



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE E TECNOLOGIE ALIMENTARI

IMPATTO AMBIENTALE DELL'ALLEVAMENTO DI
ACHETA DOMESTICUS PER L'ALIMENTAZIONE
UMANA.

ENVIRONMENTAL IMPACT OF BREEDING ACHETA DOMESTICUS FOR HUMAN
CONSUMPTION.

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
NICOLA BARTOLI

Relatore:
PROF. DANIELE DUCA

CORRELATORE
DOTT. ALESSIO ILARI

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Ai miei genitori che hanno creduto in me
prima ancora che lo facessi io.

SOMMARIO

SOMMARIO	4
ELENCO DELLE TABELLE.....	6
ELENCO DELLE FIGURE	7
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI	8
1 INTRODUZIONE	9
CAPITOLO 1 ASPETTI TEORICI	10
1.1 Concetti di ecosostenibilità in ambito alimentare	10
1.1.1 I gas serra e l’impatto sulla temperatura terrestre.....	10
1.2 Life Cycle Assessment (LCA) come strumento di valutazione ambientale.....	11
1.2.1 Storia del LCA e riferimenti normativi.....	11
1.3 Fasi dell’Analisi del Ciclo di Vita.....	12
1.3.1 Definizione degli obiettivi e dei confini del sistema.....	12
1.3.2 Analisi di inventario (LCI)	12
1.3.3 Analisi degli impatti (LCIA).....	13
1.3.4 Interpretazione dei risultati	13
1.3.5 Limiti e criticità	13
CAPITOLO 2 CARATTERISTICHE DI PRODUZIONE E SOSTENIBILITÀ DI INSETTI E PRODOTTI DERIVATI	15
2.1 Entomofagia: passato e presente	15
2.2 Descrizione di un allevamento di insetti	16
2.2.1 Area di allevamento (Breeding Area).....	16
2.2.2 Alimentazione e abbeveraggio.....	18
2.2.3 Processi successivi alla fase di allevamento	20
2.3 Utilizzi degli insetti allevati	22
CAPITOLO 3 METODOLOGIA E RACCOLTA DATI: ANALISI DEL CASO STUDIO.....	23
3.1 Procedura di Raccolta Dati e Contesto Aziendale	23
3.1.1 Analisi dei consumi elettrici	24

3.1.2	Analisi dei consumi idrici	24
3.1.3	Analisi dell'utilizzo di mangime.....	25
3.1.4	Analisi dell'utilizzo di materiali a vita breve.....	25
3.2	Scelta dell'Unità Funzionale.....	25
3.3	Il software utilizzato nell'analisi LCA.....	26
3.4	Life cycle impact assessment.....	27
3.4.1	Cambiamento climatico	27
3.4.2	Cancerogenicità per l'uomo.....	29
3.4.3	Acidificazione.....	30
3.4.4	Consumo risorse idriche	31
3.4.5	Consumo risorse rinnovabili.....	32
CAPITOLO 4 CONFRONTO CON LA LETTERATURA SCIENTIFICA		35
4.1	Introduzione all'analisi comparativa.....	35
4.2	Efficienza e formulazione dei mangimi per gli insetti	36
4.3	Analisi comparativa degli impatti ambientali	38
4.3.1	Cambiamento climatico a confronto	38
4.3.2	Cancerogenicità umana a confronto.....	40
4.3.3	Potenziali di acidificazione a confronto.....	41
4.3.4	Consumo delle risorse idriche a confronto	41
4.3.5	Occupazione di terreno a confronto	43
4.4	Confronto con le fonti proteiche convenzionali.....	45
4.4.1	Confronto del potenziale di riscaldamento globale.....	45
4.4.2	Confronto delle occupazioni di terreno.....	46
4.4.3	Confronto delle impronte idriche.....	47
CONCLUSIONI		49
BIBLIOGRAFIA		51
RINGRAZIAMENTI		55

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1: Tabella con gli input raccolti per condurre l'analisi LCA	25
Tabella 2: Produzione media in kg di grilli vivi ed essiccati	26
Tabella 3: Analisi dei macronutrienti dei grilli essiccati	26
Tabella 4: Risultati dell'analisi LCA espressi per kg di grilli tal quali e per kg di proteine	34
Tabella 5: Lista dei valori di riscaldamento globale espressi in kg CO ₂ per ogni kg di proteine derivanti dagli insetti.....	39
Tabella 6: Lista dei valori di cancerogenicità per l'uomo derivante dagli insetti	40
Tabella 7: Lista dei valori dei potenziali di acidificazione derivanti dagli insetti	41
Tabella 8: Lista dei valori di consumo delle risorse idriche espressi in m ³ water eq per 1 kg di proteine derivanti dagli insetti.....	42
Tabella 9: Lista dei dati sull'occupazione di terreno espressa in m ² a per 1 kg di proteine derivanti dagli insetti.....	44

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1: Percezione dei bachi da seta come cibo in Germania e Cina (Hartmann & Siegrist, 2016)	15
Figura 2: Cassette di allevamento contenenti T.molitor(Dreyer et al., 2021a)	17
Figura 3: Diagramma di flusso della lavorazione degli insetti(Gnana MoorthyEswaran et al., 2023)	20
Figura 4: Cambiamento climatico.....	28
Figura 5: Cancerogenicità per l'uomo	30
Figura 6: Acidificazione	31
Figura 7: Consumo di risorse idriche.....	32
Figura 8: consumo di risorse rinnovabili	33
Figura 9: Grafico del confronto del potenziale di riscaldamento globale espresso in kg di CO2 eq per 1 kg di proteine	46
Figura 10: Grafico del confronto dell'occupazione di terreno espresso in metri quadri per 1 kg di proteine	47
Figura 11: Grafico del confronto dell'impronta idrica espresso in litri per 1 kg di proteine	48

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

LCA	Life Cycle Assesment
GHG	Greenhouse gases
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
MASAF	Ministero dell'agricoltura, della sovranità alimentare e delle foreste
UE	Unione europea
FCR	Feed conversion ratio
IPIFF	International Platform of Insects for Food and Feed
FU	Functional Unit

1 INTRODUZIONE

I crescenti danni sugli ecosistemi richiedono un aumento della consapevolezza sulle tecniche di produzione dell'industria alimentare, cercando quanto prima di abbassare l'impatto ambientale.

La costante crescita economica combinata all'aumento della popolazione, hanno favorito pratiche di produzione alimentare che contribuiscono in maniera significativa alle emissioni di gas serra, allo spreco di risorse e alla perdita di biodiversità.

Le politiche europee spingono verso strategie che mirano a una transizione ecologica lungo tutta la filiera alimentare. In tale scenario una risposta sembrerebbe essere l'integrazione degli insetti nella dieta umana.

Alla radice di questa idea sta l'elevato rapporto di conversione del mangime in massa corporea, in particolare proteine.

Questa tesi si concentrerà sulla valutazione della sostenibilità ambientale della produzione di *Acheta domesticus*, approfondendo più nel dettaglio il sistema produttivo dell'azienda "Nutrinsect".

Tale caso sarà confrontato ad altre specie attraverso dati sugli impatti ambientali ricavati dall'analisi della letteratura scientifica.

Inoltre, poi sarà fatto un confronto con le fonti proteiche convenzionali sulle principali categorie di impatto ambientale, quali potenziale di riscaldamento globale, utilizzo di territorio e impronta idrica.

In sintesi, la tesi ha l'obiettivo di rispondere al quesito sull'effettiva ecosostenibilità degli insetti ed in che modo essi possano contribuire a una dieta sostenibile, offrendo un'analisi comparativa delle evidenze disponibili in letteratura, con l'intento di portare dei riscontri quanto più oggettivi a tali domande.

Capitolo 1

ASPETTI TEORICI

1.1 Concetti di ecosostenibilità in ambito alimentare

Il settore alimentare esige una considerevole richiesta di risorse, specialmente in termini di acqua e genera un quantitativo significativo di emissioni di gas serra (GHG). Questo fenomeno avviene sia nelle fasi iniziali di coltivazione che nei processi successivi di trasformazione e distribuzione.

Le emissioni di gas serra nell'ambito alimentare sono prevalentemente il risultato di un consumo di energia, spesso proveniente da fonti non rinnovabili. Secondo uno studio le emissioni di gas serra da parte del settore alimentare ammontano ad un 35% del totale di quelle di origine antropica (Xu et al., 2021).

1.1.1 I gas serra e l'impatto sulla temperatura terrestre

I gas serra sono sostanze che possiedono la capacità di assorbire la radiazione infrarossa, sotto forma di calore, emessa dalla superficie terrestre e di rifletterla nuovamente verso la Terra. Questo fenomeno contribuisce all'effetto serra, mantenendo una temperatura media sulla Terra che permette la vita come la conosciamo. L'eccesso è la principale causa del riscaldamento globale e dei cambiamenti climatici. (Mann, 2024)

I gas serra principali includono:

Anidride carbonica (CO₂): Emessa principalmente da attività umane come la combustione di combustibili fossili e la deforestazione.

Metano (CH₄): Proveniente da fonti naturali come i processi digestivi di animali e vegetali, ma anche da attività umane tra cui l'agricoltura.

Vapore acqueo (H₂O): Presente naturalmente nell'atmosfera, la sua concentrazione aumenta con il riscaldamento generale.

Ozono (O₃): Presente nell'atmosfera, può contribuire agli effetti serra a livelli elevati.

Ossidi di azoto (NO_x): Provenienti principalmente da processi di combustione, come quelli negli autoveicoli e nelle centrali elettriche.

Gas fluorurati (CFC, HFC, PFC, SF6): Prodotti artificiali con un potenziale di riscaldamento globale molto elevato, spesso utilizzati in vari settori industriali.

L'aumento delle concentrazioni di gas serra, specialmente CO₂ e metano, contribuisce all'incremento dell'effetto serra. Questo porta al riscaldamento globale, con impatti su scala globale come cambiamenti meteorologici, aumento del livello del mare, estinzioni delle specie, e cambiamenti degli ecosistemi.(Mann, 2024)

Nel 2015, gli Stati membri delle Nazioni unite hanno firmato gli Accordi di Parigi con l'obiettivo primario di limitare l'aumento della temperatura media globale a 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali.

Anche nell'ipotesi surreale in cui si arrestassero immediatamente tutte le emissioni non provenienti dal settore alimentare, le emissioni derivanti esclusivamente da quello alimentare potrebbero superare il limite stabilito di 1,5°C tra il 2051 e il 2063.(Clark et al., 2020)

Questa previsione sottolinea la marcata rilevanza del settore alimentare nel contesto dei cambiamenti climatici. Nonostante gli sforzi mirati a mitigare le emissioni provenienti da fonti non alimentari, le pratiche attuali nel sistema alimentare, che comprendono deforestazione, utilizzo di fertilizzanti, allevamento di ruminanti e combustione di combustibili fossili nelle catene di produzione e distribuzione alimentare, risultano essere una fonte sostanziale di gas serra.(Clark et al., 2020)

1.2 Life Cycle Assessment (LCA) come strumento di valutazione ambientale

L'Analisi del Ciclo di Vita (LCA), nota anche come Life Cycle Assessment in inglese, rappresenta un metodo finalizzato alla valutazione dell'impatto ambientale globale associato a un prodotto o a un processo durante il suo ciclo di vita.

1.2.1 Storia del LCA e riferimenti normativi

Nel 1979, Boustead e Hancock hanno introdotto il metodo di analisi energetica nel loro "Manuale di analisi energetica", il quale porterà alla creazione di quella che oggi conosciamo come LCA e alla sua diffusione.(Boustead & Hancock, 1979)

Il termine Life Cycle Assessment sarà coniato tuttavia per la prima volta nel 1990 dalla SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry), descrivendolo come «un processo finalizzato a valutare gli oneri ambientali associati a un prodotto, processo o attività identificando e quantificando l'energia e i materiali utilizzati e i rifiuti rilasciati nell'ambiente. Lo scopo è valutare l'impatto di tali utilizzi e rilasci di energia e materiali sull'ambiente, nonché individuare e valutare opportunità per apportare miglioramenti ambientali. La valutazione

coinvolge l'intero ciclo di vita del prodotto, processo o attività, compresi l'estrazione e la lavorazione delle materie prime, la produzione, il trasporto e la distribuzione, l'uso, il riutilizzo, la manutenzione, il riciclo e lo smaltimento finale.»(SETAC, 1991)

Fu anche presentato uno schema che riportava le fasi principali da seguire, struttura fondamentale che ancora oggi caratterizza il LCA.

Nei successivi anni il Life Cycle Assessment si è evoluto col susseguirsi di diversi manuali e linee guida aggiornate, fino ad arrivare al 1997 con la pubblicazione di quelle che sono le due norme ISO principali aggiornate poi nel 2021 (ISO 14040, 2021; ISO 14044,2021).

1.3 Fasi dell'Analisi del Ciclo di Vita

Secondo quanto riportato nelle norme ISO 14040 e 14044, il processo di LCA si articola in quattro fasi ben definite:

- Definizione degli obiettivi e dei confini del sistema (Goal definition and Scoping)
- Analisi di inventario (Life Cycle Inventory Analysis - LCI)
- Analisi degli impatti (LCIA)
- Interpretazione dei risultati (Life Cycle Interpretation and Improvement)

1.3.1 Definizione degli obiettivi e dei confini del sistema

Nella fase iniziale si definiscono chiaramente le finalità dello studio, il campo di applicazione e le funzioni del sistema oggetto di analisi. Viene individuata l'unità funzionale, si delimitano i confini del sistema, e si considerano attentamente le caratteristiche dei dati, le assunzioni e i limiti dell'analisi. Durante questo processo, si valutano in modo graduale gli obiettivi del Life Cycle Assessment (LCA), il grado di accuratezza dell'analisi e l'oggetto dello studio, includendo dettagli sul tipo di prodotto, la quantità, i limiti temporali e le funzioni rilevanti. L'obiettivo primario è assicurare una definizione rapida ed efficace per fornire una base solida nelle fasi successive dell'analisi del ciclo di vita.(Marino et al., 2009)

1.3.2 Analisi di inventario (LCI)

La fase di Analisi dell'Inventario (LCI) coinvolge la raccolta di dati e i processi di calcolo volti a quantificare i flussi che entrano ed escono dal sistema produttivo.

L'Analisi dell'Inventario può essere suddivisa in tre sottofasi distinte:

- Raccolta dei dati

- La definizione delle condizioni al contorno e definizione dei punti di confine tra il sistema studiato e l'ambiente
- Elaborazione dati (Marino et al., 2009)

1.3.3 *Analisi degli impatti (LCIA)*

L'obiettivo dell'analisi degli impatti è individuare e misurare gli impatti ambientali. Fondamentalmente, la LCIA mira a convertire ciascun flusso di sostanze identificato nell'inventario in un contributo agli impatti ambientali e dare un giudizio di pericolosità.

La LCIA può essere distinta in quattro fasi, di cui solo le prime due sono obbligatorie:

- **Classificazione:** I dati acquisiti durante l'inventario vengono associati a una o più categorie d'impatto ambientale. Una categoria d'impatto costituisce una classe che rappresenta il genere di questioni ambientali e non a cui è possibile attribuire l'impatto. Sono anche dette categorie di danno.
- **Caratterizzazione:** vengono sommati e quantificati gli impatti per valutare il danno della sostanza o della risorsa in questione.
- **Normalizzazione:** Relativizza e confronta gli impatti quantificati, facilitando una comprensione più chiara delle dimensioni e dell'importanza relativa degli impatti che spesso hanno unità di misura differenti.
- **Valutazione:** Assegna un peso alle varie categorie di impatto, rispecchiando le preferenze sociali e culturali. (Marino et al., 2009)

1.3.4 *Interpretazione dei risultati*

Nella fase finale dell'analisi del ciclo di vita, si procede all'interpretazione dei risultati ottenuti mediante calcoli. Spesso, vengono condotte analisi di sensibilità per valutare scenari alternativi per una comprensione approfondita degli impatti ambientali e delle opportunità di ottimizzazione del ciclo di vita del prodotto preso in considerazione nella fase di studio. (Marino et al., 2009)

1.3.5 *Limiti e criticità*

L'Analisi del Ciclo di Vita è afflitta da diverse problematiche. In primo luogo, la sua attuazione risulta complessa e richiede notevoli risorse finanziarie e temporali. Inoltre, si presenta come una sfida ottenere dati completi e accurati.

L'analisi LCA implica la considerazione di molteplici variabili, aumentando la sua complessità. La difficoltà nell'ottenere dati affidabili deriva da diversi fattori, come le fonti dati disponibili, i metodi di raccolta e le procedure di convalida.

Un altro problema è l'interpretazione e la comunicazione dei risultati in modo comprensibile e pertinente. A risolvere il problema intervengono i passaggi opzionali della normalizzazione e della valutazione nella constatazione dell'impatto.

Un altro ostacolo sono le variazioni spaziali e temporali degli impatti ambientali. Questo implica riconoscere le caratteristiche delle emissioni e dei loro effetti in base alla posizione geografica e al periodo di tempo coinvolto. (Bashyal Jyoti, 2023)

Capitolo 2

CARATTERISTICHE DI PRODUZIONE E SOSTENIBILITÀ DI INSETTI E PRODOTTI DERIVATI

2.1 Entomofagia: passato e presente

Secondo alcuni sondaggi condotti in Europa, i consumatori non sono molto inclini a considerare gli insetti come una fonte alimentare alternativa. In un sondaggio fatto negli USA è risultato che il 57% dei partecipanti era disgustato dall'idea di mangiare insetti (Ruby et al., 2015). È il contesto culturale che guida le nostre abitudini, spesso e volentieri anche quelle alimentari.

È proprio per questo che in nazioni come la Cina è socialmente più accettato mangiare insetti, (vedi *Figura 2-1*) piuttosto che in Europa dove ancora è un taboo. (Hartmann et al., 2015)

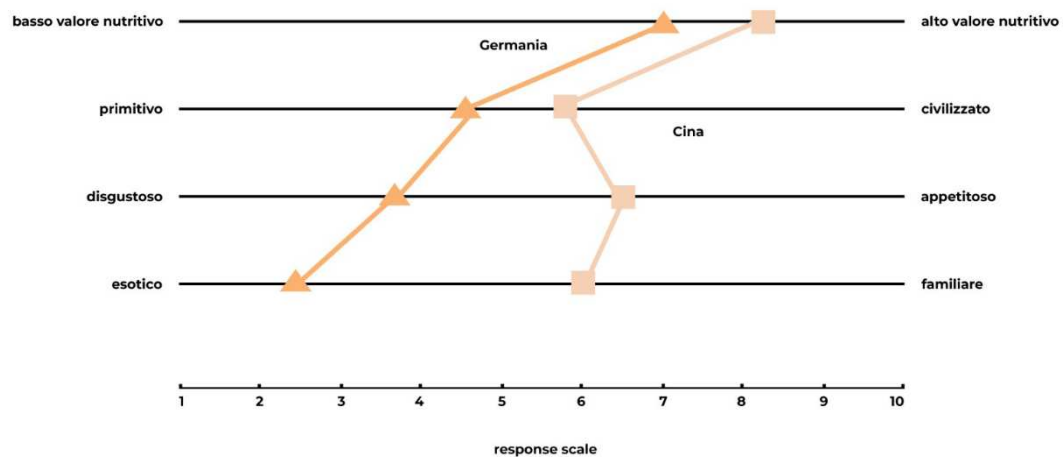


Figura 1: Percezione dei bachi da seta come cibo in Germania e Cina (Hartmann & Siegrist, 2016)

Tutte le esperienze favorevoli con gli insetti vanno a ridurre quelli che prima erano pregiudizi verso questi alimenti; infatti, le persone che hanno assaggiato insetti, magari lavorati o affiancati ad alimenti più convenzionali, sono più favorevoli al loro inserimento nella dieta. (Hartmann & Siegrist, 2016)

Ad abbattere lo scetticismo interviene anche il fatto che gli insetti erano una fonte alimentare già in tempi passati.

Abbiamo esempi del primo secolo, nel “Naturalis Historia” di Plinio il Vecchio, dove viene riportato di Etiopi che mangiavano locuste, ma anche riferimenti nella Bibbia. (Svanberg & Berggren, 2021)

Le prime opinioni a favore dell’entomofagia in Europa risalgono al XIX secolo, dove Vincent M. Holt pubblicò un manifesto intitolato “Why not eat insects?” in cui riportava alcuni insetti che si prestavano all’alimentazione umana secondo l’autore. (Svanberg & Berggren, 2021)

Nel 2013, la FAO pubblicherà una revisione promuovendo l’idea che gli insetti potrebbero integrare le produzioni alimentari esistenti per soddisfare la crescente domanda di cibo nel mondo. (FAO, 2013)

Ad oggi, con i decreti del 6 aprile 2023 da parte del Masaf, l’Italia ha approvato i seguenti insetti come alimenti destinati al consumo umano (già approvati dall’UE):

-*Tenebrio Molitor*

-*Locusta Migratoria*

-*Acheta Domesticus*

-*Alphitobius diaperinus*

2.2 Descrizione di un allevamento di insetti

In questo sotto capitolo andrò a esplicitare quelle che sono le principali caratteristiche di un allevamento di insetti, andando ad approfondire gli aspetti che lo compongono come materiali, componenti, condizioni ambientali e le varie fasi esecutive andando a citare alcune specie di insetti caratteristiche del settore alimentare.

Gli aspetti che prenderemo in considerazione sono:

- Area di allevamento
- Alimentazione e abbeveraggio
- Processi successivi alla fase di allevamento

2.2.1 Area di allevamento (*Breeding Area*)

Le aziende che producono insetti, rispetto ad altri prodotti alimentari, non sono meccanizzate, sia perché si tratta di un mercato nuovo sia per la difficoltà nell’attuarlo come le differenze tra le specie di insetti allevati, le dimensioni delle aziende che spesso sono semplici Start Up etc....

Ciò contribuisce a prezzi sostanziosi e a una qualità eterogenea dei prodotti di questa industria. Tuttavia, l'allevamento di insetti commestibili potrebbe garantire volumi di produzione sufficientemente elevati con costi per chilogrammo più competitivi se si raggiungesse un livello di meccanizzazione pari almeno all'80% nei processi produttivi.(Cortes Ortiz et al., 2016)

Per evitare la diffusione di contaminanti, le aziende di insetti dovrebbero essere suddivise in zone pulite (bianche) e sporche (nere). Devono essere implementati regimi di controllo da parte delle aziende per impedire contaminazioni esterne e la fuga degli insetti stessi. (Żuk-Gólaszewska et al., 2022)

La differenza nelle varie tipologie di allevamento può essere data dalle caratteristiche di movimento delle varie specie. Ad esempio, nel caso delle larve di *Tenebrio Molitor* è importante ridurre al minimo lo spazio tra i vassoi e substrato/mangime, evitando sprechi poiché lo utilizzeranno solo fino a certe profondità. È diverso il caso di *Acheta Domesticus*, dove la capacità di muoversi verticalmente permette di sfruttare lo spazio tridimensionale, mediante l'utilizzo di divisori "Egg crate", consentendo una maggiore densità rispetto agli spazi bidimensionali. Per ridurre lo spazio occupato ulteriormente, i contenitori possono essere posizionati su scaffali multilivello, come riportato in *Figura 2-2-1*.(Cortes Ortiz et al., 2016)



Figura 2: Cassette di allevamento contenenti *T.molitor*(Dreyer et al., 2021a)

È di fondamentale importanza fornire caratteristiche adeguate di temperatura e umidità all'insetto, differenziando ulteriormente gli allevamenti sulla base delle diverse specie. Ad esempio la temperatura ideale per *T. molitor* varia tra i 25 e i 28 gradi Celsius con un'umidità relativa ideale compresa tra il 60-75%.(Machona et al., 2023; Mlček et al., 2021) Temperature ideali diverse da quelle di *A. diaperinus* che sono comprese tra i 30 e i 32 gradi, influenzate anche dall'UR, dalla quale è stato visto un maggiore peso dell'insetto a valori del 75% rispetto al 55%.(Kotsou et al., 2021)

Il sistema di controllo climatico deve quindi garantire condizioni ambientali ottimali nell'area di allevamento, considerando anche che gli insetti non sono in grado di regolare la propria temperatura come fanno i mammiferi, producendo al massimo calore tramite sfregamenti.

È importante quindi nella progettazione di un impianto di allevamento prendere in considerazione quelli che sono gli elementi climatizzanti che lo andranno a comporre. Ogni componente deve essere selezionato con criterio ed essere perfettamente funzionante, poiché un guasto può causare il crollo del sistema.(Cortes Ortiz et al., 2016)

Tra i principali componenti di un impianto troviamo:

- Filtri
- Condizionatori di temperatura
- Umidificatori
- Deumidificatori

Nella fase finale di raccolta, le larve o gli adulti vengono separate dal compost formatosi durante la loro crescita. Questa fase varia in base al tipo di insetto preso in considerazione. Le modalità di raccolta variano a seconda di come vivono gli insetti: In genere, le larve di *Tenebrio molitor* rimangono nel substrato di crescita fino a quando non vengono separate tramite setacciatura.

Le larve di *Hermetia illucens* possono muoversi naturalmente da substrati umidi a substrati secchi, il che facilita la setacciatura che può essere meccanica o manuale.

Sta poi al produttore trovare la metodologia più opportuna ed efficiente per separare e raccogliere l'insetto dal compost. Ciò può includere la separazione degli insetti adulti tramite setacciatrici, specie per le larve, o selezionatori ("sorters"), utilizzati come nel caso di *Acheta Domesticus*, dispositivi verticali che comprendono impilatori, tubi di cartone o vassoi per uova. In molti casi la raccolta è manuale.(IPIFF, 2022)

2.2.2 Alimentazione e abbeveraggio

Il deterioramento dei mangimi può causare problemi, in particolare ciò avviene nei prodotti con elevato contenuto di acqua, rendendo la gestione del cibo è fondamentale per qualsiasi tipo di allevamento. Gli allevatori di insetti devono essere particolarmente attenti alla frequenza e al quantitativo di mangime da somministrare per evitare sprechi e il deterioramento. Ridurre gli sprechi significa anche ridurre il rischio di contaminazione da escrementi degli insetti stessi e altre sostanze. La specie allevata e la sua fase di vita determinano il tipo, la quantità e il momento della somministrazione del mangime, dettate da esigenze diversi in macro e micronutrienti.(Cortes Ortiz et al., 2016)

Ad esempio, le larve di *Hermetia Illucens* preferiscono mangimi a particelle più piccole che quelli a particelle più grandi, in un intervallo compreso tra 1mm e 9mm.

Una peculiarità di queste larve è la flessibilità alimentare che comprende svariate materie prime, compresi cereali, prodotti alimentari di alta qualità, rifiuti vegetali, frutticoli, di macellazione e persino letame. Questa flessibilità dona loro la capacità di utilizzare carboidrati e proteine impossibili da utilizzare o persino dannose per altre specie, ma comunque sia uno squilibrio nutrizionale può aumentare il catabolismo e l'escrezione, riducendo la crescita delle larve. Altra caratteristica distintiva è una velocità di alimentazione superiore alle altre specie di insetti da allevamento; le larve arrivano a mangiare anche dalle 2 alle 6,5 il loro peso in cibo. Come per altre specie di insetti i carboidrati sono la principale fonte energetica. (Seyedalmoosavi et al., 2022)

Uno studio ha evidenziato l'impatto della dieta in *Acheta Domesticus*, sottoponendo gli esemplari a regimi alimentari diversi, tra due i mangimi ("Pure pride" specifico per grilli e "Betagro" per i polli) e altri alimenti, come la polpa di zucca, polpa di zucca essiccata e il mix delle materie.

Al variare della materia prima somministrata, e quindi del rapporto dei macronutrienti e in particolare delle proteine, variavano aspetti come la composizione corporea, il peso degli esemplari, le loro dimensioni e il contenuto in vitamine e minerali.

Come ci si poteva aspettare la formulazione "Pure Pride", col 22% in proteine (la più elevata), ha portato a quantitativi più elevati di proteine nel grillo stesso correlato a un più basso contenuto in grassi. Al contrario però, un quantitativo proteico più elevato porta a un indice di conversione alimentare (FCR) più basso.

È stato studiato l'uso di scarti e sottoprodotti dell'industria agro-alimentare nelle diete di *Alphitobius diaperinus* per migliorare l'allevamento e aumentare la sostenibilità e l'economicità degli allevamenti di insetti. I risultati mostrano che *Alphitobius diaperinus* è sopravvissuto a tutti i sottoprodotti che sono stati testati in questo studio, anche se la formulazione standard (crusca di grano) si è rivelata la migliore. Sostituire dal 5% al 15% della crusca di grano in questa dieta con crusca di riso o farina di colza non impatta in maniera significativa la resa finale del sistema. (Gianotten et al., 2020)

Nonostante la possibilità di diversi insetti di poter utilizzare diverse fonti alimentari e substrati, ciò non permette l'utilizzo di fonti, citate precedentemente, come «feci, urine nonché il contenuto separato del tubo digerente ottenuto dallo svuotamento o dall'asportazione del medesimo.», come riportato nell'allegato III del regolamento (UE) n.767\2009 sull'immissione sul mercato e sull'uso dei mangimi. (Parlamento europeo e Consiglio, 2009)

Inoltre, sono vietati dal regolamento (UE) n.1069 del 21 ottobre 2009 «rifiuti di cucina e ristorazione o materie prime per mangimi contenenti tali rifiuti o derivate dagli stessi». (Parlamento europeo e Consiglio, 2009)

La produzione di specie di insetti ha una ridotta necessità di acqua rispetto al bestiame, il che è un grande vantaggio. Per alcune specie, l'acqua può essere facilmente incorporata nel loro regime alimentare tramite verdure e frutta fresca, ma altre specie richiedono un apporto idrico aggiuntivo indipendentemente dall'alimentazione, in particolare se il cibo è secco, come nel caso di *Acheta Domesticus*. È quindi necessario, in quest'ultimo caso, installare sistemi per dosare accuratamente l'acqua ed evitare che gli insetti annughino e che i microrganismi possano proliferare.

Uno studio ha dimostrato che lo stato di idratazione di *Acheta Domesticus* ha un impatto significativo sui tassi di crescita di un individuo, sia in termini di massa corporea che di lunghezza. È stato osservato che alcune femmine adulte di grilli sottoposte ad un trattamento ad alta idratazione per un giorno hanno mostrato ovopositori molto più lunghi, permettendo la deposizione delle uova a profondità maggiori e più umide nel terreno, aumentando il successo riproduttivo. Questo è particolarmente vero in natura, in condizioni controllate è ovviamente meno rilevante, ma pur sempre considerevole.

2.2.3 Processi successivi alla fase di allevamento

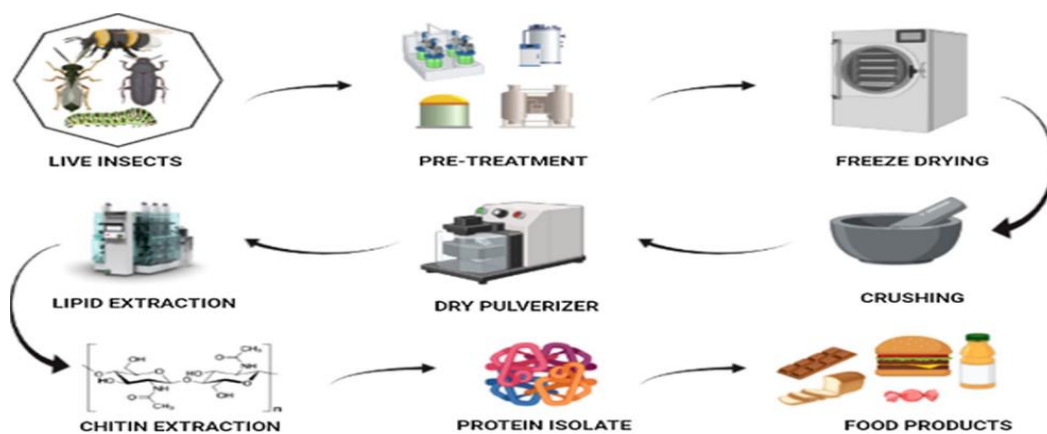


Figura 3: Diagramma di flusso della lavorazione degli insetti (Gnana Moorthy Eswaran et al., 2023)

Si inizia con il pretrattamento, dove i produttori usano spesso il raffreddamento per mantenere gli insetti vivi, rallentando il loro metabolismo e immobilizzandoli. Ad esempio, per le larve di *Hermetia illucens* e *Tenebrio Molitor* si utilizzano temperature di 0–5°C; invece, per *Acheta domesticus* si usano temperature di 5–10°C. È compito dell'operatore assicurare una

temperatura costante per tutto il processo al fine di garantire la conservazione della qualità del prodotto.(IPIFF, 2022)

Successivamente avviene l'abbattimento vero e proprio dell'insetto, i cui modi principali sono l'acqua calda, il vapore bollente o il congelamento. Queste tecniche si concentrano principalmente sulla eliminazione dei batteri comuni come Enterobacteriaceae, *Staphylococcus* e Bacilli, nonché dei lieviti e delle muffe. Mirano anche ad inattivare la fenolossidasi, enzima responsabile di intossicazioni e deterioramenti.(Gnana Moorthy Eswaran et al., 2023)

Immergere gli insetti in acqua calda, o "blanching", è uno dei metodi più comuni, dove le alte temperature causano la morte immediata degli insetti e la contemporanea riduzione della flora microbica.(IPIFF,2022)

L'abbattimento; invece, è il processo più conservativo per quanto riguarda il profilo nutrizionale. Un altro vantaggio di questa tecnica è che, gli insetti congelati possono essere conservati in contenitori sigillati, prima di subire successive lavorazioni.

Dopo le fasi di abbattimento, seguono i cosiddetti "Post-Killing Steps", di natura termica, chimica oppure meccanica.

Uno degli obiettivi di questa fase è la disidratazione, che può essere ottenuta mediante liofilizzazione o tramite metodi che prevedono l'utilizzo del calore.(IPIFF, 2022)

L'essiccazione migliora la durata di conservazione e la qualità dei prodotti perché riduce il contenuto di umidità e l'attività dell'acqua. È stato visto in laboratorio che utilizzando la liofilizzazione, è possibile mantenere il profilo nutrizionale degli insetti per un lungo periodo di tempo. I campioni liofilizzati presentano inoltre un indice di brunitura inferiore e una luminosità superiore. Rispetto agli altri metodi di essiccazione, la liofilizzazione è quella che conserva anche la maggiore quantità di composti volatili, responsabili dell'aroma del prodotto. (Khatun et al., 2021) Un problema di questo approccio, tuttavia, è l'ossidazione lipidica che può verificarsi nei prodotti di *T. molitor* ad alto contenuto lipidico. L'alternativa più conveniente è l'essiccazione in forno: grazie alla bassa spesa energetica, all'alta solubilità proteica e alla ridotta ossidazione lipidica, la fa essere la scelta più gettonata. L'essiccazione con microonde è ottimale anche in quei casi in cui si presenta un'attività dell'acqua ridotta e un contenuto relativamente basso di grassi, proteine e minerali.(Gnana Moorthy Eswaran et al., 2023)

2.3 Utilizzi degli insetti allevati

Gli utilizzi che possono avere gli insetti allevati sono molteplici e, anche se alcuni di questi non sono strettamente legati al mondo alimentare, sono comunque sia legati a un approccio ecosostenibile e alternativo nelle scelte di vita di tutti i giorni; perciò, verranno brevemente citate in questo sottocapitolo.

Gli insetti possono trovarsi in svariate forme alimentari, tra cui polveri, insetti larve e pupe essiccate, isolati proteici e snack di varia natura, comprese caramelle. Le industrie di piccola e grande scala sono arrivate nell'ultimo decennio a proporre oltre 250 prodotti. La natura proteica di tale prodotto lo rende adeguato nella formulazione di integratori per sportivi, oppure per aumentare il contenuto proteico di alimenti convenzionali quali pane, biscotti, pasta etc..(Gnana Moorthy Eswaran et al., 2023)

Insetti ad alto contenuto lipidico, come *Hermetia Illucens* che può raggiungere il 40% della materia secca possono essere utilizzati per produrre biodiesel. Gli esteri metilici degli acidi grassi, componenti del biodiesel di origine vegetale, possono anche essere prodotti attraverso la transesterificazione dei trigliceridi estratti dalla biomassa larvale di *H. illucens*. (Kaczor et al., 2022)

Il frass degli insetti, a cui mi sono riferito con il termine "compost" precedentemente, viene definito dal Regolamento (UE) 2021/1995 della Commissione del 5 novembre 2021 come *«una miscela di escrementi derivati da insetti d'allevamento, substrato alimentare, parti di insetti d'allevamento e uova morte, con un contenuto di insetti d'allevamento morti non superiore al 5 % in volume e non superiore al 3 % in peso.»*(Commissione Europea, 2021)

Essendo che le leggi in vigore riguardo alla gestione delle mandrie, l'accesso ai fertilizzanti come il letame di bovino è sempre più arduo nell'Unione Europea.

Secondo le leggi in vigore, il frass di insetti può essere venduto dopo essere stato sottoposto ad un riscaldamento a 70°C per un'ora, un requisito che corrisponde anche ai requisiti per il letame trattato.(Kaczor et al., 2022)

Capitolo 3

METODOLOGIA E RACCOLTA DATI: ANALISI DEL CASO STUDIO

3.1 Procedura di Raccolta Dati e Contesto Aziendale

Questo lavoro di tesi si è svolto grazie alla collaborazione con Nutrinsect, un'azienda specializzata nell'allevamento e nella lavorazione del grillo domestico *Acheta Domesticus* per applicazioni nel settore del pet-food, dei prodotti alimentari e dell'agricoltura, che ha permesso di raccogliere e analizzare i dati che possono gettare la base di un confronto con altre realtà del settore degli insetti nell'industria alimentare. La Nutrinsect è stata fondata nel 2016 ed ha aperto il suo primo impianto a Montecassiano, quello a cui ci si riferisce in questo caso studio.

Le aree dell'impianto includono aree per la lavorazione, l'allevamento, il magazzino e gli uffici, tutti rientranti nei confini del sistema e dei dati che verranno discussi in seguito. È fondamentale sottolineare che il consumo di energia si basa esclusivamente sull'energia elettrica e non su altre fonti di energia, che non vengono utilizzate da tale azienda per l'allevamento.

L'area di allevamento è divisa in numerose celle climatizzate dove la temperatura e l'umidità sono regolate in base alle fasi diverse del ciclo vitale del grillo.

Nell'area di lavorazione, invece vi sono tutti i macchinari per la produzione dei prodotti destinati sia al Pet Food che al settore alimentare.

Per poter vedere da vicino quella che era la struttura e valutare quelli che potevano essere gli aspetti di maggiore interesse per effettuare l'analisi LCA sono state svolte delle visite dedicate. Per scelte aziendali, dovute principalmente all'impiego di metodologie innovative e brevettate dalla Nutrinsect stessa, non è stato possibile descrivere nel dettaglio quella che è l'Area dell'allevamento.

Grazie alla disponibilità dell'azienda è stato possibile definire gli input principali da considerare nell'analisi LCA:

- Consumi energetici
- Consumi idrici
- Impiego del substrato di crescita (mangime)

- Cartoni per le uova

3.1.1 *Analisi dei consumi elettrici*

L'analisi del consumo elettrico è stata svolta tramite la raccolta di bollette per i consumi elettrici. I consumi comprendono anche quelli che sono gli uffici, ma i consumi principali sono dati dall'allevamento, come spiegato in precedenza, e dai macchinari presenti in area di lavorazione e nel magazzino che comprende una cella frigorifera per conservare i grilli. La prima variabile è data dall'aumento delle temperature nei mesi più caldi, dove la cella frigorifero presenterà delle spese energetiche maggiori rispetto a quelle invernali.

La seconda variabile è quella dell'utilizzo dei macchinari stessi, infatti la Nutrinsect non utilizza con la stessa frequenza l'apparecchiatura, ma con una variabilità dovuta alle richieste che riceve l'azienda. Mesi in cui vi è una forte richiesta nel settore del pet-food, implicherà un maggiore utilizzo dei forni a microonde industriali, non utilizzati per il settore alimentare, in cui i macchinari utilizzati (in ordine) sono i seguenti:

- Celle frigorifere: utilizzate per rallentare il metabolismo basale dei grilli.
- Abbattitore industriale
- Bollitore elettrico industriale

Al fine di stimare il consumo energetico annuo, sono state acquisite e analizzate diverse bollette relative a differenti periodi dell'anno. Tale analisi ha permesso di determinare un consumo medio annuo di 108.000 kWh.

3.1.2 *Analisi dei consumi idrici*

La stima dei consumi idrici è stata effettuata sulla base della bolletta della fornitura idrica, con riferimento al consumo medio annuo del 2023 pari a 302 m³.

Il dato deriva da diverse fonti, dall'acqua impiegata nell'allevamento, poiché il grillo si ciba di un mangime secco a base di cereali, per tanto si abbevera separatamente.

Inoltre, il substrato per la deposizione delle uova viene umidificato sempre con l'utilizzo di acqua.

I consumi non si limitano solo all'allevamento, in quanto la pulizia dei residui più ostinati dei contenitori per la crescita dei grilli stessi è obbligatoriamente svolta con l'utilizzo di idropulitrici. Ai consumi complessivi si aggiungono quelli derivanti dagli uffici, con particolare riferimento ai servizi igienici.

3.1.3 Analisi dell'utilizzo di mangime

I dati relativi al consumo di mangime sono stati ottenuti dalle fatture di acquisto e verificati mediante la stima del feed conversion ratio (FCR), risultante pari a circa 1,4. Tale valore si riferisce al quantitativo di mangime necessario per produrre 1 kg di insetto, considerando una produzione media annua di 16.000 kg. L'analisi del FCR ha permesso di determinare il quantitativo di mangime annuo consumato, pari a 22.000 kg. La bassa FCR è giustificata dalla specifica formulazione del mangime, ottimizzata per *Acheta domesticus* e brevettata dall'azienda.

3.1.4 Analisi dell'utilizzo di materiali a vita breve

Come già emerso dalla letteratura esistente, i principali materiali a vita breve impiegati nell'allevamento di grilli sono i cosiddetti "Egg crate", ovvero cartoni per le uova che fungono da divisori all'interno dei quali i grilli si arrampicano durante la fase di allevamento, consentendo una ottimizzazione dello spazio occupato. Il dato è stato estrapolato dalle fatture di acquisto, in particolare è stato preso in considerazione il peso in chilogrammi di carta dagli ordini effettuati in un anno, ed ammonta a 1.822kg.

È importante sottolineare che questi materiali non sono usa e getta, ma vengono riutilizzati per i diversi cicli di vita dei grilli fino a che non sono più in condizioni adeguate all'impiego. Per una consultazione riassuntiva di tutti i dati raccolti e analizzati, si veda la *Tabella 3-1-4*.

Tabella 1: Tabella con gli input raccolti per condurre l'analisi LCA

Input	Valore (annuo)	Unità di misura
<i>Consumi elettrici</i>	108.000	kWh
<i>Consumi idrici</i>	302	m ³
<i>Mangime</i>	6.150	kg
<i>Materiali a vita breve</i>	1822	kg

3.2 Scelta dell'Unità Funzionale

Oltre agli input è stato fornito un valore molto importante ai fini dell'analisi LCA, la produzione media in kg di grilli vivi, riportata in *Tabella 3-2*.

Tabella 2: Produzione media in kg di grilli vivi ed essiccati

PRODUZIONE GRILLI VIVI (kg)		ESSICCATI (kg)
Meda giornaliera	50	13,8
Media mensile	1.400	388,8
Media annuale	16.000	4.444,4

L'analisi dei dati forniti ha permesso di evidenziare un aspetto importante: il contenuto in acqua del grillo, pari al 72% del peso corporeo totale. Un altro dato significativo è la produzione di compost, denominato anche "frass", che si ottiene in rapporto 1:1 con la produzione di grilli (16.000 kg/anno). La scelta dell'unità funzionale (FU) è stata inoltre influenzata dall'analisi dei macronutrienti del grillo essiccato, riportato in *Tabella 3-2-1*.

Tabella 3: Analisi dei macronutrienti dei grilli essiccati

ANALITA/PARAMETRO	RISULTATO (g / 100 g)
Carboidrati	12,84
Lipidi	16,99
Proteine	58,71

Il contenuto proteico si è rivelato particolarmente significativo, pari a 58,71 g per 100 g di massa secca. Sulla base di tale valore, l'unità funzionale scelta per l'analisi è stata fissata a 1 kg di proteine di insetto.

3.3 Il software utilizzato nell'analisi LCA

Per raggiungere l'obiettivo di questa tesi, è stato impiegato un software chiamato SimaPro e sviluppato dalla PRè (Product Ecology Consultants - NL) per conto del Ministero dell'Ambiente olandese. Questo software è uno degli strumenti più utilizzati e più affidabili per condurre una valutazione dell'impatto ambientale e l'analisi del ciclo di vita. La vasta gamma di database inclusa nel software SimaPro è una sua caratteristica distintiva che ha permesso la riuscita del caso studio. Il database Ecoinvent è forse il più completo per quanto riguarda l'area europea.

Questo database fornisce un'esaustiva fonte di dati riguardo i trasporti, materiali da costruzione, prodotti chimici, energia e molti altri aspetti.

Un altro database che ha rappresentato un elemento chiave per il caso studio è stato Agri-footprint, nel quale sono presenti molteplici dati su mangimi e materiali strettamente legati al settore agricolo.

SimaPro si distingue anche per la sua flessibilità. Infatti, gli utenti possono facilmente adattare e modificare i processi e i materiali nel database e se necessario, possono anche creare nuovi processi, consentendo di espandere i confini del sistema e integrare informazioni aggiuntive, garantendo la completezza e l'accuratezza delle analisi condotte, anche dove vi è la mancanza di alcuni dati.

Quest'ultimo aspetto è stato molto utile là dove era necessario andare a sopperire ad alcune mancanze di dati, prima fra tutti la formulazione del mangime.

Riassumendo, questo software, insieme gli strumenti ad esso annessi, hanno permesso la condotta dell'analisi sull'impatto teorico che i dati illustrati nei sottocapitoli precedenti hanno avuto sull'ambiente.

3.4 Life cycle impact assessment

È stato selezionato come metodo l'International Reference Life Cycle Data System (ILCD), lo stesso utilizzato da un altro articolo che trattava un allevamento thailandese di *Acheta Domesticus* (Halloran et al., 2017). Il motivo alla base di questa scelta è quello di creare una base per il confronto tra questo caso studio e altre realtà globali che trovate tra le varie ricerche in letteratura. Tra le molteplici categorie di impatto, sono state selezionate le seguenti: Il cambiamento climatico (potenziale riscaldamento globale), la tossicità per l'uomo, il potenziale di acidificazione ed il consumo delle risorse idriche e minerali e rinnovabili.

Il metodo ILCD offre dei fattori di caratterizzazione che servono a trasformare gli input, quali emissioni e consumo di risorse, in quelli che sono i potenziali impatti ambientali.

Una formula permette di calcolare il potenziale impatto per ciascuna delle categorie che sono state prese in considerazione: $IP(j) = \sum_{i=1}^n CF_i e_i$ dove CF_i è il fattore di caratterizzazione, "i" la sostanza ed "e_i" le emissioni di tale sostanza. (Halloran et al., 2017)

3.4.1 Cambiamento climatico

I risultati che sono stati ottenuti vengono misurati in kg di CO₂ equivalente per 1 kg di grillo vivo.

Il CO₂ equivalente viene ottenuto convertendo le quantità dei vari gas nella quantità equivalente di biossido di carbonio in relazione allo stesso potenziale di riscaldamento globale.

Il risultato è di $4.1 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$, che con i dati raccolti precedentemente per kg di proteine di insetto si converte in $24.93 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$.

Tale dato viene ottenuto tracciando quelle che sono le cause di produzione della CO_2 , principalmente correlate al mangime e ai consumi elettrici; in particolare questi ultimi rappresentato il 62% della contribuzione di questi impatti. (come riportato in *Figura 3-4-1*).

Nello scenario ipotetico, in cui si escludessero i consumi di energia elettrica attribuiti all'aerea di trasformazione, con un 10% dei consumi elettrici totali, si avrebbe un impatto di $11,01 \text{ kg CO}_2\text{eq}$ per 1 kg di proteine.

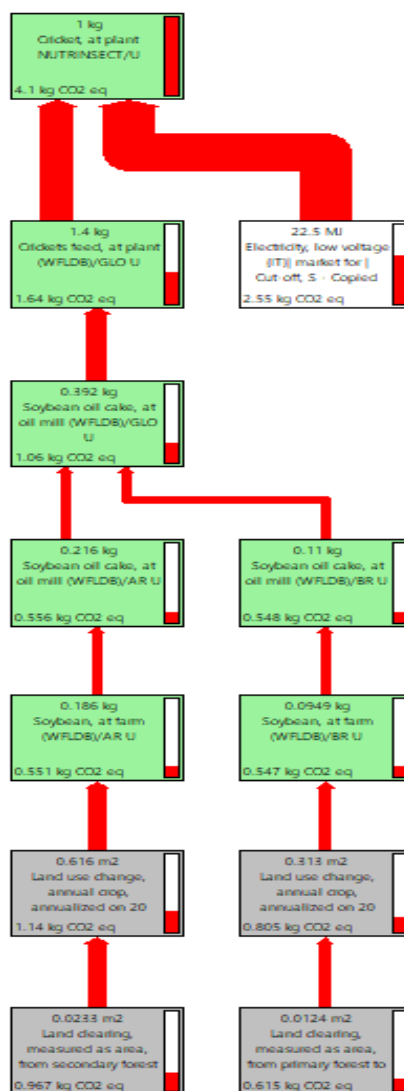


Figura 4: Cambiamento climatico

3.4.2 Cancerogenicità per l'uomo

Il risultato è espresso in unità tossiche comparative (CTUh) ottenuto dall'aumento stimato della mortalità, per effetti cancerogeni, della popolazione umana totale per unità di massa di una sostanza chimica prodotta.

Come per l'impatto ambientale, anche in questo caso il dato ottenuto è su kg di insetto ed ammonta a $7,97E-10$ CTUh. Il dato si converte a $48,4E-10$ CTUh per kg di proteine.

Il risultato e le sue cause sono riportati in *Figura 3-4-2*.

Nell'ipotetico caso in cui si considerassero solo i consumi elettrici dell'area di allevamento il dato ammonterebbe a $4,27E-9$ CTUh per 1 kg di proteine.

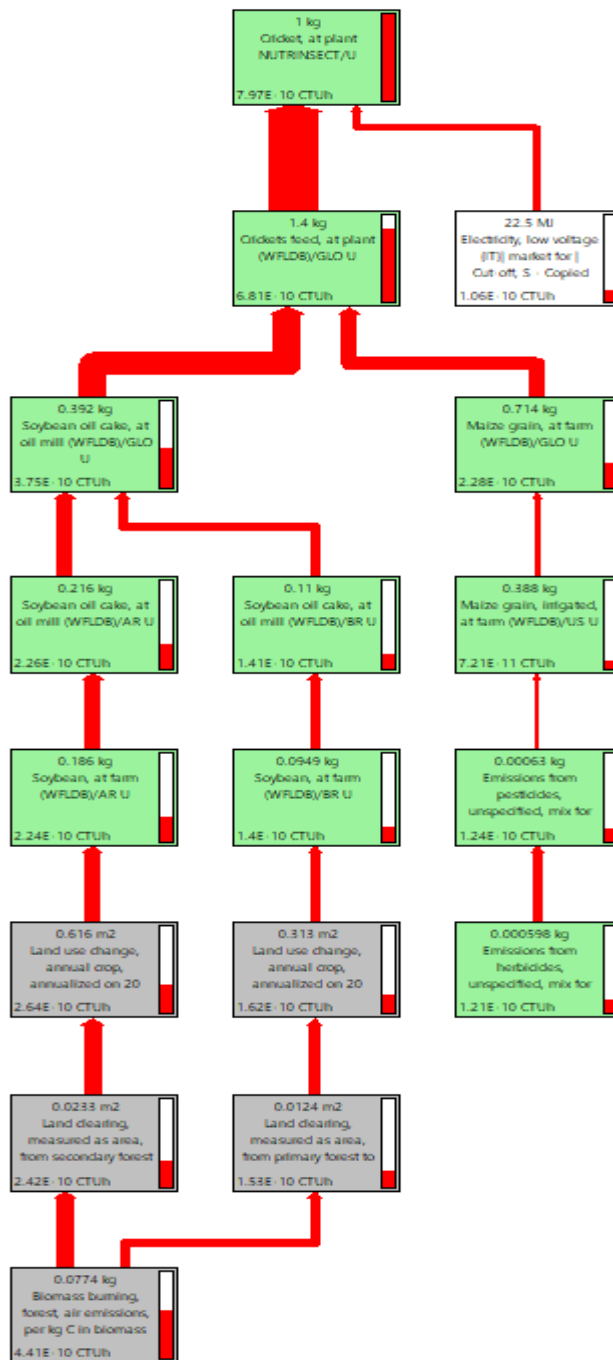


Figura 5: Cancerogenicità per l'uomo

3.4.3 Acidificazione

Il potenziale di acidificazione è una misura di tutte le emissioni che hanno effetti acidificanti sull'ambiente. L'unità di misura, riferita al metodo ILCD, sono le moli di equivalenti di idrogeno. Esprime la quantità in moli di una sostanza acida in base alla sua capacità di donare cationi idrogeno, senza tenere conto di una molecola acida specifica.

Dai calcoli del software sono emersi $0,07 \text{ mol H+ eq}$ ogni kg di grillo, che per kg di proteine ammonta a $0,44 \text{ mol H+ eq}$.

Queste emissioni, oltre che dai grilli stessi, trovano origine principalmente dal consumo elettrico con un contributo del 15%, come si evince in *Figura 3-4-3*.

Nel caso ipotetico in cui si togliessero i consumi elettrici esterni alla produzione primaria, verrebbe stimato un valore di $0,38 \text{ mol H+ eq}$.

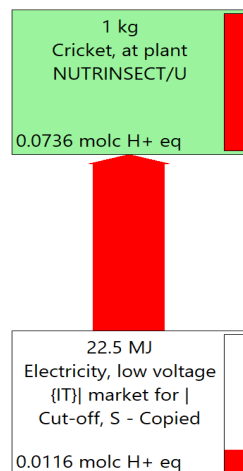


Figura 6: Acidificazione

3.4.4 Consumo risorse idriche

Il consumo di risorse idriche è espresso in m^3 di acqua equivalenti ed è stato ottenuto un risultato, per kg di grillo, di $0,05 \text{ m}^3 \text{ water eq}$. Valore che, per kg di proteine, ammonta a $0,34 \text{ m}^3$.

Come ci si poteva aspettare il consumo di acqua è dato principalmente dalla produzione del mangime con un contributo del 47% e dall'utilizzo di energia elettrica al quale il software ha attribuito il 48% degli impatti; in minor parte è dovuto dall'acqua di rubinetto.

Nel caso in cui si considerasse solo l'area di allevamento si avrebbe un risultato di $0,19 \text{ m}^3$ d'acqua per 1 kg di proteine.

La *Figura 3-4-4* mostra i principali fattori che contribuiscono al consumo delle risorse idriche.

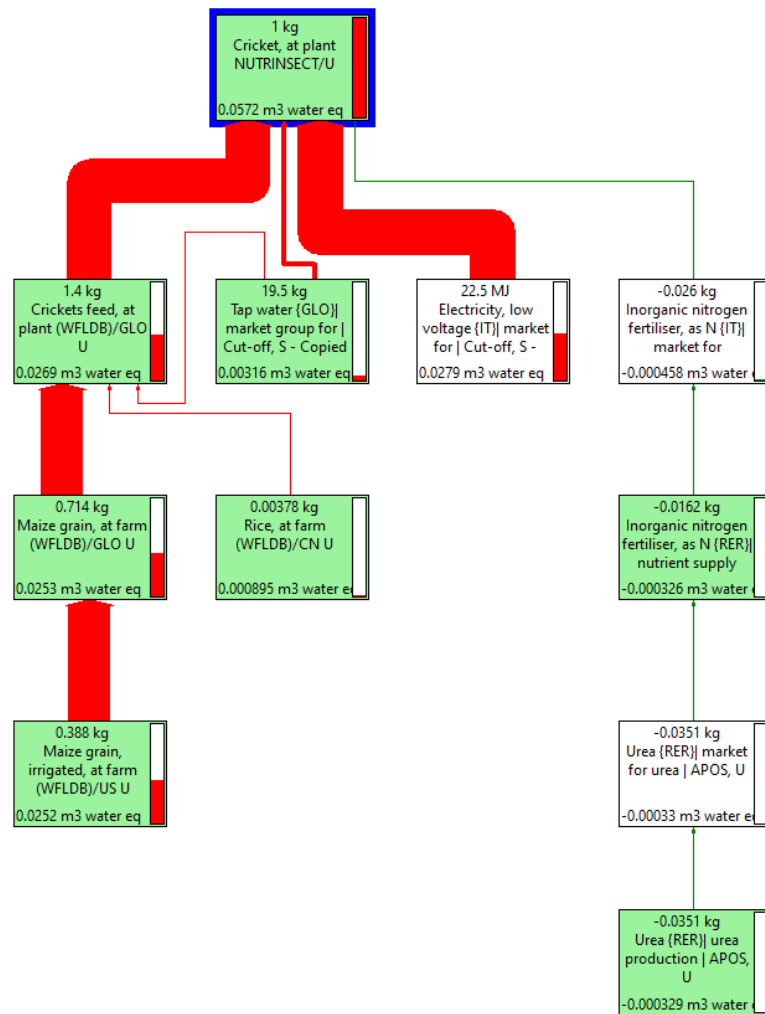


Figura 7: Consumo di risorse idriche

3.4.5 Consumo risorse rinnovabili

L'unità di misura utilizzata sono i kg di antimonio equivalente, e serve a misurare l'impatto che ha una sostanza sull'esaurimento delle risorse rinnovabili. Di conseguenza, un materiale che richiede l'estrazione di una grande quantità di risorse preziose avrà un valore di "kg Sb eq" più alto rispetto a un materiale che utilizza risorse più comuni.

È stato riscontrato un valore di $2,13 \cdot 10^{-4}$ kg Sb eq per chilogrammo di grillo, che ammonta a $1,29 \cdot 10^{-3}$ kg Sb eq per chilogrammo di proteine.

La principale causa di questo dato è il mangime con un contributo del 75% sul totale, come si può evincere dal grafico riportato in Figura 3-4-5.

Nel caso ipotetico in cui si considerasse solo la produzione primaria, il dato ammonterebbe a $1,05 \cdot 10^{-3}$ kg Sb eq per chilogrammo di proteine.

L'insieme dei risultati dell'analisi LCA viene raccolta nella *Tabella 3-4-5*.

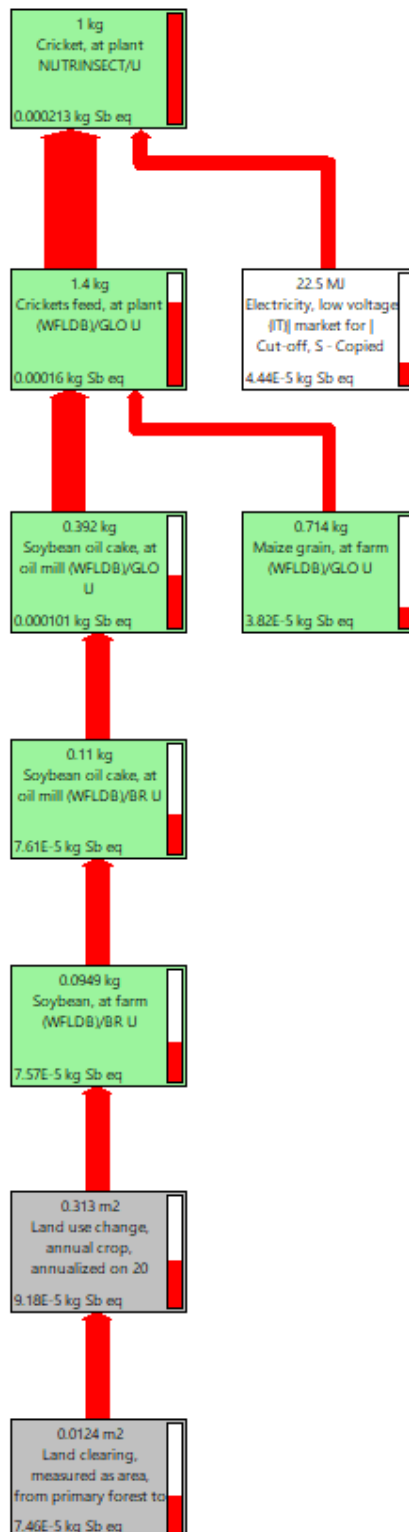


Figura 8: consumo di risorse rinnovabili

Tabella 4: Risultati dell'analisi LCA espressi per kg di grilli tal quali e per kg di proteine

CATEGORIA DI IMPATTO	per kg di grilli	kg di proteine
Cambiamento climatico	<i>4,1 kg CO₂-eq</i>	<i>24,93 kg CO₂-eq</i>
Tossicità per l'uomo	<i>7,97E-10 CTUh</i>	<i>48,4E-10 CTUh</i>
Potenziale di acidificazione	<i>0,07 mol H⁺ eq</i>	<i>0,44 mol H⁺ eq</i>
Consumo di risorse idriche	<i>0,05 m³</i>	<i>0,34 m³</i>
Consumo di risorse rinnovabili	<i>2,13 E-4 kg Sb eq</i>	<i>1,29 E-3 kg Sb eq</i>

Capitolo 4

CONFRONTO CON LA LETTERATURA SCIENTIFICA

4.1 Introduzione all'analisi comparativa

In questo capitolo, i dati relativi agli impatti ottenuti nel caso studio saranno confrontati con quelli di altri allevamenti di insetti e con quelli di altri alimenti.

In buona parte degli articoli reperibili in letteratura, gli insetti vengono visti come sostituto proteico più ecosostenibile ai convenzionali alimenti e di conseguenza vengono confrontati con altri alimenti.

È quindi raro trovare confronti sugli impatti ambientali tra le diverse specie di insetti edibili. Pertanto, i dati raccolti dalle varie fonti, inclusi articoli e review, saranno aggregati e confrontati con il caso di studio discusso in precedenza.

Come evidenziato precedentemente, il confronto è stato fondato su un articolo scientifico che ha valutato l'impatto ambientale dell'allevamento di grilli nel nord-est della Thailandia. Tale studio ha impiegato il metodo ILCD, che è stato adottato anche nel presente caso studio. Tuttavia, si è riscontrato un problema significativo: gli altri studi disponibili sull'impatto ambientale delle specie di insetti edibili hanno utilizzato metodologie diverse, ciascuna riportando categorie di impatto a volte non corrispondenti a quelle nel metodo ILCD.

Questo ha portato a due possibili vie per procedere: utilizzare una tabella di conversione per adattare i dati delle altre metodologie al metodo ILCD, o rielaborare i dati del caso studio usando altri metodi di Life Cycle Assessment.

L'opzione di utilizzare una tabella di conversione ha presentato numerose problematiche. Le conversioni disponibili non erano sufficientemente precise; inoltre, le tabelle esistenti non coprivano tutti i fattori necessari, e spesso i fattori di conversione esistenti mostravano una bassa correlazione con le categorie di impatto considerate nel metodo ILCD. Questo avrebbe potuto introdurre significative incertezze e potenziali distorsioni nei risultati comparativi.

Di conseguenza, l'adozione di altri metodi LCA per ricavare i dati del caso studio è risultata essere l'approccio più affidabile e scientificamente valido. Questa strategia ha permesso di confrontare in modo più coerente e completo i diversi impatti ambientali riportati nella

letteratura, minimizzando le discrepanze metodologiche e migliorando la qualità del confronto.

Inoltre, i dati provenienti dalla letteratura sono stati selezionati e normalizzati rispetto alla stessa unità funzionale, ossia 1 kg di proteine di insetto. Quando i dati non erano originariamente espressi in questa unità, sono stati opportunamente convertiti per garantire il confronto.

4.2 Efficienza e formulazione dei mangimi per gli insetti

Nell'articolo preso come riferimento, veniva svolta una ricerca condotta nel nord-est della Thailandia, su un allevamento di grilli di media scala di 2720 m² situato nel villaggio di Nacheung. Veniva messo a confronto l'allevamento di grilli (*Acheta Domesticus* e *Gryllus Bimaculatus*) con l'allevamento di polli da carne, scelti come punto di riferimento poiché entrambi alimenti di origine animale e fonti di proteine in molte regioni a basso e medio reddito del mondo. Lo studio ha coperto energia, trasporti e il processo produttivo del mangime. Tuttavia, a differenza del nostro caso studio, i confini del sistema si sono limitati alla produzione al cancello della fattoria, escludendo la trasformazione e la distribuzione al dettaglio.

Poiché il mangime per grilli è molto simile a quello utilizzato per i polli da carne, la sua composizione è stata stimata basandosi su diete industriali tipiche per polli e sugli ingredienti elencati sulle confezioni dei mangimi. I componenti principali del mangime includevano farina a base di pesce, farina di soia, mais in granello, olio di palma, carbonato di calcio e sale. L'FCR è stato calcolato per entrambe le specie, con risultante il valore 2.50. (Halloran et al., 2017)

Un contributo significativo al confronto è offerto da uno studio che analizza l'LCA delle tarme della farina (*Tenebrio molitor*) basato su dati raccolti da una piccola azienda di produzione biologica situata nel sud dell'Austria.

Situato a circa 1.000 metri sul livello del mare, questo sito fornisce una descrizione approfondita delle pratiche sostenibili implementate nella produzione di insetti edibili. In particolare, lo studio ha permesso di calcolare un Feed Conversion Ratio di 3,61 escludendo l'apporto delle carote nel mangime.

La composizione del mangime è costituita da crusca di frumento (70%), mais (12%), lievito di birra (10%) ed erba medica (8%), tutti provenienti da coltivazione biologica. Questo substrato secco è integrato da carote biologiche, utilizzate come unica fonte per idratare gli insetti insieme all'umidità ambientale. Analogamente al nostro studio, l'origine precisa degli

ingredienti del mangime non è risultata completamente rintracciabile. Di conseguenza, si è ipotizzato che provenissero dall'Austria.(Dreyer et al., 2021b)

In una revisione della letteratura su vari studi sugli impatti ambientali di *Hermetia illucens*, sono stati identificati e categorizzati sei diversi scenari. Gli scenari 1 e 2 erano associati a mangimi convenzionali, mentre gli scenari 3 e 4 riguardavano diete formulate con sottoprodotti dell'industria alimentare. Gli scenari 5 e 6, invece, coinvolgevano l'utilizzo di diete basate su rifiuti alimentari.

Gli effetti del mangime sulle prestazioni del sistema sono stati inclusi nell'analisi tramite l'utilizzo di fattori specifici del mangime. Una minore efficienza nella conversione del mangime ha impatti negativi sull'ambiente in vari modi. In primo luogo, una minore conversione del mangime significa che è necessario utilizzarne un maggiore quantitativo per ottenere la stessa quantità di insetti in output. Ciò non influisce direttamente sull'impatto degli ingredienti nelle diete a base di rifiuti, poiché si assume che questi entrino nel sistema senza causare ulteriori impatti ambientali. In secondo luogo, l'uso di ingredienti del mangime di qualità inferiore comporta tempi di sviluppo larvale più lunghi, aumentando così il consumo di energia durante la fase di allevamento. Infine, la composizione finale della biomassa larvale risulta generalmente meno favorevole quando si utilizzano mangimi di qualità inferiore, con risultante un maggiore contenuto di acqua e un minore contenuto proteico. Un altro effetto dell'efficienza del mangime è che, in parte, può bilanciare gli impatti ambientali aumentati. Gli scenari basati sui rifiuti producono una maggiore quantità di biomassa residua (frass) in output, riducendo così parzialmente l'impatto totale. Questo è particolarmente evidente nello scenario basato sul letame avicolo. Tuttavia, lo scenario di alimentazione del pollame ha impatti così elevati dagli ingredienti del mangime che anche un sistema altamente efficiente non può compensarli.(Spykman et al., 2021)

Uno studio particolarmente significativo ha esaminato l'utilizzo sostenibile di *Hermetia illucens* per la produzione di alimenti e mangimi, con un LCA che confrontava altre fonti proteiche alimentari. In questo studio, la dieta di *H. illucens* comprendeva sottoprodotti dell'industria alimentare, provenienti principalmente dalla distillazione dell'alcol e dalla birrificazione. Questi sottoprodotti, comunemente disponibili in commercio come mangimi per animali, sono stati utilizzati come fonte di nutrimento per gli insetti.

Il sistema analizzato si è basato su un approccio "dalla culla al cancello", comprendendo la produzione delle materie prime, il ciclo di vita di *Hermetia illucens* e la trasformazione dei

prodotti derivati in fertilizzante organico, in prodotto fresco e in concentrato proteico (farina). Per garantire un confronto più equo, sono stati selezionati i dati relativi all'Analisi del Ciclo di Vita del prodotto fresco. L'unità funzionale è stata convertita utilizzando i dati relativi al contenuto proteico.(Smetana et al., 2019)

4.3 Analisi comparativa degli impatti ambientali

Oltre alle sfide derivanti dall'uso di metodologie LCA eterogenee, un'ulteriore complessità nella conduzione dell'analisi comparativa risiede nella variabilità delle categorie di impatti ambientali considerate. In letteratura, infatti, esistono diversità significative nelle categorie di impatto adottate tra i diversi studi, rendendo difficile una comparazione diretta. Alcuni studi non contengono specifiche categorie di impatto o ne utilizzano di diverse rispetto a quelle esaminate nel caso studio. Pertanto, si noterà che per alcune categorie di impatto, i dati di certi studi risultano assenti, mentre per altre categorie saranno disponibili, creando così una disomogeneità nei dati raccolti.

4.3.1 Cambiamento climatico a confronto

Il caso studio di Nutrinsect evidenzia un'impronta carbonica di 24,93 kg CO₂ eq per kg di proteine, un valore nettamente superiore rispetto a quello rilevato per l'allevamento thailandese, che si attesta a 4,35 kg CO₂ eq per kg di proteine (Halloran et al., 2017). Questo divario è attribuibile al consumo energetico elevato dovuto all'uso di macchinari per la trasformazione e la lavorazione di prodotti a base di *Acheta domesticus*. Per entrambe le analisi è stato impiegato il metodo ILCD.

Diverso è il caso dell'allevamento di *Tenebrio molitor* in Austria, che presenta un impatto di 20,4 kg CO₂ eq per kg di proteine, un valore più vicino a quello di Nutrinsect. L'elevata impronta carbonica, nonostante il sistema sia limitato all'allevamento, è dovuta alla differente specie di insetto e alla conseguente diversa formulazione del mangime, caratterizzata da un indice di conversione degli alimenti (FCR) significativamente più alto rispetto a quello di *Acheta domesticus*.

Nella review riguardante vari casi di studio su *Hermetia illucens* (Spykman et al., 2021), i valori dell'impronta carbonica variano da 11,89 kg CO₂ eq per kg di proteine fino a 24,19 kg, valore quest'ultimo molto vicino a quello registrato per Nutrinsect. In particolare, in questo scenario (S2), in cui l'impatto è paragonabile a quello di Nutrinsect, il mangime impiegato è analogo a quello utilizzato per il pollame, simile alla formulazione adottata nel nostro studio.

Gli altri scenari, con i relativi impatti e tipologie di mangime, sono dettagliatamente riportati nella Tabella 4-3-1.

Un altro studio su *Hermetia illucens* riporta dati riguardanti l'uso di mangimi a base di sottoprodotti della birrificazione e della distillazione di alcolici, registrando un'impronta carbonica di 9,5 kg CO₂ eq per kg di proteine di insetto (Smetana et al., 2019). Analogamente a quanto osservato nella review, tale valore è giustificato dalla riduzione del consumo energetico grazie al confinamento del sistema “dalla culla al cancello” e dall'utilizzo di sottoprodotti, il cui impatto è considerato minimo poiché si presuppone che essi entrino nel sistema senza ulteriori contributi all'impatto ambientale.

Tabella 5: Lista dei valori di riscaldamento globale espressi in kg CO₂ per ogni kg di proteine derivanti dagli insetti.

Unità di misura	Valore rispetto alla FU	Tipologia di specie	Tipologia di mangime	Metodo LCA	Fonte
<i>kg CO₂ eq</i>	24,93	<i>Acheta domesticus</i>	<i>Formulazione specifica</i>	<i>ILCD</i>	<i>Nutrinsect</i>
<i>kg CO₂ eq</i>	4,35	<i>Acheta domesticus</i>	<i>Mangime per pollame</i>	<i>ILCD</i>	(Halloran et al., 2017)
<i>kg CO₂ eq</i>	20,4	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Mangime con ingredienti organici e carote</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Dreyer et al., 2021b)
<i>kg CO₂ eq</i>	11,89	<i>Hermetia illucens (S1)</i>	<i>Mangime formulato per Hermetia illucens</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)
<i>kg CO₂ eq</i>	24,19	<i>Hermetia illucens (S2)</i>	<i>Mangime per pollame</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)
<i>kg CO₂ eq</i>	18	<i>Hermetia illucens (S3)</i>	<i>Sottoprodotti della distillazione</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)

<i>kg CO₂ eq</i>	<i>12,18</i>	<i>Hermetia illucens (S4)</i>	<i>Semola di grano duro</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)
<i>kg CO₂ eq</i>	<i>15,09</i>	<i>Hermetia illucens (S5)</i>	<i>Scarti vegetali</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)
<i>kg CO₂ eq</i>	<i>13,97</i>	<i>Hermetia illucens (S6)</i>	<i>Letame avicolo</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)
<i>kg CO₂ eq</i>	<i>9,5</i>	<i>Hermetia illucens</i>	<i>Sottoprodotti della distillazione e birrificazione</i>	<i>ReCiPe midpoint (E)</i>	(Smetana et al., 2019)

4.3.2 Cancerogenicità umana a confronto

Nella Tabella 4-3-2 sono riportati i dati relativi a Nutrinsect, che ammontano a 48,4 E-10 CtUh per kg di proteine, e al caso thailandese (Halloran et al., 2017), che risultano essere pari a 1,7 E-7 CtUh per kg di proteine. Entrambi i casi hanno in comune il metodo di riferimento ILCD.

Al contrario l'articolo su *Hermetia Illucens* (Smetana et al., 2019) utilizza il metodo ReCiPe midpoint (E), per cui il dato di 0,17 kg C₂H₃Cl per kg di proteine non è confrontabile con i dati degli altri due casi.

Tabella 6: Lista dei valori di cancerogenicità per l'uomo derivante dagli insetti

Unità di misura	Valore rispetto alla FU	Tipologia di specie	Tipologia di mangime	Metodo LCA	Fonte
<i>CtUh</i>	<i>48,4 E-10</i>	<i>Acheta domesticus</i>	<i>Formulazione specifica</i>	<i>ILCD</i>	<i>Nutrinsect</i>
<i>CtUh</i>	<i>1,7 E-7</i>	<i>Acheta domesticus</i>	<i>Mangime per pollame</i>	<i>ILCD</i>	(Halloran et al., 2017)

<i>kg C₂H₃Cl eq.</i>	<i>1,7 E-1</i>	<i>Hermetia illucens</i>	<i>Sottoprodotti della distillazione e birrificazione</i>	<i>ReCiPe midpoint (E)</i>	<i>(Smetana et al., 2019)</i>
--	----------------	--------------------------	---	----------------------------	-------------------------------

4.3.3 Potenziali di acidificazione a confronto

Nel caso di Nutrinsect, è stato utilizzato il metodo ReCiPe midpoint (H), che ha portato a un risultato di 293 g SO₂ eq per kg di proteine. Questo valore risulta significativamente più elevato rispetto agli altri casi presentati in Tabella 4-3-4, un risultato attribuibile al maggiore consumo di elettricità registrato nel caso studio.

Tabella 7: Lista dei valori dei potenziali di acidificazione derivanti dagli insetti

Unità di misura	Valore rispetto alla FU	Tipologia di specie	Tipologia di mangime	Metodo LCA	Fonte
<i>g SO₂ eq</i>	<i>293</i>	<i>Acheta domesticus</i>	<i>Formulazione specifica</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	<i>Nutrinsect</i>
<i>Mol H⁺ eq</i>	<i>0,14</i>	<i>Acheta domesticus</i>	<i>Mangime per pollame</i>	<i>ILCD</i>	<i>(Halloran et al., 2017)</i>
<i>g SO₂ eq</i>	<i>159,52</i>	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Mangime con ingredienti organici e carote</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	<i>(Dreyer et al., 2021b)</i>
<i>g SO₂ eq</i>	<i>38</i>	<i>Hermetia illucens</i>	<i>Sottoprodotti della distillazione e birrificazione</i>	<i>ReCiPe midpoint (E)</i>	<i>(Smetana et al., 2019)</i>

4.3.4 Consumo delle risorse idriche a confronto

La Nutrinsect presenta un consumo di risorse idriche pari a 0,347 m³ d'acqua per kg di proteine, valore dimezzato rispetto al caso thailandese.

Nella review sull'uso di *Hermetia illucens* come risorsa proteica (Spykman et al., 2021), gli scenari 5 (S5) e 6 (S6), che utilizzano rifiuti dell'industria alimentare come substrato di alimentazione, presentano valori negativi di impatto sul consumo di acqua dolce. In confronto, lo scenario 3 (S3), basato sui sottoprodotti della distillazione, raggiunge il valore massimo di 0,389 m³ di acqua per kg di proteine. Il consumo di acqua dolce risulta quindi fortemente influenzata dal tipo di substrato alimentare adottato.

Il valore più alto, riportato in Tabella 4-3-4, è quello dell'allevamento di *Hermetia illucens* (Smetana et al., 2019) con un valore di 0,005 m³ d'acqua per kg di proteine.

Tabella 8: Lista dei valori di consumo delle risorse idriche espressi in m³ water eq per 1 kg di proteine derivanti dagli insetti

Unità di misura	Valore rispetto alla FU	Tipologia di specie	Tipologia di mangime	Metodo LCA	Fonte
<i>m3 water eq</i>	0,347	<i>Acheta domesticus</i>	<i>Formulazione specifica</i>	<i>ILCD</i>	<i>Nutrinsect</i>
<i>m3 water eq</i>	0,71	<i>Acheta domesticus</i>	<i>Mangime per pollame</i>	<i>ILCD</i>	(Halloran et al., 2017)
<i>m3 water eq</i>	0,111	<i>Hermetia illucens (S1)</i>	<i>Mangime formulato per Hermetia illucens</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)
<i>m3 water eq</i>	0,330	<i>Hermetia illucens (S2)</i>	<i>Mangime per pollame</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)
<i>m3 water eq</i>	0,389	<i>Hermetia illucens (S3)</i>	<i>Sottoprodotti della distillazione</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)
<i>m3 water eq</i>	0,078	<i>Hermetia illucens (S4)</i>	<i>Semola di grano duro</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)

<i>m3 water eq</i>	-0,072	<i>Hermetia illucens (S5)</i>	<i>Scarti vegetali</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)
<i>m3 water eq</i>	-0,020	<i>Hermetia illucens (S6)</i>	<i>Letame avicolo</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)
<i>m3 water eq</i>	0,005	<i>Hermetia illucens</i>	<i>Sottoprodotti della distillazione e birrificazione</i>	<i>ReCiPe midpoint (E)</i>	(Smetana et al., 2019)

4.3.5 Occupazione di terreno a confronto

Tramite il metodo ReCiPe midpoint (H) è stato trovato un dato per Nutrinsect di 22 m²a per kg di proteine. Nell'allevamento del *Tenebrio molitor* in Austria, l'occupazione del suolo ha raggiunto un valore di 22,38 m²a per kg di proteine, nonostante parte del mangime derivasse da sottoprodotti dell'industria birraria. Questo elevato valore è principalmente attribuibile al rapporto di conversione alimentare elevato in questa casistica. Un'alta FCR implica infatti un consumo maggiore di mangime per unità di proteine prodotte, aumentando così la quantità di terreno agricolo necessario per coltivare le risorse alimentari impiegate (Dreyer et al., 2021b). La revisione degli impatti ambientali dell'allevamento di *Hermetia illucens* evidenzia che la tipologia di mangime utilizzato gioca un ruolo cruciale nell'occupazione del terreno. In particolare, scenari che impiegano mangimi specifici, come quello avicolo (S2), presentano un'occupazione di terreno annua significativamente elevata, pari a 17,77 m²a. Al contrario, scenari che integrano sottoprodotti dell'industria alimentare, come le feci avicole nello scenario 6 (S6), mostrano un impatto notevolmente ridotto, con valori di occupazione del suolo che possono risultare negativi (Spykman et al., 2021). È importante notare che, nonostante alcuni scenari mostrino un'efficienza superiore nell'uso del suolo, tali substrati non sono conformi alla normativa vigente per l'allevamento di insetti destinati al consumo umano. Pertanto, i dati presentati devono essere interpretati nel contesto delle limitazioni regolamentari. Tutti i dati e i risultati delle analisi sono riportati in Tabella 4-3-5.

Tabella 9: Lista dei dati sull'occupazione di terreno espressa in m²a per 1 kg di proteine derivanti dagli insetti

Unità di misura	Valore rispetto alla FU	Tipologia di specie	Tipologia di mangime	Metodo LCA	Fonte
<i>m²a</i>	22	<i>Acheta domesticus</i>	<i>Formulazione specifica</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	<i>Nutrinsect</i>
<i>m²a</i>	22,38	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Mangime con ingredienti organici e carote</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Dreyer et al., 2021b)
<i>m²a</i>	9,70	<i>Hermetia illucens (S1)</i>	<i>Mangime formulato per Hermetia illucens</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)
<i>m²a</i>	17,77	<i>Hermetia illucens (S2)</i>	<i>Mangime per pollame</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)
<i>m²a</i>	-0,13	<i>Hermetia illucens (S3)</i>	<i>Sottoprodotti della distillazione</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)
<i>m²a</i>	9,80	<i>Hermetia illucens (S4)</i>	<i>Semola di grano duro</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)
<i>m²a</i>	0,23	<i>Hermetia illucens (S5)</i>	<i>Scarti vegetali</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)
<i>m²a</i>	-1,28	<i>Hermetia illucens (S6)</i>	<i>Letame avicolo</i>	<i>ReCiPe midpoint (H)</i>	(Spykman et al., 2021)
<i>m²a</i>	3,37	<i>Hermetia illucens</i>	<i>Sottoprodotti della distillazione e birrificazione</i>	<i>ReCiPe midpoint (E)</i>	(Smetana et al., 2019)

4.4 Confronto con le fonti proteiche convenzionali

In questo sottocapitolo, si andrà a confrontare il caso studio con le fonti proteiche convenzionali, prendendo in considerazione tre principali categorie di impatto ambientale:

- Potenziale di riscaldamento globale
- Terreno occupato
- Impronta idrica

Tra i prodotti alimentari, noti per il loro contenuto proteico, sono stati selezionati la carne bovina, la carne di maiale, la carne di pollo, le uova ed infine la soia, principale fonte proteica del regno vegetale.

Per ottenere i dati per questo confronto, sono state utilizzate due revisioni di letteratura scientifica. Una ha fornito dati relativi al potenziale di riscaldamento globale e all'utilizzo del territorio. L'altra era incentrata sull'impronta idrica delle sopracitate fonti proteiche. È stata presa come unità funzionale 1 kg di proteine, allo stesso modo della precedente analisi comparativa.

4.4.1 Confronto del potenziale di riscaldamento globale

Dal grafico in *figura 4-4-1* è possibile notare che il nostro caso studio, caratterizzato da un valore di $24,93 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ per 1 kg di proteine, presenta dei valori intermedi e paragonabili a quelli delle uova che degli allevamenti avicoli. (Nijdam et al., 2012)

Tutta via se si considerasse lo scenario in cui i consumi elettrici fossero limitati al 10% del totale, ovvero esclusivamente quelli ipotetici dell'allevamento, il valore di $11,01 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ piazzerebbe il caso studio in seconda posizione dopo la soia.

Tra i valori più significativi troviamo quello della carne bovina, in parte dovuto alla produzione di metano da parte della fermentazione dei ruminanti, fattore non presente nei mono gastrici come il maiale, che si piazza al secondo posto.

Il valore più basso è quello della soia, il cui valore massimo raccolto raggiunge $6 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ per 1 kg di proteine. (Nijdam et al., 2012)

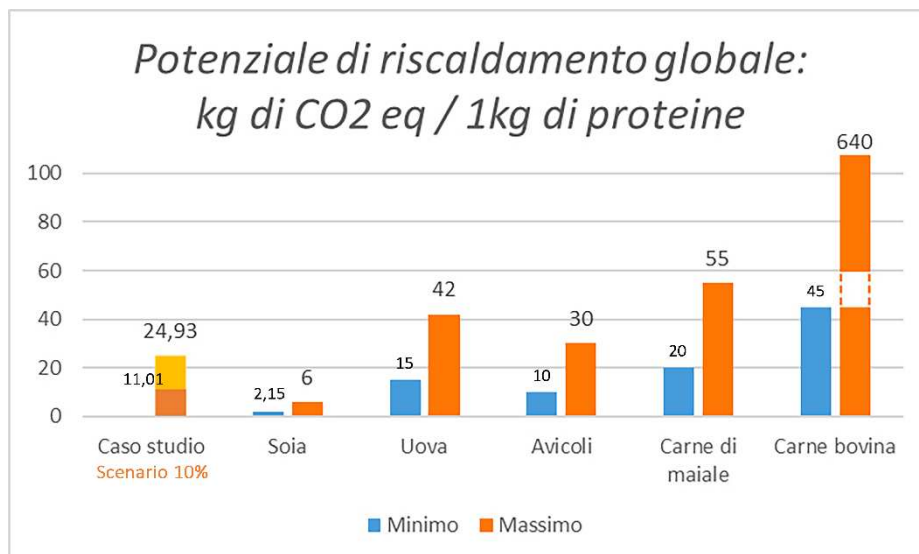


Figura 9: Grafico del confronto del potenziale di riscaldamento globale espresso in kg di CO2 eq per 1 kg di proteine

4.4.2 Confronto delle occupazioni di terreno

In *figura 4-4-2* sono riportati i dati riguardo l'occupazione del territorio, espressi in m^2 per 1 kg di proteine. Il caso studio è osservabile in seconda posizione secondo un orientamento crescente, con un risultato di $22 m^2$; valore maggiore rispetto alla soia, la cui estensione massima è di $25 m^2$ con una minima di $6m^2$.

Lo scenario che considera una riduzione del 90% nei consumi di energia elettrica mostra una superficie di occupazione di territorio pari a $21,55 m^2$, valore che rimane sostanzialmente invariato rispetto ai confini originari del caso studio. Il valore più significativo ancora una volta è quello della carne bovina con un minimo di $37 m^2$ e un massimo che raggiunge i $2100 m^2$.

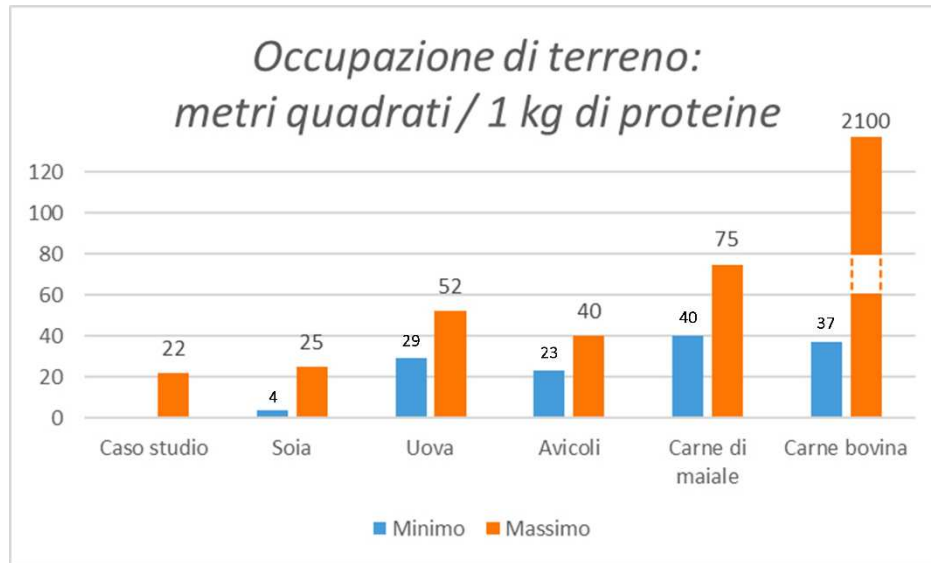


Figura 10: Grafico del confronto dell'occupazione di terreno espresso in metri quadri per 1 kg di proteine

4.4.3 Confronto delle impronte idriche

Un problema che si è presentato nel confronto delle impronte idriche dello studio con la letteratura è stata la selezione di un metodo LCA in comune. Nel caso studio è stato selezionato il metodo AWARE, il quale tiene in considerazione maggiormente la geolocalizzazione dei processi responsabili dell'impronta idrica. La review degli articoli presa in considerazione utilizzava un metodo differente (Hoekstra et al 2011), tendendo a sottostimare l'impronta idrica data dal mangime della Nutrinsect, in particolare per il Mais. Il metodo AWARE ha quindi permesso di ottenere una stima più precisa di tale dato.

Come si può notare in *figura 4-4-3*, il caso studio si colloca in seconda posizione in ordine crescente, preceduto dalla soia, che presenta una media mondiale di 5985 litri per 1 kg di proteine. Lo scenario con i consumi di energia elettrica confinati alla produzione primaria presenta invece un'impronta idrica di 19.950 litri, il 30% in meno rispetto al caso tradizionale.

Il valore più elevato si riscontra nella carne bovina, con un consumo di 112.000 litri per 1 kg di proteine (Mekonnen & Hoekstra, 2010). Le uova e gli avicoli mostrano valori comparabili a quelli del caso studio, con il pollame che raggiunge un consumo di 34.000 litri per chilogrammo di proteine. (Mekonnen & Hoekstra, 2010)

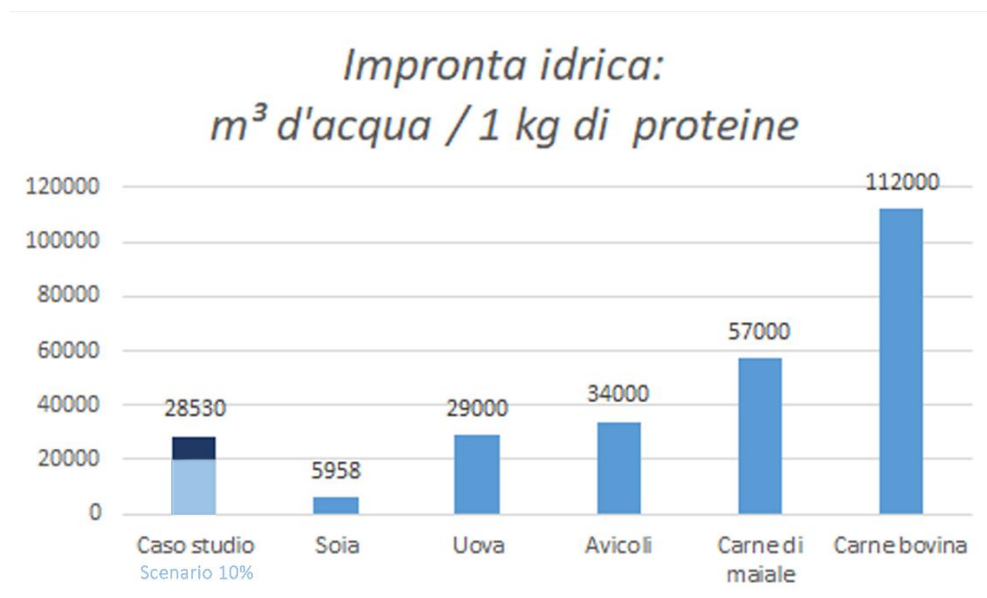


Figura 11: Grafico del confronto dell'impronta idrica espresso in litri per 1 kg di proteine

CONCLUSIONI

Dai risultati emersi dallo studio, l'allevamento di *Acheta domesticus*, ed in generale di tutti gli insetti, sembrerebbe essere una valida alternativa più sostenibile per l'ambiente a fonti proteiche come la carne bovina o di maiale. In particolare, *Acheta Domesticus*, grazie al suo elevato rapporto di conversione del mangime in massa corporea, rappresenta una delle soluzioni più adeguate nel mondo dell'entomofagia.

Nonostante lo studio avesse dei confini di sistema che comprendevano la lavorazione e la trasformazione della materia prima e quindi non fosse limitato "dalla culla al cancello" ha comunque avuto risultati paragonabili ad allevamenti di *Tenebrio molitor* ed *Hermetia illucens*.

Nello specifico la contribuzione del consumo di energia elettrica ha avuto l'impatto più significativo sul potenziale di cambiamento climatico, con un contributo del 62%.

Nella deplezione delle risorse idriche il contributo sull'impatto da parte del consumo di energia elettrica è stato notevole, con una contribuzione del 48%

Nello scenario ipotetico in cui si fosse considerato solo l'allevamento, con un consumo di energia elettrica del 10% del totale della struttura, il potenziale di cambiamento climatico sarebbe ammontato a 11,01 kg di CO₂ eq per 1 kg di proteine. L'impronta idrica sarebbe stata di 19.950 litri d'acqua per chilogrammo di proteine e l'occupazione di terreno sarebbe equivalsa a 21,5 m².

Tutta via, i risultati ottenuti nei limiti del sistema preso originariamente in considerazione, indicano un potenziale di cambiamento climatico di 24,93 kg di CO₂ eq, una deplezione delle risorse idriche di 0,34 m³ ed un'occupazione di terreno pari a 22 m²a (espressi per 1 kg di proteine).

Ulteriori modifiche al sistema produttivo come l'aggiunta del fotovoltaico, ridurrebbe notevolmente l'influenza del consumo di energia elettrica sugli impatti ambientali, migliorando ulteriormente la sostenibilità ambientale dell'intero sistema preso in analisi.

Quest'analisi rende il nostro caso studio e più in generale *Acheta domesticus*, un valido sostituto alle fonti proteiche convenzionali più impattanti.

Non sempre, tuttavia, l'allevamento di insetti si è presentato come l'opzione più conveniente, preceduto sempre dalla soia e in alcuni casi quasi eguagliato dall'allevamento di avicoli e dalla produzione di uova.

BIBLIOGRAFIA

- Bashyal Jyoti. (2023). *Life Cycle Assessment (LCA): 4 Phases, Importance, Limitations*.
<https://Scienceinfo.Com/Life-Cycle-Assessment/#limitations-of-Life-Cycle-Assessment>.
- Boustead, I., & Hancock, G. F. (1979). Handbook of industrial energy analysis. In *Ellis Horwood*.
- Clark, M. A., Domingo, N. G. G., Colgan, K., Thakrar, S. K., Tilman, D., Lynch, J., Azevedo, I. L., & Hill, J. D. (2020). Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets. *Science*, 370(6517), 705–708.
<https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABA7357>
- Commissione europea. (2021). *REGOLAMENTO (CE) n. 1069/2009 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 21 ottobre 2009 recante norme sanitarie relative ai sottoprodotti di origine animale e ai prodotti derivati non destinati al consumo umano e che abroga il regolamento (CE) n. 1774/2002 (regolamento sui sottoprodotti di origine animale)*.
- Commissione Europea. (2021). *Regolamento (UE) 2021/1925 della Commissione del 5 novembre 2021 che modifica alcuni allegati del Regolamento (UE) n. 142/2011*.
<https://www.eurokomonline.eu/index.php/novita-legislative/33715-regolamento-ue-2021-1925-della-commissione-del-5-novembre-2021-che-modifica-alcuni-allegati-del-regolamento-ue-n-142-2011>
- Cortes Ortiz, J. A., Ruiz, A. T., Morales-Ramos, J. A., Thomas, M., Rojas, M. G., Tomberlin, J. K., Yi, L., Han, R., Giroud, L., & Jullien, R. L. (2016). Insect Mass Production Technologies. *Insects as Sustainable Food Ingredients: Production, Processing and Food Applications*, 153–201. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802856-8.00006-5>
- Dreyer, M., Hörtenhuber, S., Zollitsch, W., Jäger, H., Schaden, L. M., Gronauer, A., & Kral, I. (2021a). Environmental life cycle assessment of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) production for human consumption in Austria – a comparison of mealworm and broiler as protein source. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(11), 2232–2247.
<https://doi.org/10.1007/S11367-021-01980-4>

- Dreyer, M., Hörtenhuber, S., Zollitsch, W., Jäger, H., Schaden, L. M., Gronauer, A., & Kral, I. (2021b). Environmental life cycle assessment of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) production for human consumption in Austria – a comparison of mealworm and broiler as protein source. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(11), 2232–2247. <https://doi.org/10.1007/S11367-021-01980-4/FIGURES/7>
- FAO. (2013). *Edible insects Future prospects for food and feed security* .
- Gianotten, N., Soetemans, L., & Bastiaens, L. (2020). Agri-Food Side-Stream Inclusions in the Diet of *Alphitobius diaperinus* Part 1: Impact on Larvae Growth Performance Parameters. *Insects* 2020, Vol. 11, Page 79, 11(2), 79. <https://doi.org/10.3390/INSECTS11020079>
- Gnana Moorthy Eswaran, U., Karunanithi, S., Gupta, R. K., Rout, S., & Srivastav, P. P. (2023). Edible insects as emerging food products—processing and product development perspective. *Journal of Food Science and Technology*, 60(8), 2105–2120. <https://doi.org/10.1007/S13197-022-05489-Y/FIGURES/3>
- Halloran, A., Hanboonsong, Y., Roos, N., & Bruun, S. (2017). Life cycle assessment of cricket farming in north-eastern Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 156, 83–94. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.04.017>
- Hartmann, C., Shi, J., Giusto, A., & Siegrist, M. (2015). The psychology of eating insects: A cross-cultural comparison between Germany and China. *Food Quality and Preference*, 44, 148–156. <https://doi.org/10.1016/J.FOODQUAL.2015.04.013>
- Hartmann, C., & Siegrist, M. (2016). *Science & Research | Overview Insects as food: perception and acceptance Findings from current research*. <https://doi.org/10.4455/eu.2017.010>
- IPIFF. (2022). *Guide on Good Hygiene Practice*.
- Kaczor, M., Bulak, P., Proc-Pietrycha, K., Kirichenko-Babko, M., & Bieganski, A. (2022). The Variety of Applications of *Hermetia illucens* in Industrial and Agricultural Areas—Review. *Biology* 2023, Vol. 12, Page 25, 12(1), 25. <https://doi.org/10.3390/BIOLOGY12010025>
- Khatun, H., Claes, J., Smets, R., De Winne, A., Akhtaruzzaman, M., & Van Der Borght, M. (2021). Characterization of freeze-dried, oven-dried and blanched house crickets (*Acheta domesticus*) and Jamaican field crickets (*Gryllus assimilis*) by means of their physicochemical properties and volatile compounds. *European Food Research and Technology*, 247(5), 1291–1305. <https://doi.org/10.1007/S00217-021-03709-X/FIGURES/1>

- Kotsou, K., Rumbos, C. I., Baliota, G. V., Gourgouta, M., & Athanassiou, C. G. (2021). Influence of Temperature, Relative Humidity and Protein Content on the Growth and Development of Larvae of the Lesser Mealworm, *Alphitobius diaperinus* (Panzer). *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 11087, 13(19), 11087. <https://doi.org/10.3390/SU131911087>
- Machona, O., Chiweshe, T., Chidzwindo, F., & Mangoyi, R. (2023). Investigating the Optimal Conditions for Rearing and Breeding *Tenebrio molitor* in Zimbabwe. *Journal of Biochemical Technology*, 14(1), 27–33. <https://doi.org/10.51847/2RDPIKKQM7>
- Mann, M. E. . (2024). *Greenhouse gas | Definition, Emissions, & Greenhouse Effect | Britannica*. <https://www.britannica.com/science/greenhouse-gas>
- Marino, S., Falconi, F., Neri, P., Pergreffi, R., Olivieri, G., Raffaelli, R., Marchesiello, M. G., Fiore, M., Basile, A., Bajardi, C. A., Romani, A., Borsari, A., Alberti, F., Aradeo, E., Carboni, V., Catto, G., D', M., De, A. L., Carmine, P., ... Storchi, A. (2009). 2009 A R PA SICILIA-AGENZIA REGIONALE P E R L A PROTEZIONE D E L L 'AMBIENTE D E L L A SICILIA D I R E Z I O N E G E N E R A L E Direttore Generale L'analisi ambientale dei prodotti agroalimentari con il Metodo del Life Cycle Assessment a cura di Paolo Neri Comitato editoriale LCA-lab srl spin off ENEA, Bologna.
- Mekonnen, M., & Hoekstra, A. Y. (2010). *The green, blue and grey water footprint of animals and animal products*. Unesco-IHE Institute for Water Education. <https://research.utwente.nl/en/publications/the-green-blue-and-grey-water-footprint-of-animals-and-animal-pro>
- Mlček, J., Adámek, M., Adámková, A., Matyáš, J., Bučková, M., Mrázková, M., Vícha, R., Vychodil, R., Knížková, I., & Volek, Z. (2021). Feed Parameters Influencing the Breeding of Mealworms (*Tenebrio molitor*). *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 12992, 13(23), 12992. <https://doi.org/10.3390/SU132312992>
- Nijdam, D., Rood, T., & Westhoek, H. (2012). The price of protein: Review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes. *Food Policy*, 37(6), 760–770. <https://doi.org/10.1016/J.FOODPOL.2012.08.002>
- Parlamento europeo e Consiglio. (2009). *REGOLAMENTO (CE) N. 767/2009 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 13 luglio 2009 sull'immissione sul mercato e sull'uso dei mangimi, che modifica il regolamento (CE) n. 1831/2003 e che abroga le direttive 79/373/CEE del Consiglio, 80/511/CEE della Commissione, 82/471/CEE del Consiglio, 83/228/CEE del Consiglio, 93/74/CEE del Consiglio,*

93/113/CE del Consiglio e 96/25/CE del Consiglio e la decisione 2004/217/CE della Commissione.

- Ruby, M. B., Rozin, P., & Chan, C. (2015). Determinants of willingness to eat insects in the USA and India. *Journal of Insects as Food and Feed*, 1(3), 215–225. <https://doi.org/10.3920/JIFF2015.0029>
- SETAC. (1991). *A TECHNICAL FRAMEWORK FOR LIFE CYCLE ASSESSMENT*.
- Seyedalmoosavi, M. M., Mielenz, M., Veldkamp, T., Daş, G., & Metges, C. C. (2022). Growth efficiency, intestinal biology, and nutrient utilization and requirements of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae compared to monogastric livestock species: a review. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 2022 13:1, 13(1), 1–20. <https://doi.org/10.1186/S40104-022-00682-7>
- Smetana, S., Schmitt, E., & Mathys, A. (2019). Sustainable use of *Hermetia illucens* insect biomass for feed and food: Attributional and consequential life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 144, 285–296. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.01.042>
- Spykman, R., Hossaini, S. M., Peguero, D. A., Green, A., Heinz, V., & Smetana, S. (2021). A modular environmental and economic assessment applied to the production of *Hermetia illucens* larvae as a protein source for food and feed. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(10), 1959–1976. <https://doi.org/10.1007/S11367-021-01986-Y/TABLES/6>
- Svanberg, I., & Berggren, Å. (2021). *Insects as past and future food in entomophobic Europe*. <https://doi.org/10.1080/15528014.2021.1882170>
- Xu, X., Sharma, P., Shu, S., Lin, T. S., Ciais, P., Tubiello, F. N., Smith, P., Campbell, N., & Jain, A. K. (2021). Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods. *Nature Food* 2021 2:9, 2(9), 724–732. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00358-x>
- Żuk-Gołaszewska, K., Gałęcki, R., Obremski, K., Smetana, S., Figiel, S., & Gołaszewski, J. (2022). Edible Insect Farming in the Context of the EU Regulations and Marketing—An Overview. *Insects* 2022, Vol. 13, Page 446, 13(5), 446. <https://doi.org/10.3390/INSECTS13050446>

RINGRAZIAMENTI

I miei ringraziamenti vanno prima di tutto ai miei genitori, che hanno permesso e sostenuto il mio percorso di studi. È riduttivo dire che senza di loro questa tesi non sarebbe mai stata scritta. Siete stati fondamentali non solo nei momenti di gioia, ma soprattutto nei momenti difficili, quando la volontà di continuare era messa a dura prova.

Un grazie speciale va a tutti i miei parenti, in particolare a mia nonna Euliana, nonno Bruno, zio Michele e zia Monia. Un grazie anche a nonno Mario e nonna Ultimina che hanno vegliato su di me dall'alto.

Ringrazio i miei amici, che tra risate e spensieratezza hanno illuminato il mio percorso di studi. Vi scrivo uno per uno: Pacio questa è per te, Bea la premurosa, Franco polpacci d'oro, Ire tedesca, Kli l'astronomo, Leo pale eoliche, Maci il campione, Momo hermoso, Sganappa il filosofo, Alida la gattara, Simo ingegnere e Sara andiamo da Consalvi.

In particolare, ringrazio Alex e Sofia per la mano data nello svolgimento grafico di alcune figure presenti in questo lavoro di tesi, non ve gasate troppo però.

Un ringraziamento speciale va alla palestra Berserker, un luogo che ha rappresentato non solo un'opportunità per allenare il corpo, ma anche uno spazio per alleggerire la mente.

Una grande parte della mia gratitudine va al mio relatore, il Dott. Daniele Duca, che è stato disponibile e curioso dello svolgimento del caso studio, nonché di prezioso aiuto nella stesura dell'elaborato.

Di pari passo ringrazio la Nutrinsect, in particolare Josè Cianni per la sua totale disponibilità e per il supporto offerto da lui e dai suoi collaboratori nello sviluppo di questo progetto.

Infine, un ringraziamento a me stesso per la forza e la resilienza dimostrata nei momenti di difficoltà, che mi hanno permesso di portare a termine questo percorso senza rimpianti.