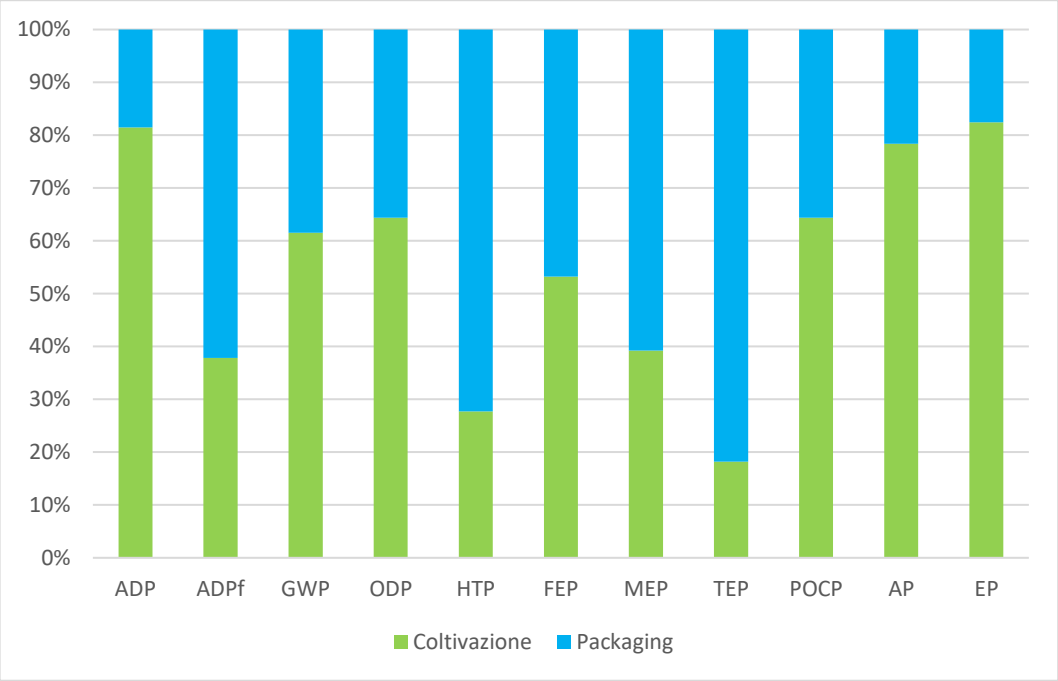

Grafico 4-5: Contributo d'impatto delle fasi di coltivazione e packaging nella coltivazione fuorisuolo

Il Grafico 4-6 mostra invece la ripartizione dei diversi input delle fasi di coltivazione e di packaging. Sono state utilizzate le medesime voci di legenda del grafico per la coltivazione in suolo. "Materiali serra" comprende, in questo caso, sia i materiali utilizzati nella costruzione della serra che il sacco con il substrato di coltivazione. "Fertilizzanti" raggruppa i composti minerali utilizzati nella soluzione nutritiva di fertilizzazione. "Combustibili" si riferisce all'uso di combustibili per le operazioni di gestione della serra. La voce "Cartoncino" rappresenta il cartoncino usa e getta adoperato nella fase di packaging. Le restanti voci di legenda non differiscono da quelle utilizzate nel grafico precedente. L'uso di fertilizzanti ha una bassa incidenza in quasi tutte le categorie: solo in ADP arriva al 10%. Per quanto riguarda la voce "Vivaio" risulta essere inferiore al 10% in quasi tutte le categorie d'impatto. "Materiali serra" ha una incidenza maggiore nelle categorie EP, AP, FEP, GWP e ADP_f. L'uso di

fitofarmaci ha un impatto maggiore nella categoria ADP e ODP mentre la voce "Combustibile" incide maggiormente nelle categorie GWP, ODP, POCP e AP. Nel caso del tunnel quest'ultima voce viene sostituita da "Operazione colturali" che comprende anche l'uso di combustibile, mentre nel fuorisuolo "Combustibile" si riferisce all'uso di combustibili per le operazioni di gestione della serra. Per quanto riguarda la fase di packaging, l'uso del cartoncino uso e getta per il confezionamento delle fragole risulta avere un impatto maggiore nella categoria TEP ed in misura minore in GWP e ODP. La "Vaschetta PET ric." incide maggiormente in ADP_f, FEP e MEP mentre l'uso del pallet ha una contribuzione maggiore nelle categorie ADP_f, HTP, FEP e MEP.

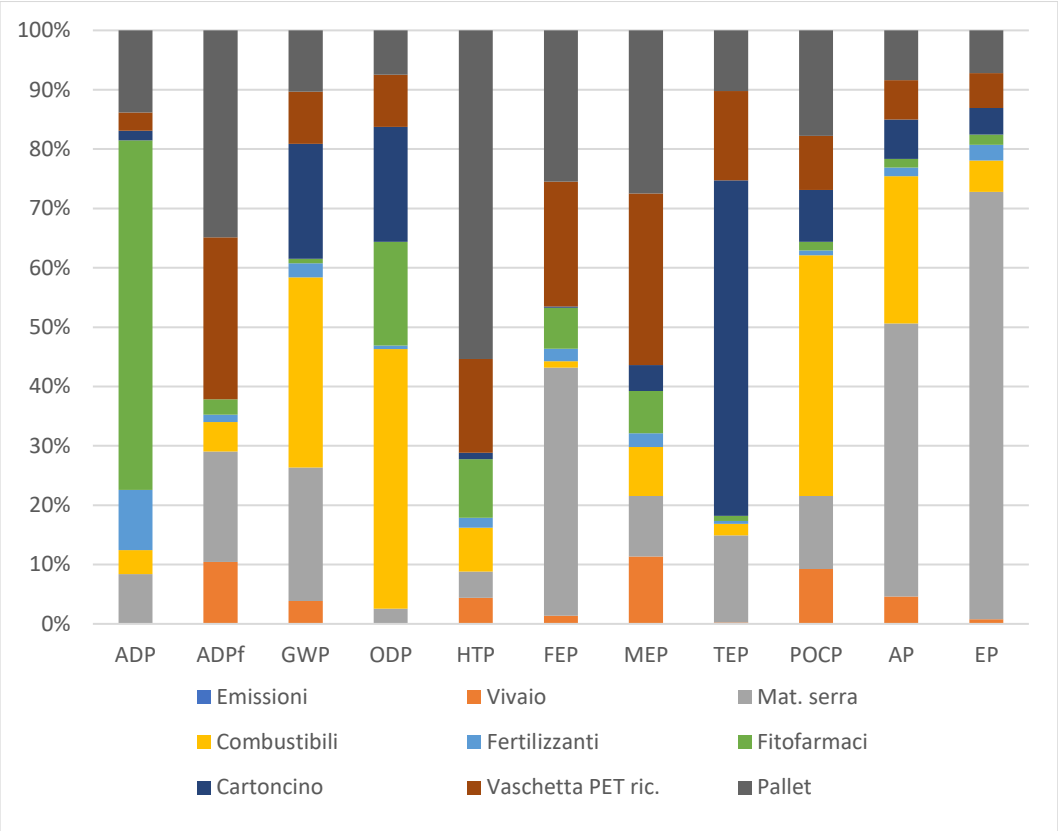

Grafico 4-6: Contributo d'impatto dei diversi input nella coltivazione soilless

Analisi di sensitività

Questa tipologia di analisi solitamente si effettua sugli input che hanno mostrato maggiore impatto dall'analisi di contribuzione. La procedura è finalizzata a valutare la risposta dell'impatto alla variazione dei valori di tali input. Nella pratica si fanno variare i parametri utilizzati (inputs, outputs) per osservare poi gli effetti che si generano sul risultato finale. I dati

oggetto di studio LCA possono essere soggetti a variabilità, soprattutto in campo agricolo dove le rese sono instabili nelle diverse annate. Quindi si è scelto, come primo passaggio, di valutare gli effetti della variazione delle rese di fragola nei due sistemi oggetto di studio.

Nella coltivazione protetta in suolo si disponeva di una variabilità di produzione derivata dai colloqui in azienda, compresa fra 600 gr/pianta e 1100 gr/pianta. Da questi valori è stata ricavata la variazione percentuale delle rese e quindi ricalcolato l'impatto ambientale, sia con resa minima che massima. Per la coltivazione soilless, invece, non disponendo di dati specifici relativi ad una eventuale variabilità di produzione, si è scelto di utilizzare la resa massima e minima delle annate 2010-2019, tramite i dati ricavati dal sito EUROSTAT. La variazione di rese stimata ed utilizzata nei calcoli è stata dell'8%. Anche in questo caso è stato ricalcolato l'impatto ambientale. Di seguito si riportano i risultati come incremento e decremento percentuale rispetto ai valori medi d'impatto (Tabella 4-13).

Tabella 4-13: Variazione percentuale d'impatto sulla base della resa

Coltivazione	Resa minima	Valore medio	Resa massima
	Incremento relativo		Decremento relativo
Tunnel	33,33%	-	-27,30%
Fuorisuolo	8,70%	-	-7,40%

Il Grafico 4-7 mostra i risultati della variazione della resa. Per "Valore medio" si intende il calcolo dell'impatto svolto con la resa media, e nel grafico questo valore viene fatto pari a 100%.

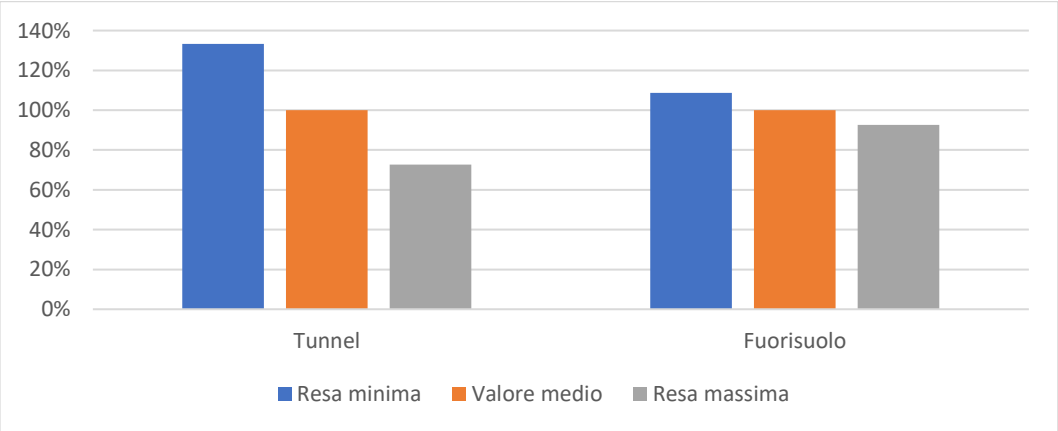

Grafico 4-7: Confronto della sensitività sulle rese in entrambi i sistemi di coltivazione

Sulla base dell'analisi di contributo si è scelto di valutare la convenienza alla sostituzione, nel packaging del tunnel, della cassetta in PP con un cartoncino usa e getta, utilizzato invece nel packaging per il fuorisuolo. Nello specifico la cassetta in PP mostra avere un'incidenza maggiore in GWP (circa 40%), in POCP (circa 20%) e in AP (circa 25%). Nella Tabella 4-14 vengono riportati i risultati. Si può osservare che la riduzione di impatto è piuttosto rilevante nelle categorie GWP, POCP e AP. In realtà anche per le altre categorie d'impatto (es. TEP o ODP) la variazione come incremento risulta essere rilevante se si considera gli impatti percentuali. Risulta essere meno rilevante se si prendono in considerazione gli impatti assoluti visto l'ordine di grandezza dell'impatto.

Tabella 4-14: Confronto dell'impatto nella sostituzione della cassetta in PP con un cartoncino usa e getta in coltivazione sotto tunnel

Categoria d'impatto	Unità	Tunnel base	Tunnel sost	Var. %
Abiotic depletion (ADP)	kg Sb eq	$1,67E^{-06}$	$1,69E^{-06}$	1,44
Abiotic depletion fossil fuels (ADPf)	MJ	$5,83E^{+00}$	$5,83E^{+00}$	0,03
Global warming (GWP)	kg CO_2 eq	$8,55E^{-01}$	$6,85E^{-01}$	-24,81
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	$1,81E^{-08}$	$2,95E^{-08}$	38,49
Human toxicity (HTP)	kg 1,4-DB eq	$1,77E^{-01}$	$1,76E^{-01}$	-0,67
Fresh water aquatic ecotoxicity (FEP)	kg 1,4-DB eq	$8,15E^{-02}$	$8,17E^{-02}$	0,23
Marine aquatic ecotoxicity (MEP)	kg 1,4-DB eq	$2,64E^{+02}$	$2,53E^{+02}$	-4,53
Terrestrial ecotoxicity (TEP)	kg 1,4-DB eq	$2,12E^{-04}$	$5,98E^{-04}$	64,49
Photochemical oxidation (POCP)	kg C_2H_4 eq	$2,53E^{-04}$	$2,08E^{-04}$	-21,62
Acidification (AP)	kg SO_2 eq	$5,53E^{-03}$	$4,62E^{-03}$	-19,69
Eutrophication (EP)	kg PO_4^{3-} eq	$1,82E^{-03}$	$1,80E^{-03}$	-0,91

4.5 **Discussione**

Varie sono le considerazioni che possono essere fatte dai risultati dello studio svolto. Una prima valutazione può essere fatta sul confronto fra i due sistemi di coltivazione. La Tabella 4-10 riporta i risultati dell'analisi LCA del sistema in suolo sotto tunnel e fuorisuolo. Si può osservare che l'impatto in termini di kg CO_2 eq sia un po' più elevato per la coltivazione in tunnel con un valore di $8,55E^{-01}$ mentre nella coltivazione in fuorisuolo risulta di $8,33E^{-01}$. Ciò nonostante, entrambi i valori non si discostano molto fra di loro, segno che l'impatto nei due sistemi non è così differente. Sulla base della letteratura precedentemente analizzata si può anche affermare che gli impatti sono in linea con quelli osservati nel campo internazionale. D.

Valiante *et al.* affermano che l'impatto è di 0,212 kg CO_2 eq/kg di fragole ma in una coltivazione in Italia in pieno campo [2], mentre B. Khoshnevisan *et al.*, su coltura in GH, hanno ottenuto un valore di 0,695 kg CO_2 eq, anche se in questo lavoro non sono state prese in considerazione le fasi del post-harvest [5]. Anche E. Soode *et al.*, nello studio in Germania, hanno ottenuto un valore di CF per la fragola compreso fra 0,1 e 10,2 kg CO_2 eq [8]. S. Clune *et al.*, nella review su prodotti alimentari, propone un valore medio di emissioni in kg CO_2 eq per la fragola pari a 0,660 [10]. Inoltre, E. Soode-Schimonsky *et al.*, sempre in coltura in GH, riportano un valore di 0,45 kg CO_2 eq [7]. Perciò si può affermare che i risultati ottenuti dal nostro studio, seppur differenti fra di loro, possono essere compresi nella scala dei risultati presenti in letteratura e quindi si possono considerare in linea con essi.

Successivamente si possono prendere in considerazione le categorie di maggior interesse a livello ambientale. Dal confronto è emerso che per la HTP la coltivazione in suolo ha un valore, seppur di poco, più elevato della coltivazione fuorisuolo. B. Khoshnevisan *et al.*, nel lavoro svolto in Iran, propongono per la coltivazione in GH un valore di $1{,}50E^{-01}$ kg 1,4-DB eq, comunque piuttosto in linea con i valori del presente lavoro [5]. La coltivazione fuorisuolo mostra un valore di EP un po' più elevato rispetto alla coltivazione in suolo in tunnel, derivante dai diversi modelli di emissione selezionati. Anche in questo caso dal confronto con la letteratura, emerge che, nel medesimo lavoro precedentemente citato, invece, presenta un valore più basso pari a $2{,}70E^{-04}$ kg PO_4^{3-} eq. Per quanto riguarda la categoria POCP la coltivazione fuorisuolo mostra più elevato rispetto a quella in suolo. Dal confronto con la letteratura emerge che tali valori sono più o meno in linea con quelli dei lavori analizzati [5].

Nel Grafico 4-1 viene mostrato il confronto fra i due sistemi di coltivazione, ripartendo le fasi di coltivazione e di packaging. E. Soode *et al.* affermano che, nel loro lavoro, per gran parte del CF contribuiscono le fasi di pre-coltivazione e coltivazione, anche se nel medesimo lavoro è stato preso in considerazione l'intero ciclo, compreso il consumo a casa [8]. Invece D. Valiante *et al.* dichiara che, nel contesto italiano, le operazioni di campo non sono predominanti, anche per via dell'assenza di sterilizzazione del suolo [2]. Da una prima analisi si può osservare che per le categorie AD e EP incide di più la fase di coltivazione in entrambe le tipologie di coltivazione. Invece nelle categorie HTP, MEP, TEP, POCP è più incidente la fase di packaging, sempre in entrambi i sistemi. Nello specifico si può osservare che per la categoria ADP_f è la coltivazione fuorisuolo che porta un'incidenza maggiore per la fase di packaging, così come nella categoria HTP e TEP.

Il Grafico 4-2, invece, mostra il confronto fra i due sistemi di coltivazione raggruppando i diversi input utilizzati in macrocategorie come mostrato in legenda.

La fase di "Vivaio" risulta avere una bassa incidenza in quasi la totalità delle categorie. Anche E. Soode-Schimonsky *et al.* affermano che la fase di pre-coltivazione ha una bassa incidenza sul risultato finale [7].

Per la voce "Operazioni colturali", presente solo in coltura in suolo, si può osservare che è poco rilevante nella maggior parte delle categorie. A riguardo questa voce comprende le operazioni colturali di preparazione del terreno e messa a dimora delle piantine, ivi compresi i consumi di combustibile. Riguardo ai "Materiali serra" l'incidenza maggiore si ha nel fuorisuolo per EP e AP, mentre nelle categorie GWP (circa 20%) e FEP (circa 40%) entrambi i sistemi sì equivalgono. Dai risultati specifici ricavati dal SimaPro© si può osservare che la voce "Acciaio galvanizzato" presenta valori negativi per la categoria EP. Questo risultato nel grafico viene perso a causa della somma delle diverse voci che andranno a formare le categorie in legenda. L'acciaio galvanizzato pertanto produce un effetto positivo, per quanto riguarda l'emissione in fosforo, poiché nel processo di trasformazione viene sottratto momentaneamente fosforo dall'ambiente e quindi l'eutrofizzazione risulta minore.

"Emissioni" hanno un'incidenza maggiore in EP nella coltivazione in tunnel, mentre per il resto è piuttosto bassa. Nella categoria POCP del tunnel si può osservare che tale voce assume un valore negativo circa del 10%. Se si vanno ad osservare i dati elementari la voce negativa corrisponde alla presenza di NO. Questo fenomeno può essere dovuto alle emissioni di NO che producono un effetto positivo nel contrasto all'ossidazione fotochimica dell'atmosfera. L'uso dei fitofarmaci risulta avere una incidenza maggiore (circa il 30%) in ADP e ODP nel tunnel, mentre per le restanti categorie è poco incidente. Anche per il soilless la categoria con più incidenza per i fitofarmaci è ADP.

L'uso dei concimi in tunnel ha una incidenza media fra il 20% e il 30%, con contribuzione maggiore nelle categorie ADP, ADP_f, POCP e AP. Invece i fertilizzanti nel fuorisuolo hanno una bassa incidenza in quasi tutte le categorie: solo in ADP arriva al 10%. Ciò può essere dovuto al fatto che nella preparazione e gestione della coltura in suolo vengono utilizzati molti concimi minerali mentre per la nutrizione soilless gli elementi della nutrizione, contenuti in composti anche piuttosto semplici, vengono somministrati attraverso la soluzione nutritiva. Inoltre, non ci sono modelli di emissione su cui basare i calcoli per i fertilizzanti somministrati in soilless, e quindi supponiamo che il fertilizzante sia tutto utilizzato dalla coltura. Di conseguenza risulta che l'incidenza sull'uso dei fertilizzanti è maggiore nella coltivazione in suolo.

Per quanto riguarda i materiali di packaging si può osservare che l'utilizzo del pallet ha una incidenza più o meno marcata nelle varie categorie in entrambi i sistemi di coltivazione. La cassetta in PP, nel caso della coltivazione in tunnel, ha una incidenza maggiore in GWP (circa 40%), in POCP (circa 20%) e in AP (circa 25%). Invece, l'utilizzo del cartoncino usa e getta nel soilles risulta più incidente in TEP (circa 50%), GWP (circa 20%) e TEP (circa 15%). S.M.H. Tabatabaie, G.S. Murthy *et al.* affermano che l'uso di materiale plastico contribuisce maggiormente sulle categorie di impatto ambientale e E. Soode-Schimonsky *et al.* dichiarano che risultati elevati su varie categorie possono derivare da particolari processi o input [9] [7]. Pertanto, è stata condotta una prova, riguardante la coltura in tunnel, per la sostituzione della cassetta in PP con in cartoncino usa e getta, già in uso nel soilles. La Tabella 4-16 mostra i risultati a confronto e la variazione percentuale. Si può osservare che si generano riduzioni dell'impatto per quanto riguarda le categorie d'interesse GWP, POCP e AP. Si hanno invece aumenti del 38,49% e del 64,49% rispettivamente per le categorie ODP e TEP, ma possono essere considerate trascurabili per via della grandezza piuttosto bassa degli esponenti decimali. Si può affermare che, nonostante la cassetta in PP abbia una vita media di 4-5 anni diversamente dal cartoncino che è usa e getta, dal punto di vista dell'impatto ambientale sia più conveniente l'utilizzo del cartoncino anche nel packaging della coltivazione in tunnel.

Per quanto riguarda l'analisi di sensitività, per il fatto che in campo agricolo le rese sono instabili nelle diverse annate, si è deciso di valutare l'impatto ambientale sulla base della variabilità delle stesse. Nella coltivazione in tunnel i valori utilizzati per i calcoli sono dati primari, e cioè direttamente legati all'analisi aziendale. Invece per la coltivazione fuorisuolo, non disponendo di dati aziendali, il calcolo è stato basato su variazioni ricavate dall'analisi dei dati EUROSTAT. Perciò l'attendibilità per il caso studio, della variabilità del fuorisuolo rispetto ai valori del tunnel, è minore ma è meglio scalabile ai sistemi nazionali. S.M.H. Tabatabaie, G.S. Murthy *et al.* affermano che con rese più elevate si hanno minor impatti ambientali [9]. Anche D. Valiante *et al.* dichiarano che le variazioni degli impatti sono proporzionali alle variazioni della resa [2]. Si può osservare che anche nel lavoro svolto viene confermato questo comportamento. Nel caso della coltivazione in tunnel questa variazione risulta molto più alta che nel fuorisuolo, con valori pari al +33,33% con resa minima e -27,30% con resa massima. D. Valiante *et al.* utilizzano una variazione media del ±15% per colture GH e ±30% in OP, perché più soggette alle condizioni climatiche [2]. Ma nel nostro caso, come anche già detto in precedenza, le variazioni sono più alte ma più attendibili perché derivanti da dati aziendali. Invece nella coltivazione soilless le variazioni sono mediamente dell'±8% e quest'ultime risultano più basse, anche se meno attendibili per il caso studio.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono state prese in considerazione differenti pratiche di coltivazione di fragola al fine di valutare l'impatto ambientale in due sistemi a diversa gestione. Sono stati analizzati tutti i processi del ciclo fino al prodotto pronto per essere commercializzato. I risultati sono stati riferiti all'unità funzionale di 1 kg di fragola. È emerso che l'impatto ambientale, espresso come kg CO_2 eq/kg di fragole, è stato di 0,855 per la coltivazione in suolo e 0,833 nella coltivazione soilless. Questi valori, seppur con il soilless che mostra un risultato un po' più basso, non sono poi così discordanti e quindi si può affermare che fra i due sistemi di coltivazione non esistono differenze sostanziali per quanto riguarda l'incidenza ambientale.

Dal confronto emerge anche che fra le fasi di coltivazione e di packaging, in entrambi i sistemi di coltivazione, ed in particolare per la categoria GWP, non esiste una predominanza maggiore per una delle due fasi.

Dall'analisi di sensitività sulle rese è emerso che l'impatto risulta proporzionale alle variazioni delle stesse. In particolare, a rese più elevate corrisponde un impatto minore, e viceversa a rese più basse corrisponde un impatto maggiore. Nel caso della coltivazione in suolo queste variazioni sono state circa ±30%, utilizzando dati di rese aziendali. Invece nel soilless queste variazioni sono state più basse (±8%), ma i calcoli sono stati basati su dati nazionali.

Inoltre, proprio perché alcuni autori affermavano che l'uso della plastica risulta piuttosto impattante in diverse categorie d'impatto, nella coltivazione in tunnel è stata volta un'analisi di sostituzione nel packaging, della cassetta in PP con un cartoncino usa e getta. Per quanto riguarda le emissioni in kg CO_2 eq/kg di fragole, quest'ultime vengono ridotte, passando da 0,855 a 0,685, con una variazione di -24%. Anche altre categorie d'impatto subiscono una riduzione, in particolare POCP -21% e AP -19%.

BIBLIOGRAFIA

[1] I. A. and M. P. P. Merwin, "Are modern fruit production systems sustainable?," *Horttechnology*, vol. 3, pp. 128–136, 1993.

[2] D. Valiante *et al.*, "Environmental impact of strawberry production in Italy and Switzerland with different cultivation practices," *Sci. Total Environ.*, vol. 664, pp. 249–261, May 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.046.

[3] M. D. Stevens *et al.*, "A comparison of three cold-climate strawberry production systems: Environmental effects," *HortScience*, vol. 44, no. 2, pp. 298–305, Apr. 2009, doi: 10.21273/hortsci.44.2.298.

[4] O. Rysin, A. McWhirt, G. Fernandez, F. J. Louws, and M. Schroeder-Moreno, "Economic viability and environmental impact assessment of three different strawberry production systems in the southeastern United States," *Horttechnology*, vol. 25, no. 4, pp. 585–594, Aug. 2015, doi: 10.21273/horttech.25.4.585.

[5] B. Khoshnevisan, S. Rafiee, and H. Mousazadeh, "Environmental impact assessment of open field and greenhouse strawberry production," *Eur. J. Agron.*, vol. 50, pp. 29–37, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.eja.2013.05.003.

[6] B. Khoshnevisan, H. M. Shariati, S. Rafiee, and H. Mousazadeh, "Comparison of energy consumption and GHG emissions of open field and greenhouse strawberry production," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29. Elsevier Ltd, pp. 316–324, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.098.

[7] E. Soode-Schimonsky, K. Richter, and G. Weber-Blaschke, "Product environmental footprint of strawberries: Case studies in Estonia and Germany," *J. Environ. Manage.*, vol. 203, no. Pt 1, pp. 564–577, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.03.090.

[8] E. Soode, P. Lampert, G. Weber-Blaschke, and K. Richter, "Carbon footprints of the horticultural products strawberries, asparagus, roses and orchids in Germany," *J. Clean. Prod.*, vol. 87, no. 1, pp. 168–179, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.09.035.

[9] S. Tabatabaie, G. Murthy, G. Murthy, and G. Murthy, "Cradle to farm gate life cycle assessment of strawberry production in the United States," *J. Clean. Prod.*, vol. 127, 2016.

[10] S. Clune, E. Crossin, and K. Verghese, “Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories,” *J. Clean. Prod.*, vol. 140, pp. 766–783, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.082.

[11] ISO 14040:2006, “Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.”

[12] ISO 14044:2006, “Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines.”

[13] T. Boulard *et al.*, “Environmental impact of greenhouse tomato production in France,” *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 31, no. 4, pp. 757–777, 2011, doi: 10.1007/s13593-011-0031-3.

[14] The International EPD® System, “PCR detail - Fruits and nuts,” pp. 1–28, 2019, [Online]. Available: https://www.environdec.com/PCR/Detail/?Pcr=14175.

SITOGRAFIA

https://www.reteclima.it/product-environmental-footprint-pef-organisation-environmental-footprint-oef-analisi-dellimpronta-ambientale/

https://www.ecoinvent.org/

https://www.to-be.it/

https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/key-policies/common-agricultural-policy/cap-glance_it

https://agriregionieuropa.univpm.it/it/content/article/31/29/la-politica-agricola-europea-dalle-origini-alle-nuove-sfide

https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors

https://ec.europa.eu/eurostat/home