



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE E TECNOLOGIE ALIMENTARI

**COMPARAZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ
AMBIENTALE TRA LA CARNE
CONVENZIONALE E QUELLA
COLTIVATA**

Comparison of environmental sustainability between conventional
and cultivated meat

TIPO TESI: Compilativa

Studente:
Marco Pantalone

Relatore:
PROF. DANIELE DUCA

Correlatore:
DOTT. ALESSIO ILARI

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

A tutti coloro che mi hanno
detto di non mollare mai.

SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE.....	5
ELENCO DELLE FIGURE	6
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI	8
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	10
CAPITOLO 1 VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE.....	12
1.1 Valutazione LCA	12
1.1.1 Definizione e riferimenti normativi	12
1.1.2 Fasi per effettuare lo studio LCA.....	13
1.1.3 Aree di applicazione	15
1.1.3 Limitazioni della valutazione LCA.....	15
1.2 Certificazione EPD	16
1.2.1 Definizione e normativa.....	16
1.2.2 Creazione di un EPD.....	17
CAPITOLO 2 IMPATTO AMBIENTALE DELLA CARNE CONVENZIONALE.....	19
2.1 Carne bovina	19
2.1.1 Dati e panoramica del settore	19
2.1.2 Valutazione dell'impatto ambientale	21
2.1.3 Risultati delle valutazioni sulla carne bovina	26
2.2 Carne suina.....	28
2.1.1 Dati e panoramica del settore.....	28
2.1.2 Valutazione dell'impatto ambientale	30
2.1.3 Risultati delle valutazioni sulla carne suina	32
2.3 Carne di pollame	34
2.3.1 Dati e panoramica del settore	34
2.3.2 Valutazione dell'impatto ambientale.....	36
2.3.3 Risultati delle valutazioni sulla carne di pollame	37
CAPITOLO 3 IMPATTO AMBIENTALE DELLA CARNE COLTIVATA.....	40

3.1 La carne coltivata.....	40
3.2 Dati sul settore	41
3.3 Cellule staminali	43
3.4 Sistema di produzione.....	44
3.4.1 Terreni di coltura	44
3.4.2 Fase di proliferazione.....	45
3.4.3 Fase di differenziazione	45
3.5 Valutazione impatto ambientale.....	46
3.5.1 Unità funzionale.....	46
3.5.2 Valutazioni prese in esame	47
3.6 Risultati degli studi presi in esame	59
3.7 Comparazione dei risultati	67
CAPITOLO 4: CONFRONTO DELLE VALUTAZIONI	69
4.1 Precisazioni e limitazioni	69
4.2 Confronto tra le carni convenzionali.....	70
4.2.1 Comparazione per kg di prodotto	70
4.2.2 Comparazione per gr di proteina prodotta	71
4.2.3 Comparazione delle produzioni annue.....	72
4.3 Confronto tra la carne convenzionale e quella coltivata	73
4.3.1 Comparazione per kg di prodotto	73
4.3.2 Comparazione per gr di proteina prodotta	77
4.3.3 Comparazione delle produzioni annue.....	80
CONCLUSIONI	83
BIBLIOGRAFIA	84
RINGRAZIAMENTI	87
APPENDICE	88

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 2-1: Valori di emissioni e consumi per kg di carne bovina.....	26
Tabella 2-2: Valori di emissioni e consumi per kg di carne suina	32
Tabella 2-3: Valori di emissioni e consumi per kg di carne di pollame.....	38

ELENCO DELLE FIGURE

Figura Intr.-1: Aumento del consumo di carne nel mondo dal 1960 ad oggi (Godfray et al., 2018.)	11
Figura 1-1: Schema delle fasi di un LCA, con i relativi input e output (Marino et al., 2009.)	13
Figura 1-2: Schema di produzione di un EPD (https://www.environdec.com .)	17
Figura 2-1: Dati del mercato della carne bovina a livello mondiale nel 2022 (FAO, 2022.)	20
Figura 2-2: Ripartizioni delle emissioni di gas serra dei bovini secondo la FAO (Gerber et al., 2013.)	27
Figura 2.3: Dati del mercato della carne suina a livello mondiale nel 2022 (FAO, 2022.)	29
Figura 2.4: Ripartizione delle emissioni di gas serra per i suini secondo la FAO (MacLeod. et al, 2013.)	33
Figura 2.5: Dati del mercato della carne di pollame a livello mondiale nel 2022 (FAO, 2022.)	35
Figura 3-1: Investimenti nel settore delle proteine alternative dal 2010 (Bushnell et al., 2022.)	41
Figura 3-2: Sistema di produzione della carne coltivata (Warner, 2019.)	44
Figura 3-3: Inventario dello studio di Tuomisto (Tuomisto & Teixeira De Mattos, 2011.)	48
Figura 3-4: Inventario dello di Tuomisto sul bioreattore a fibra cava (Tuomisto et al., 2022.)	53
Figura 3-5: Sistema di produzione preso in considerazione nello studio di Sinke (Sinke, 2023.)	55
Figura 3-6: Elenco ingredienti del terreno di coltura per Kg di carne coltivata (Sinke, 2023.)	56
Figura 3-7: Nutrienti utilizzati dall'azienda SciFi Food per la crescita cellulare (Kim et al., 2022.)	59

Figura 3-8: Consumo di energia e emissioni secondo lo studio effettuato da Mattick (Mattick et al., 2015.).....	62
Figura 3-9: risultati della valutazione effettuata sul prodotto dell'azienda SciFi Food, in confronto con un prodotto simile bovino (Kim et al., 2022.)	66
Figura 4-1: Comparazione per kg di carne tradizionale prodotta	71
Figura 4-2: Comparazione per gr di proteina prodotta	72
Figura 4-3: Percentuale delle emissioni annue dei 3 tipi di carne prese in considerazione	73
Figura 4-4: Comparazione delle emissioni per kg di prodotto.....	74
Figura 4-5: Comparazione dei consumi energetici per kg di prodotto.....	75
Figura 4-6: Comparazione dell'uso del suolo per kg di prodotto.....	76
Figura 4-7: Comparazione dei consumi idrici per kg di prodotto.....	77
Figura 4-8: Comparazione delle emissioni per gr di proteina.....	78
Figura 4-9: Comparazione dei consumi energetici per gr di proteina.....	79
Figura 4-10: Comparazione dell'uso del suolo per gr di proteina	79
Figura 4-11: Comparazione dei consumi idrici per gr di proteina.....	80
Figura 4-12: Consumi elettrici (TJ) nello scenario ipotetico del 2030	82
Figura 4-13: Emissioni prodotte (tonn. CO ₂ eq) nello scenario ipotetico del 2030.....	82

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

LCA	Life Cycle Assessment.
EPD	Environmental Product Declaration.
LCI	Life Cycle Inventory.
ISO	International Organization for Standardization.
PCR	Production category rules
GPI	Istruzioni generali del programma
FAO	Food and agriculture organization of the united nations
USA	Stati Uniti d'America
UE	Unione Europea
CO ₂	Anidride carbonica
CH ₄	Metano
N ₂ O	Protossido di azoto
GLEAM	Global Livestock Environmental Accounting
LUC	Cambiamento uso del suolo
OCSE	Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico
OGM	Organismi geneticamente modificati
CW	Peso della carcassa
EFSA	L'Autorità europea per la sicurezza alimentare
DMEM	Dulbecco's Modified Eagle Medium
FBS	Siero fetale bovino
CMB	Scenario base, con crescita della biomassa del 128%
CMC	Scenario alternativo di coltivazione

CMB128 Scenario alternativo con crescita del 128%

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Nell'ultimo periodo si sta sempre più parlando di cambiamenti climatici, causati dall'immissione in atmosfera di gas serra. Al fine di contrastare questo fenomeno nel 2015 gli Stati membri della convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, hanno siglato gli accordi di Parigi, il cui obiettivo è limitare l'aumento di temperatura media globale, di 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali e questo richiede principalmente la notevole riduzione di emissioni di gas serra (Michael et al., 2020). Nel caso del sistema agroalimentare la filiera che ha uno degli impatti ambientali maggiori è quella relativa alla produzione di prodotti a base carne, in particolar modo l'allevamento dei capi, contribuisce ad una produzione di emissioni nell'ambiente molto alte, soprattutto climalteranti.

Negli ultimi decenni il consumo medio pro-capite di carne è andato aumentando (fig. Intr.-1), andando di conseguenza ad aumentare le emissioni di gas serra, in particolare nei paesi in via di sviluppo come la Cina (Godfray et al., 2018.). Questo aumento di consumo può essere attribuibile a differenti cause quali: il costo più accessibile, infatti al giorno d'oggi il prezzo della carne, ha un valore di molto inferiore al reddito medio di numerosi paesi del globo e il desiderio dell'uomo di consumare alimenti ricchi di energia e nutrienti (sin dall'alba dei tempi l'alimento contenente queste caratteristiche e più facile da reperire è stato proprio la carne).

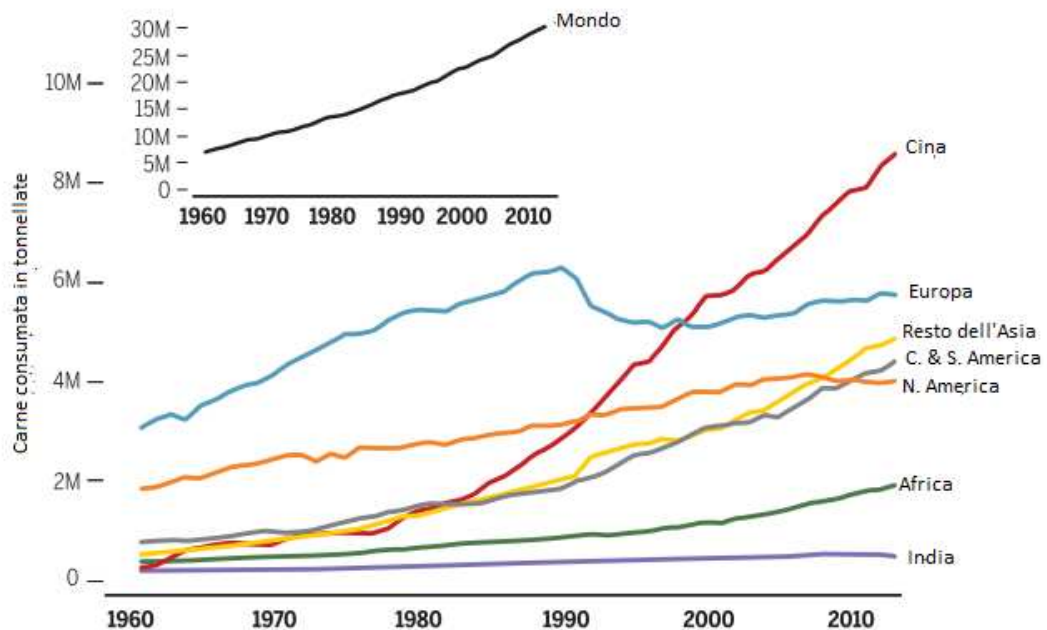


Figura Intr.-1: Aumento del consumo di carne nel mondo dal 1960 ad oggi (Godfray et al., 2018).

Al fine di diminuire le emissioni prodotte dalla filiera carne, si è iniziato a promuovere lo sviluppo di prodotti alternativi alla carne; come ad esempio, prodotti a base di farina di soia, di glutine, insetti e di microproteine e la carne coltivata detta anche carne artificiale, quest'ultima nell'ultimo periodo è sempre più al centro della cronaca pubblica per i diversi aspetti, tra cui quelli etici ed economici.

Lo scopo di questa di questa tesi, sfruttando la bibliografia riguardanti gli argomenti trattati, è quella di fare prima una valutazione dell'impatto ambientale della carne tradizionale (prendendo in considerazione la fase di allevamento) e di quella coltivata. Infine effettuare un paragone tra le due, così da capire se la carne coltivata può essere definita al momento come una valida alternativa alla carne tradizionale.

Capitolo 1

VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE

La valutazione dell'impatto ambientale di un qualsiasi tipo prodotto viene effettuata tramite la metodica denominata Life Cycle Assessment (LCA) in italiano valutazione del ciclo di vita. Inoltre esiste un'ulteriore certificazione definita Environmental Product Declaration (EPD) la quale, basandosi sulla metodica LCA, consente di avere sempre una valutazione di sostenibilità ambientale su un particolare tipo di prodotto.

1.1 Valutazione LCA

1.1.1 *Definizioni e riferimenti normativi,*

La valutazione LCA è un procedimento che viene sempre più spesso utilizzato al fine di quantificare il carico energetico e ambientale di un prodotto o dell'intero ciclo produttivo (Marino et al., 2009). Questa valutazione è stata ideata perché, la maggior parte delle tecnologie e delle industrie esistenti si sono concentrate sugli indicatori economici e sulla produttività e ciò nel corso degli anni ha causato enormi danni ambientali a causa dell'insufficiente considerazione degli aspetti ambientali e sociali. L'approccio LCA è stato sviluppato negli anni 70', per poi essere stato migliorato ed esteso in quasi tutti i settori. Le prime industrie alimentari che hanno applicato la valutazione LCA per lo sviluppo di nuovi prodotti e imballaggi sono state la Coca-cola e la Nestlé (Kim et al., 2022).

La valutazione può comprendere una singola fase oppure l'intero processo: dalla fase di produzione al trasporto, fino ad arrivare alle fasi di lavorazioni e vendita dei prodotti. Un'analisi LCA viene effettuata tenendo conto: delle spese dell'energia, dei materiali utilizzati e dei rifiuti riversati nell'ambiente.

La valutazione LCA è molto utile, perché consente sia di quantificare le prestazioni energetiche di un prodotto durante il suo ciclo di vita, ma anche di indirizzare le decisioni prese dagli industriali e dalle organizzazioni governative e non, così da modificarne la lavorazione e il marketing, come l'attuazione di un'etichettatura ecologica (Marino et al., 2009).

I riferimenti normativi utilizzati per l'esecuzione di un'analisi LCA sono le norme UNI EN ISO 14040:2021 e UNI EN ISO 14044:2021.

1.1.2 Fasi per effettuare lo studio LCA

Lo studio del LCA si compone di quattro fasi (fig. 2-1):

- Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione,
- Analisi dell'inventario (LCI),
- Valutazione impatto,
- Interpretazione.

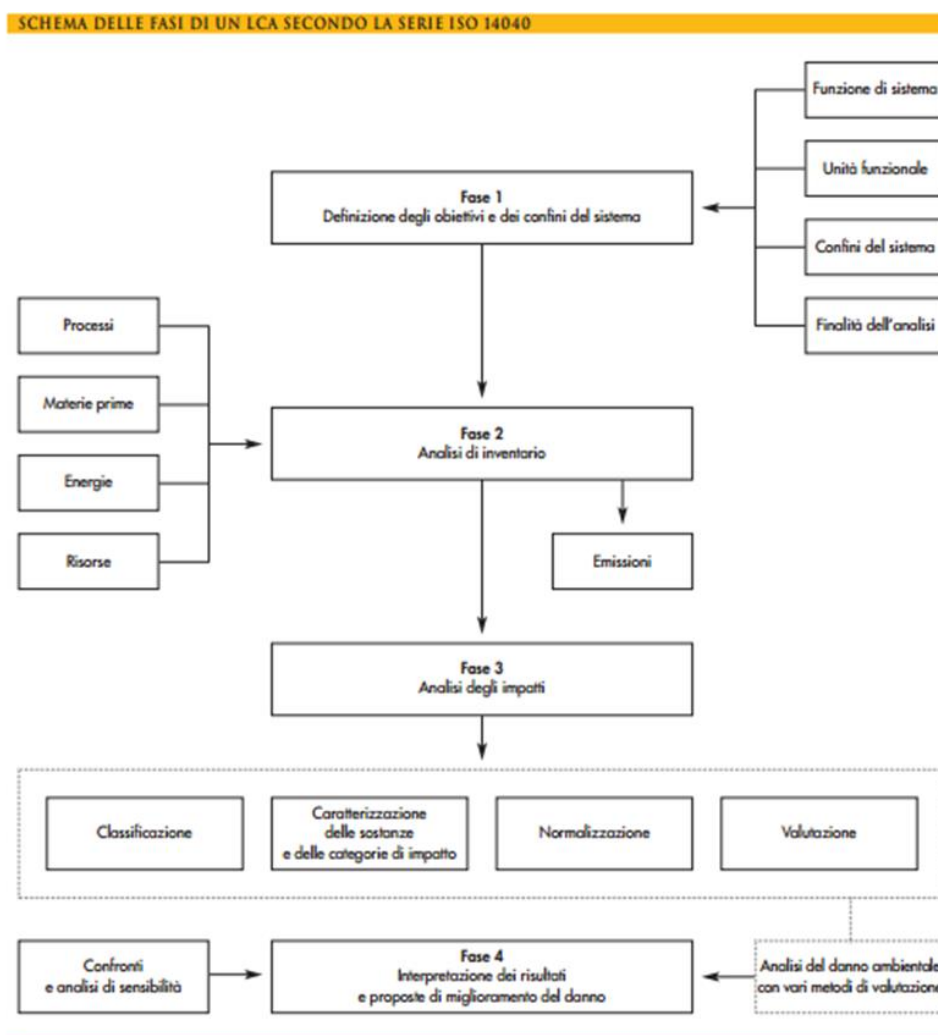


Figura 2-1: Schema delle fasi di un LCA, con i relativi input e output (Marino et al., 2009.)

1.1.2.1 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

La definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione consente di effettuare la pianificazione della futura analisi LCA. Per prima cosa viene identificato l'obiettivo con il quale si può intendere la definizione del problema da analizzare, cioè se si vuole analizzare o migliorare uno o più prodotti già presenti nel mercato, oppure se si necessita della creazione di un nuovo prodotto. Dopodiché viene identificato l'oggetto dello studio, cioè il tipo di prodotto, le sue funzioni, i limiti temporali della produzione, a volte anche il tipo di packaging e il comportamento del consumatore.

1.1.2.2 Analisi dell'inventario

LCI, è la parte centrale e più impegnativa in termini di tempo e risorse dell'intera valutazione, consiste nella raccolta dei dati e nell'analisi delle interazioni di questi ultimi con l'ambiente. Al fine di semplificare e ottimizzare il lavoro, data la presenza di numerosi dati, è molto conveniente costruire un diagramma di flusso dei processi dell'intero sistema (Marino et al., 2009).

Una volta realizzato il diagramma si procede alla raccolta dei dati, che consente una maggiore conoscenza del sistema, che può comportare la richiesta di ulteriori dati e requisiti. In alcuni casi può avvenire una non reperibilità di dati che può comportare una revisione del campo di applicazione o dell'obiettivo.

I dati possono essere raccolti attraverso l'utilizzo di banche dati e la loro qualità è importante sia per capire l'affidabilità dello studio, ma anche se i suoi risultati possono essere utilizzati per lo studio. I fattori che influenzano la qualità dei dati sono:

- Temporali: l'orizzonte temporale su cui viene effettuata la ricerca ovvero l'anzianità delle fonti prese in esame,
- Geografici: la zona in cui vengono raccolti questi dati e la scala (locale, regionale...),
- Tecnologici: le varie tecnologie utilizzate.

La fase di analisi dell'inventario può essere divisa a sua volta in due sottofasi:

- Lo studio della filiera produttiva: si va a visionare l'intero processo produttivo, al fine di avere una visione più chiara e per facilitare il compito è molto utile la stesura dello schema a blocchi. Molto importante è capire l'inquadramento del processo produttivo nel piano territoriale e ambientale e i riferimenti normativi.
- L'analisi e la descrizione di ogni singolo passaggio del ciclo produttivo: sempre con l'aiuto dello schema a blocchi si possono indicare le principali entrate ed uscite per ogni fase del sistema. Tra le entrate si possono annoverare: le materie prime, l'energia

utilizzata e le risorse idriche mentre tra le uscite si possono indicare: il prodotto finito, i rifiuti e le emissioni prodotte dal sistema.

Successivamente avviene la visione della bibliografia e della sitografia e la raccolta dei dati, questa fase deve seguire le indicazioni redatte nelle due precedenti fasi.

1.1.2.3 Valutazione impatto

Dopo aver raccolto i dati si procede con la loro validazione e successivamente si effettuano i calcoli al fine di determinare gli impatti dell'intero processo produttivo, ma anche di ciascuna delle fasi che lo compongono. Il calcolo dell'impatto deve tener conto delle varie fonti di combustibili e di energia (rinnovabile e non) e della gestione e dell'utilizzo dei flussi di energia.

1.1.2.4 Interpretazione

In questa fase avviene l'interpretazione dei dati ottenuti con i vari calcoli. I risultati ottenuti devono essere conformi con quanto dichiarato nell'obiettivo e con il campo di applicazione. Quest'ultimi devono essere facilmente comprensibili, chiari e completi. Infatti possono essere utilizzati come base per la risoluzione del problema delle emissioni oppure possono essere utilizzati per aiutare chi prenderà le decisioni nel relativo contesto.

1.1.3 Aree di applicazione

La valutazione LCA può essere utilizzata per:

- La valutazione di sistemi ambientali,
- Le dichiarazioni ambientali,
- La quantificazione di emissioni e la validazione.

LCA viene spesso utilizzata per la valutazione dell'intero processo oppure può anche essere utilizzata per parte del processo produttivo, nel caso delle filiere animali si usa:

- Approccio dalla culla al cancello: che riguarda solo la produzione dei mangimi e l'allevamento dei capi di bestiame.
- Approccio dalla culla alla tomba: valutazione dell'intero processo di produzione.

1.1.4 Limitazioni della valutazione

Le principali limitazioni del LCA possono avvenire, ad esempio nel calcolo dell'impronta di carbonio, dove possono sorgere dei casi in cui vengono considerate solo le emissioni di gas serra correlate ai cambiamenti climatici. Tale limitazione iniziale può essere pienamente giustificata se gli impatti ambientali complessivi del prodotto analizzato (e dei suoi prodotti

concorrenti) sono di gran lunga dominati dagli impatti dei cambiamenti climatici. Stessa limitazione può essere giustificata se tutti gli altri impatti individualmente rilevanti come l'eutrofizzazione e l'acidificazione sono correlati in modo molto stretto e positivo con il cambiamento climatico. In caso contrario, tali limitazioni nelle impostazioni iniziali possono comportare inadeguatezza per i confronti (European Commission, 2010).

Un'ulteriore limitazione del LCA riguarda la nicchia di mercato, quest'ultima può essere definita come una sottocategoria di un segmento di mercato, dove una parte dei clienti considera sostituibili solo prodotti con proprietà specifiche (es. la sottocategoria degli imballaggi riciclabili, nicchia del mercato degli imballaggi). Gli aspetti che separano un mercato di nicchia dal mercato principale sono: il prezzo (ovvero il costo di investimento di un bene o il costo del ciclo di vita / costo totale di proprietà), lo stile di vita e le questioni relative al sistema di valore (es. immagine in generale o più specifica come "prodotto localmente", "bio-based", "riciclato", "riciclabile") alta qualità, durata/longevità, praticità e/o risparmio di tempo. Gli studi sui mercati di nicchia limitano quindi inizialmente i tipi di prodotti da includere, anche se da un punto di vista puramente tecnico dovrebbero essere inclusi anche i prodotti al di fuori della nicchia specifica, per evitare un confronto potenzialmente fuorviante. Nella fase interpretativa di tali studi dovranno essere evidenziate in modo esplicito e ben visibile le limitate conclusioni (European Commission, 2010).

1.2 Certificazione EPD.

La certificazione EPD, come indicato in precedenza si basa sulla metodologia dell'analisi LCA, che consente di definire il consumo di risorse (acqua, energia, materiali) e gli impatti sull'ambiente. Un EPD riporta in modo trasparente dati oggettivi, comparabili e verificati da terzi sulle prestazioni ambientali di prodotti e servizi dal punto di vista del ciclo di vita (<https://www.environdec.com>).

1.2.1 Definizione e normative dell'EPD

L'International EPD System è di proprietà ed è gestito da EPD International AB. Il programma è gestito in conformità a ISO 14025, ISO/TS 14027, ISO 14040, ISO 14044 e ISO 14067. Per i prodotti da costruzione, il programma EPD è conforme anche alla norma europea EN 15804 (A1 e A2) e ISO 21930.

1.2.2 Creazione di un'EPD

Al fine di creare una valutazione EPD (fig. 1-3), è necessario una Product Category Rules, detto anche PCR, cioè un documento standardizzato, aggiuntivo alle norme ISO citate in precedenza sulla LCA, che contiene le istruzioni per poter condurre la valutazione e i dettagli, in particolare (<https://www.environdec.com>):

- Confini del sistema, ovvero quali processi e fasi del ciclo di vita del prodotto devono essere considerati,
- Unità dichiarata/funzionale: la quantità, il peso e la vita utile del prodotto oggetto di valutazione,
- Come definire, ad esempio, la fase di utilizzo e le opzioni di fine vita,
- Quali categorie di impatto devono essere valutate in aggiunta oltre allo standard stabilito come descritto nelle Istruzioni generali del programma (GPI).

L'utilizzo delle PCR garantisce che i prodotti funzionalmente simili siano valutati allo stesso modo durante l'esecuzione dell'LCA e rende più facile e scientificamente solido il confronto dei prodotti.

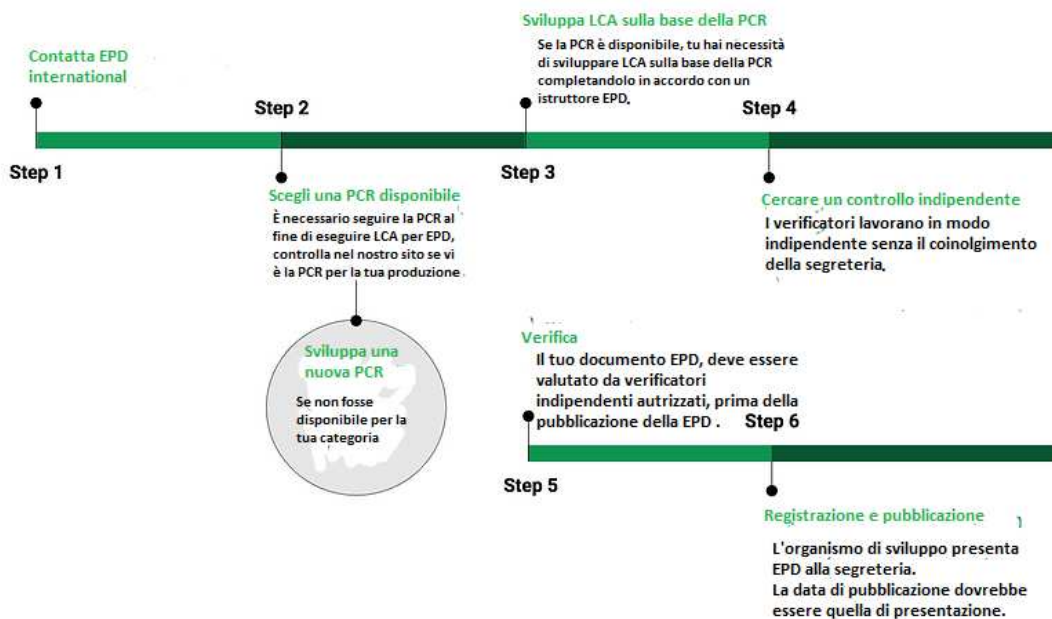


Figura 1-3: Schema di produzione di un EPD (<https://www.environdec.com>.)

La creazione di una EPD richiede cinque passaggi:

1. Selezione PCR: bisogna scegliere una PCR inerente all'argomento trattato, adeguata e che sia verificata. Nel caso di nuovi prodotti possono essere disponibili delle pre-PCR.
2. Valutazione del ciclo di vita: può essere svolto con l'ausilio di un collaboratore interno all'azienda o con un esperto di EPD e deve rispettare gli standard ISO sopra indicato e la relativa PCR.
3. Formato EPD: le informazioni trovate con la valutazione debbono essere inserite nel formato di rendicontazione EPD, questo può essere fatto con l'aiuto di un esperto.
4. Verifica: la valutazione viene verificata da un organo certificatore adeguato con competenza nel relativo settore. Esistono due differenti tipi di verifica:
 - i) La verifica individuale: verifica dei dati basati sull'LCA, informazioni ambientali aggiuntive e altre informazioni presentate in una EPD basata sul GPI e su una PCR di riferimento valida. Ciò deve essere condotto da un singolo verificatore approvato o da un organismo di certificazione accreditato.
 - ii) La verifica tramite certificazione di processo EPD: la verifica di un processo organizzativo interno finalizzato allo sviluppo di EPD sulla base delle Istruzioni Generali del Programma e di valide PCR di riferimento rientranti nel campo di applicazione della certificazione. La certificazione del processo EPD deve essere condotta da un organismo di certificazione accreditato.
5. Registrazione e pubblicazione: dopo aver completato la verifica, l'organizzazione che sviluppa l'EPD deve registrare quest'ultimo nel portale dedicato insieme ad una documentazione obbligatoria.

In questa tesi verranno prese in considerazione anche delle valutazioni EPD effettuate sulla carne tradizionale negli ultimi anni. Mentre per la carne coltivata in laboratorio, essendo una nuova nicchia di mercato, queste valutazioni non sono state effettuate da nessuna industria.

Capitolo 2

IMPATTO AMBIENTALE DELLA CARNE CONVENZIONALE

La produzione mondiale di carne è pari a 360 milioni di tonnellate (in equivalente peso carcassa) nel 2022, in aumento dell'1,2% rispetto al 2021 (FAO, 2022), e si prevede un raggiungimento di 374 milioni di tonnellate per l'anno 2030 (OECD-FAO, 2021). Al fine di quantificare le emissioni di gas serra del prodotto carne bisogna eseguire delle valutazioni di impatto ambientale, seguendo quanto indicato dalla norma ISO 14040 e 14044.

In questo capitolo, verranno prese come riferimento delle fonti, che al loro interno contengono delle valutazioni LCA e delle valutazioni EPD sull'allevamento di carne bovina, suina e avicola. Tutto questo al fine di calcolare l'impatto ambientale dell'allevamento di ogni singola produzione.

2.1 Carne bovina

Il settore dei ruminanti che comprende al suo interno bovini, ovini, caprini e bufale, può vantare una popolazione mondiale di più di 3600 milioni di capi nell'anno 2012, il settore dei bovini da carne che ne rappresenta il 40% del settore dei ruminanti (Gerber et al., 2013).

2.1.1 *Dati e panoramica del settore*

Il settore dei bovini da carne è il più importante tra tutte le filiere della carne, infatti contribuisce alla produzione di 73,9 milioni tonnellate di carne nel 2022, pari a circa un 20% della carne prodotta a livello mondiale, con un aumento del 1,4% rispetto all'anno precedente (FAO, 2022). Nell'anno 2022 (fig. 2-1) la regione al mondo con la maggior produzione è l'Asia con più di 20 milioni di tonnellate di carne prodotte, di cui più di 7 milioni dalla sola Cina. Quest'ultima però, si trova sul gradino più basso del podio preceduta dal Brasile con più di 10 milioni di tonnellate prodotte e dagli Stati Uniti d'America (USA) con circa 12 milioni (FAO, 2022).

Dalla figura sottostante (fig. 2-1) si può notare che la nazione con il maggior consumo di carne bovina sono gli USA con circa 12 milioni di tonnellate consumate, seguita dalla Cina

con 10 milioni e dal Brasile con circa 7 milioni. Inoltre, nell'anno 2022 la Cina si conferma il paese con il maggior numero di tonnellate di carni importate, mentre il Brasile risulta essere il primatista nelle esportazioni.

Statistiche carne bovina	Produzione		Import		Export		Utilizzo	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
	estim.	f'cast.	estim.	f'cast.	estim.	f'cast.	estim.	f'cast.
ASIA	19 976	20 392	6 970	7 488	1 705	1 803	25 228	26 061
Cina	6 990	7 145	3 455	3 730	56	61	10 389	10 814
India	2 498	2 594	-	-	1 336	1 412	1 162	1 182
Indonesia	459	422	269	312	1	-	727	734
Iran	551	568	29	60	9	6	571	622
Giappone	480	490	804	796	11	10	1 260	1 261
Malesia	46	48	207	232	14	15	239	264
Pakistan	2 372	2 439	1	1	67	63	2 306	2 377
Filippine	205	202	194	196	5	5	395	394
Corea del sud	304	324	598	620	6	5	896	939
AFRICA	6 476	6 423	501	568	87	87	6 891	6 904
Algeria	142	144	10	5	-	-	151	149
Angola	95	70	14	15	-	-	109	85
Egitto	584	585	339	402	1	-	922	986
Sud africa	1 051	1 052	5	5	58	60	999	997
AMERICA CENTRALE E CARAIBI	2 991	3 036	382	365	610	642	2 764	2 760
Messico	2 131	2 182	207	192	368	413	1 970	1 961
SUD AMERICA	16 140	16 689	629	616	4 132	4 644	12 637	12 661
Argentina	2 982	3 072	7	5	750	785	2 239	2 292
Brasile	9 750	10 270	59	67	2 327	2 798	7 482	7 539
Cile	210	203	445	399	20	25	635	577
Colombia	767	719	9	10	68	52	708	678
Uruguay	668	653	41	47	528	542	181	158
NORD AMERICA	14 120	14 210	1 697	1 714	2 219	2 270	13 617	13 631
Canada	1 386	1 390	237	235	589	578	1 032	1 050
USA	12 734	12 820	1 457	1 476	1 630	1 692	12 583	12 579
EUROPA	10 478	10 443	1 294	1 329	1 439	1 409	10 333	10 362
UE	6 882	6 842	310	370	901	905	6 291	6 307
Russia	1 674	1 670	317	276	103	89	1 888	1 857
Ucraina	310	297	10	8	39	16	282	289
UK e Irlanda del nord	889	906	485	512	139	152	1 236	1 266
OCEANIA	2 661	2 690	55	51	1 892	1 860	824	881
Australia	1 895	1 955	22	17	1 238	1 247	679	725
Nuova Zelanda	754	724	11	10	651	611	114	123
MONDO	72 843	73 883	11 529	12 130	12 083	12 716	72 295	73 259
LIFDC	5 772	5 741	143	161	187	175	5 728	5 726
LDC	4 608	4 568	100	107	14	12	4 686	4 663

Figura 2-1 Dati del mercato della carne bovina a livello mondiale nel 2022 (FAO, 2022).

Secondo il rapporto effettuato dalla FAO nel 2030, salvo crisi climatiche, la produzione di carne aumenterà notevolmente nella regione africana fino a superare la produzione asiatica, mentre la produzione nell'UE tenderà a diminuire (OECD-FAO, 2021). Questa variazione viene causata dalla modificazione della domanda che si andrà a spostare verso il pollame in molte zone del mondo.

I capi bovini vengono allevati in allevamenti al pascolo o allevamenti misti (questi ultimi sono la maggioranza a livello mondiale). La carne può essere il solo prodotto degli allevamenti oppure il coprodotto insieme al latte, dove i capi in eccesso vengono utilizzati per la

produzione di carne. Questa divisione è molto più marcata negli allevamenti dei paesi sviluppati, come Europa e Nord America, i bovini, il cui unico prodotto è la carne, sono allevati in moderni stabilimenti con metodi intensivi. Al contrario nei paesi sottosviluppati o in via di sviluppo i bovini sono considerati multifunzione e sono quindi utilizzati oltre che per la produzione di latte e di carne, per il tiraggio di mezzi e attrezzi agricoli e per la produzione di pelli e letame.

La produzione di carne, inoltre, varia in base alle condizioni agroecologiche: le zone temperate contribuiscono alla produzione del 38% della carne totale, le zone umide al 33%, mentre quelle aride al 29% (Gerber et al., 2013).

2.1.2 Valutazione dell'impatto ambientale

Per quantificare le emissioni di gas serra, vengono prese in considerazione differenti valutazioni: una valutazione LCA effettuata dalla FAO, due valutazioni LCA della carne in vitro, dove sono anche riportati dei valori di valutazioni relative alla carne convenzionale e due valutazioni EPD messe in atto dalla Coop, una riguardante la carne di vitello e un'altra quella di manzo. L'unità funzionale dell'output della filiera è 1 kg di prodotto.

2.1.2.1 Valutazione LCA FAO

La valutazione LCA presa come caso studio è stata effettuata dalla FAO (Gerber et al., 2013) e riguarda tutti i paesi del globo. Comprende le emissioni dei 3 principali gas serra: anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄) e protossido di azoto (N₂O), emessi dai sistemi di allevamento e vengono espresse come kg di anidride carbonica equivalente per kg di peso di carcassa. Il contributo di una certa quantità di un determinato gas serra viene espresso quindi come la quantità di CO₂ in grado di determinare esattamente lo stesso contributo, CO₂ equivalente appunto. A parità di quantità emesse quindi alcuni gas determinano contributi maggiori rispetto ad altri (es 1 kg N₂O = 298 Kg CO₂eq -1 kg CO₂ = 1 kg CO₂eq).

Relativamente ai dati utilizzati per lo studio della FAO, nel caso dei paesi dell'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OCSE), vengono consultate delle statistiche dettagliate, supportate da numerose pubblicazioni scientifiche e tecniche. Al contrario, vi è una grave scarsità di dati nei paesi non OCSE, in questo caso le lacune sono state sopperite grazie all'utilizzo di banche dati, fonti letterarie e pareri di esperti (Gerber et al., 2013).

Come indicato precedentemente i gas serra vengono valutati tramite l'analisi del ciclo di vita e le principali fonti di emissione sono:

- N₂O: le emissioni sono determinate principalmente a causa della gestione del letame, possono avvenire al pascolo, in stalla, durante lo stoccaggio di letame oppure a causa dell'apporto di azoto ai terreni.
- CO₂: le cause delle emissioni a livello aziendale sono riconducibili all' emissione diretta come: costruzione di edifici aziendali e la coltivazione di foraggi. Le emissioni causate non direttamente dall'azienda sono correlate alla produzione e al trasporto di mangimi e concimi per il terreno dove sono presenti le colture foraggere.
- CH₄: le emissioni avvengono principalmente a causa dello stoccaggio del letame e della fermentazione enterica e in minor misura del riscaldamento e della ventilazione aziendale.

Al fine di effettuare il calcolo, come indicato dall'articolo della FAO viene utilizzato uno specifico modello definito il Global Livestock Environmental Accounting (GLEAM).

Per fornire una panoramica di tutti gli aspetti considerati dal modello e come questo sia in linea con l'approccio LCA, si riporta di seguito una sua descrizione (Gerber et al., 2013).

Il modello GLEAM è composto da più moduli:

- Modulo mandria: che indica il numero e le caratteristiche dei capi allevati e la struttura dell'allevamento,
- Modulo letame: calcola la velocità con cui l'azoto escreto arriva ai pascoli e alle colture,
- Modulo alimentazione: calcola il contenuto e le emissioni della razione alimentare (espresso in kg),
- Modulo sistema: calcola il fabbisogno energetico di ciascuna animale e la quantità di carne prodotta annualmente. Calcola, inoltre, le emissioni causate dalla fermentazione e gestione del letame e produzioni di mangimi,
- Modulo allocazione: calcola le emissioni differenti dal modulo del sistema, che possono essere uso riscaldamenti aziendali, uso attrezzature e il trasporto di mangimi.

Modulo mandria: Non essendoci una datazione riguardante la struttura degli allevamenti a livello nazionale, per semplificare i calcoli gli autori hanno diviso la mandria tipo, in sei differenti coorti: femmine adulte e maschi adulti, femmine di rimpiazzo e maschi di rimpiazzo e femmine e maschi da ingrasso che non sono necessari per il mantenimento della mandria.

Modulo letame: Consente di calcolare la quantità di azoto, questo avviene moltiplicando il numero di capi per i tassi medi di escrezione di azoto. Invece per calcolare la quota di azoto netto disponibile per l'applicazione bisogna sottrarre l'azoto che si perde durante la gestione

del letame dall'azoto totale. Infine, per identificare la quota di azoto netto per l'area di terreno si divide il dato precedentemente trovato per l'estensione del prato/campo.

Modulo alimentazione: Per i bovini vengono presi in considerazione i mangimi più utilizzati, cioè foraggi grossolani, sottoprodotti e concentrati. I mangimi possono essere importanti produttori di CO₂, infatti questa viene emessa: per il processo di coltivazione della materia prima, per il processo di trasformazione in mangime complesso, per il trasporto di quest'ultimo, ma anche per la produzione di fertilizzanti destinati al terreno dove viene coltivata la materia prima. Inoltre, può produrre come gas N₂O, che avviene durante la fase di coltivazione e può essere diretta o indiretta come la lisciviazione (Gerber et al., 2013). Per effettuare il calcolo, sempre secondo il report viene utilizzata la formula:

$$\text{GHGkgDM} = \text{GHGha} / (\text{DMYGcrop} \cdot \text{FUEcrop} + \text{DMYGby} \cdot \text{FUEby}) \cdot \text{EFA/MFA}$$

Dove:

- GHGkgDM: emissioni (di CO₂, N₂O o CH₄) per kg di materia secca,
- GHGha: emissioni per ettaro,
- DMYGcrop: resa lorda del raccolto (kgDM/ha),
- DMYGby: resa lorda dei residui colturali o dei sottoprodotti (kgDM/ha),
- FUEcrop: efficienza nell'uso dei mangimi, cioè frazione della resa lorda del raccolto,
- FUEby: efficienza nell'uso dei mangimi, cioè frazione del residuo colturale o sottoprodotto (del raccolto e del coprodotto),
- EFA: frazione economica, valore della coltura o del coprodotto come frazione del valore totale (della coltura e del coprodotto),
- MAE: frazione di massa della coltura o del coprodotto come frazione del totale rendimento lordo raccolto.

Modulo di sistema: consente di calcolare:

- Il fabbisogno energetico dell'animale: il quale è dato dalla somma del fabbisogno per il mantenimento, l'allattamento, la gravidanza, l'attività dell'animale e l'aumento di peso. I fattori che influenzano il fabbisogno energetico sono: il peso, la produzione e l'alimentazione.
- Calcolo emissioni mangimi: il report della FAO utilizza le formule: Assunzione di mangime (kgDM/animale/giorno) = fabbisogno energetico totale (MJ/animale/giorno) / contenuto energetico del mangime (MJ/ kgDM) che è pari a 18,45 (MJ/ kgDM).
- Calcolo fermentazione enterica: indica le emissioni causate dalla digestione del mangime e per effettuare il calcolo viene usata la seguente formula: $\text{EFCH}_4 = (365 \cdot$

$GE \cdot (Y_m / 100 / 55,65)$. Dove: EF_{CH_4} è il fattore di emissione di CH_4 (kg CH_4 capo⁻¹ anno⁻¹); Y_m corrisponde al fattore di conversione CH_4 ; GE è l'apporto energetico lordo (MJ testa⁻¹ giorno⁻¹) e il fattore 55,65 (MJ kg CH_4) rappresenta il contenuto energetico di CH_4 .

- Emissioni letame: calcola le emissioni di metano, tramite il prodotto della gestione del letame annuo di un animale per la stima dei solidi volatili che vengono convertiti in CH_4 . Mentre nel caso del calcolo delle emissioni di N_2O si effettua il prodotto della quantità del letame bovino prodotto in un anno per la stima di azoto convertito in N_2O .
- Produzioni carne: la produzione totale di carne è calcolata dal numero di animali vivi (per gruppo di coorte) che lasciano l'allevamento per la macellazione e dal peso vivo al quale vengono venduti.

Inoltre, il report della FAO calcola le emissioni derivanti dall'uso del suolo, il quale viene definito dallo United Climate Change Secretariat come: *un settore dell'inventario dei gas a effetto serra che copre le emissioni e gli assorbimenti di gas a effetto serra derivanti dall'uso diretto del suolo indotto dall'uomo, dal cambiamento dell'uso del suolo e dalle attività forestali* (Gerber et al., 2013). Il cambiamento dell'uso del suolo (LUC) indica la modificazione di un terreno in un altro solitamente da bosco a campo coltivabile, ma a volte può avvenire, anche se molto raramente, l'esatto opposto. La conversione del bosco a terreno coltivabile porta una diminuzione del carbonio anche del 25-30% come indicato dal report della FAO.

Sempre secondo il report della FAO, nel periodo 1990-2006, a livello mondiale, nella maggior parte delle regioni, si è visto un aumento di terreni coltivati a discapito di prati e foreste. Sempre in questo periodo, a causa dell'aumento della domanda di mangimi e olio vegetale, nei terreni sono state soprattutto coltivate colture oleaginose (soia, girasoli) e del mais (Gerber et al., 2013). Uno tra gli aspetti più difficili da considerare nello studio condotto dalla FAO è la variazione di caratteristiche biofisiche (suolo e clima) e processi di produzione che variano in base all'area geografica e al livello di sviluppo del paese interessato. Al fine di rimediare a questo inconveniente come indicato dall'articolo della FAO, i dati sulle attività agricole e sui parametri dei sistemi di allevamento sono stati raccolti a diversi livelli di aggregazione: sistema di produzione, livello di paese, zona economica esclusiva o una loro combinazione (ad esempio, le informazioni sullo stoccaggio del letame nei paesi in via di sviluppo erano disponibili per una combinazione di sistemi di produzione).

Il report della FAO, all'interno della valutazione LCA, prende in considerazione energia elettrica consumata dagli allevamenti, la quale è indispensabile per effettuare le operazioni di:

ventilazione, riscaldamento, illuminazione, riscaldamento dell'acqua, l'abbigliamento e alimentazione degli animali.

Nel caso del consumo d'acqua per kg di prodotto, non essendo indicato nell'articolo preso in riferimento, vengono presi dei dati presenti all'interno del sito ufficiale della FAO, nella sezione Land & Water (<https://www.fao.org>). Il consumo di acqua viene espresso in m³ per kg di prodotto.

2.1.2.2 Valutazione EPD

Al fine di effettuare la valutazione i dati raccolti dal seguente studio vengono classificati in:

- Dati specifici: detti anche dati primari e vengono raccolti direttamente dall'impianto di lavorazione, su cui avvengono una o più parti del ciclo di vita del prodotto.
- Dati generici: che si dividono a loro volta in:
 - i) Dati generici selezionati: dati ottenuti grazie all'ausilio di database gratuiti o commerciali, che soddisfano precise caratteristiche.
 - ii) Dati proxy: dati ottenuti grazie a database gratuiti o commerciali, che però non soddisfano determinate caratteristiche.

Viene dichiarato che tutti i dati specifici vengono utilizzati per la valutazione, mentre i dati generici al fine di essere utilizzati necessitano di soddisfare alcune caratteristiche (temporali, geografiche e tecnologiche). Nel caso del consumo elettrico viene preso in considerazione un mix di energia comprata o generata dal gestore, andando a controllare le fatture del singolo allevamento (www.environdec.com).

In questo caso vengono prese in esame due valutazioni effettuate dalla Coop, riguardanti un prodotto di carne di vitello (Coop A, 2020) e una di manzo (Coop B, 2020). Le valutazioni prendono come riferimento i processi di valutazione che riguardano: l'allevamento di bovini, la produzione di mangimi, la produzione di prodotti per la pulizia, l'utilizzo di combustibili e l'uso dell'energia elettrica. Gli allevamenti presi in considerazione hanno tutti un sistema convenzionale.

Nel caso del prodotto di manzo la prima parte di vita dei bovini avviene in Francia, dove sono presi in considerazione i dati di sette differenti allevamenti. All'età di 6 mesi i bovini vengono trasferiti in Italia, qui vengono presi come riferimento i dati di cinque allevamenti, qui vi rimangono fino al raggiungimento dei 640 kg. L'alimentazione per la prima parte della loro vita è composta da erba del pascolo, fieno e orzo, mentre nella seconda fase avviene con

mangimi ricchi di proteine adatti per l'ingrasso. Il prodotto ottenuto ha una percentuale di proteine pari a 20 gr per 100 gr di prodotto (Coop B, 2020).

Mentre nel caso dei vitelli, i quali nascono presso allevamenti di bovini da latte, vengono allevati fino all'età di circa 8 mesi per poi essere macellati, per ottenere i dati sono stati presi in considerazione 3 differenti allevamenti. L'alimentazione dei vitelli avviene per il 55% con siero di latte e per la restante parte con mangimi proteici. Il prodotto finale in questo caso avrà un contenuto proteico di 20,7 g per 100 g di prodotto (Coop A, 2020).

2.1.2.3 Valutazioni di Mattick e Toumisto.

Ulteriori valutazioni LCA prese in esame sono quelle relative agli articoli di Toumisto dell'anno 2011 e di Mattick, le quali riguardano principalmente una valutazione LCA relativa ad un impianto di carne coltivata, ma oltre a questo alla fine degli articoli vi sono anche dati relativi alla produzione di 1 kg di carne tradizionale. Questo perché l'obiettivo dei due articoli è quello di effettuare un confronto. Lo studio di Mattick prende in considerazione i dati del dipartimento dell'agricoltura statunitense, mentre l'articolo di Toumisto come riferimento dei dati di carne prodotta nei paesi europei. Questi 2 tipi di valutazioni riguardano anche la carne suina e di pollame.

2.1.3 Risultati delle valutazioni della carne bovina

Al fine di avere una visione più chiara, i valori di emissioni e di consumi per ognuna delle valutazioni prese in esame vengono riassunte nella tabella 2-1.

Tabella 2-1: Valori di emissioni e consumi per kg. di carne bovina

	Emissioni (kg CO ₂ eq/ kg)	Uso suolo (m ² / kg)	Consumo d'acqua (m ³ / kg)	Consumo energetico (MJ/ kg)
Dati FAO	46	/	15,9	/
EPD vitello	20,4	/	1,25	84
EPD manzo	21,03	/	0,97	115
Studio Tuomisto 2011	48	49,4	14,78	72
Studio Mattick	30,5	92	/	78,6

Come si può notare nella tabella in alcuni casi non vi sono i risultati, questo perché non presenti all'interno della valutazione o nelle informazioni di supporto, come il consumo idrico dello studio di Mattick.

Nel caso della valutazione della FAO, le emissioni causate dall'intera filiera suina a livello globale, sono pari a circa 2810 tonnellate di CO₂eq, 2836 tonnellate se si considerano anche i processi postfarm cioè i processi successivi all'allevamento (i quali non verranno presi in considerazione in questa tesi). Sempre secondo il report i valori di impronta di carbonio dell'intera filiera per kg. di prodotto sono pari a circa 46,2 kg di CO₂eq e 46 CO₂eq senza considerare i processi postfarm (Gerber et al., 2013). Nella figura sottostante (fig. 2-2), dove vi è la composizione delle emissioni totali, vi si può notare che spiccano quelle relative alla fermentazione enterica, che coprono quasi la metà di esse. Seguite dalle emissioni causate dalla gestione e dall'applicazione del letame nei terreni e dal LUC (in particolar modo quello dovuto all'espansione dei pascoli).

I consumi idrici dei bovini provengono per circa il 10% da acqua superficiale e sotterranea e la restante parte da piogge (necessarie per irrigare i terreni ove sono presenti le colture).

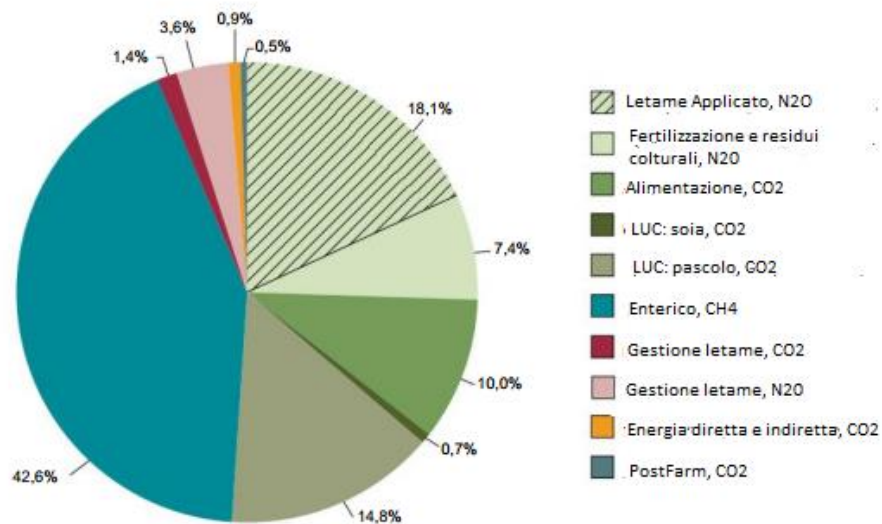


Figura 2-2: Ripartizioni delle emissioni di gas serra dei bovini secondo la FAO (Gerber et al., 2013).

Per quanto riguarda la valutazione EPD della carne di vitello della Coop, le emissioni totali sono pari a: 20,4 kg di CO₂eq su kg di carne, di queste ultime 10,8 kg di CO₂eq derivano dall'utilizzo delle varie fonti fossili utilizzate per l'allevamento e la produzione di mangimi, 9,7 kg di CO₂eq sono di origine biogenica e la restante parte deriva dal cambiamento di uso del suolo. Mentre l'energia utilizzata per il processo (pari a 84 MJ) proviene quasi interamente da fonti di origine fossile.

Nel caso della valutazione EPD riguardante la carne di manzo Coop, i valori di emissioni sono leggermente più alti di quella di vitello, con un valore pari a: 21,03 kg di CO₂eq, di quest'ultima 9,2 kg sono di origine fossile, 7,5 kg di origine biogenica e la restante parte deriva dall'uso del suolo. Mentre i consumi energetici per 1 kg hanno un valore pari a 115 MJ, di quest'ultime una grande fetta provengono da fonti rinnovabili. Infine i consumi idrici sono pari a 0,97 m³ (Coop B, 2020).

Mentre secondo lo studio di Mattick la quasi totalità delle emissioni sono causate dalla fermentazione enterica, dalla gestione del letame e dalla concimazione dei terreni. Sempre questo articolo risulta avere il valore di uso del suolo maggiore di tutti gli altri report presi in considerazione. Infine lo studio di Toumisto, che presenta il valore di emissioni di gas serra maggiori di tutti gli articoli precedentemente elencati, indica che la maggior parte dell'impronta di carbonio per i bovini è causata in primis dalla fermentazione enterica, (contributo maggiore del 50%) seguita dalla gestione del letame.

2.2 Carne suina

2.2.1 Dati e panoramica settore

I suini vengono classificati all'interno del settore monogastrico. Secondo un rapporto della FAOSTAT del 2012, nel 2010 la popolazione suina mondiale è pari a 968 milioni di capi (MacLeod, et al, 2013), questo settore contribuisce al 37% della produzione di carne mondiale, con una quantità pari a circa 124,6 milioni di tonnellate nel 2022. La produzione di suini avviene in quasi tutto il globo, ad eccezione di quelle zone in cui i vincoli culturali e religiosi ne impediscono il consumo. Il 46% della produzione di carne avviene in Cina con circa 57 milioni di tonnellate, seguita da UE con 22 milioni e dagli USA con 12 milioni (fig. 2-3).

Statistiche carne suina	Produzione		Import		Export		Utilizzo	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
	estim.	f'cast.	estim.	f'cast.	estim.	f'cast.	estim.	f'cast.
ASIA	65 015	68 603	7 694	5 808	257	256	72 509	74 098
Cina	53 900	57 620	4 768	2 641	125	131	58 543	60 130
India	330	325	1	1	2	2	329	324
Indonesia	324	330	4	5	-	-	328	335
Giappone	1 318	13 02	1 424	1 503	4	3	2 764	2 795
Malesia	217	215	23	41	3	3	237	253
Filippine	1 188	1 139	332	394	2	2	1 518	1 531
Corea del sud	1 407	1 410	579	720	11	8	2 006	2 073
Thailandia	892	593	1	1	44	28	848	566
Vietnam	3 728	3 882	238	161	11	10	3 954	4 033
AFRICA	1 598	1 609	284	288	33	31	1 850	1 865
Madagascar	26	26	-	-	-	-	26	26
Nigeria	287	285	8	6	-	-	295	291
Sud Africa	320	330	34	35	27	25	326	340
Uganda	131	129	1	-	-	-	131	130
AMERICA CENTRALE E CARAIBI	2 155	2 189	1 544	1 694	355	334	3 344	3 550
Cuba	139	133	19	24	-	-	158	157
Messico	1 693	1 739	1 191	1 296	333	312	2 551	2 723
SUD AMERICA	7 369	7 489	537	500	1 745	1 641	6 161	6 349
Argentina	696	702	50	64	20	5	726	762
Brasile	4 899	4 963	3	3	1 452	1 427	3 451	3 539
Cile	590	592	189	97	267	205	511	484
Colombia	461	493	152	168	-	-	613	661
NORD AMERICA	14 844	14 582	948	1 091	4 536	4 207	11 242	11 424
Canada	2 284	2 261	298	275	1 496	1 441	1062	1 100
USA	12 560	12 321	649	814	3 041	2 766	10 178	10 323
EUROPA	30 843	29 596	1 283	1 445	5 749	4 774	26 376	26 267
Bielorussia	396	391	48	56	43	42	401	405
UE	23 611	22 425	105	144	5 199	4 260	18 517	18 310
Russia	4 304	4 398	44	50	206	158	4 142	4 290
Serbia	300	299	57	66	19	19	338	346
Ucraina	718	623	57	79	8	1	767	701
UK e Irlanda del nord	1 033	971	828	898	259	276	1 603	1 593
OCEANIA	592	574	310	349	42	36	860	887
Australia	443	424	211	258	40	34	615	649
Papua e Nuova Guinea	84	85	7	7	-	-	91	92
MONDO	122 415	124 643	12 600	11 174	12 717	11 279	122 341	124 440

Figura 2-3: Dati del mercato della carne suina a livello mondiale nel 2022 (FAO, 2022).

La Cina risulta essere il maggior consumatore di carne suina con circa 60 milioni di tonnellate consumate, seguito dall'UE con 18 milioni e dagli USA con 10 milioni di tonnellate. La Cina risulta essere il paese con la maggior parte delle importazioni, mentre l'UE è la regione con il maggior export.

Al giorno d'oggi l'allevamento di suini nei paesi sviluppati avviene in allevamenti su larga scala, con uniformità genetica di stabulazione e di alimentazione. Mentre nei paesi poco sviluppati e in via di sviluppo, la produzione avviene ancora su piccola e media scala.

Si prevede che la produzione di carne suina salirà a 127 milioni di tonnellate entro il 2030, con un aumento del 13% rispetto a un livello base 2018-2021 (periodo in cui in numerose zone del globo è avvenuta l'epidemia di peste suina) e beneficiando di rapporti carne/mangime più favorevoli rispetto alla produzione di carne bovina. Questa prospettiva presuppone che la

produzione di carne suina in Cina e Vietnam inizi ad aumentare e raggiunga i livelli di produzioni del 2017 (picco di produzione precedente all'epidemia che ha colpito il settore suino) entro il 2030, mentre nell'UE la produttività di carne suina diminuirà leggermente poiché si prevede che le preoccupazioni ambientali e pubbliche ne limiteranno l'espansione. Mentre per la Russia, il quarto produttore di carne suina, si prevede un aumento del 10% entro il 2030 (OECD-FAO, 2021).

2.2.2 Valutazione dell'impatto ambientale

La valutazione della filiera suina consente di evidenziare le emissioni di gas serra, i risultati sono espressi in kg di CO₂eq per kg di prodotto. L'unità funzionale dell'intero sistema è 1 kg di prodotto. La valutazione, come per i bovini, comprende tutti i processi a monte della produzione di bestiame, cioè l'allevamento e tutte le sue attività correlate, questo viene definito come approccio dalla culla alla fattoria.

Nel caso dei suini, al fine di quantificare la valutazione ambientale, vengono presi in considerazione differenti studi: uno effettuato dalla FAO a livello globale, un altro effettuato in alcuni paesi dell'UE, uno riguardante un allevamento del nord-est della Spagna e i due studi di Mattick e Toumisto, già presi in considerazione per la carne bovina.

2.2.2.1 Valutazione LCA della FAO

La valutazione effettuata dalla FAO (MacLeod. et al, 2013), riguarda tutti i paesi del globo e prende in considerazione tre differenti sistemi di allevamento:

- Industriale: un allevamento completamente chiuso, pavimentato, 100% intensivo, completamente destinato al mercato, cerca di ottenere le migliori prestazioni dai suini e necessita di un elevato capitale.
- Intermedio: parzialmente chiuso, pavimentato, prestazioni della mandria notevolmente ridotta e il 30/50% della razione è costituito da materie prime locale.
- Giardino dietro casa: parzialmente recitato, senza pavimento, ha un livello di capitale minimo, ha un massimo di 20% di mangime non locale, prestazioni molto basse ed è diretto alla sussistenza del mercato locale.

Anche qui come nel caso dei bovini per la raccolta dei dati, gli autori si sono affidati a statistiche dettagliate supportate da pubblicazioni scientifiche e tecniche nel caso dei paesi dell'OCSE, mentre nel caso degli altri paesi dove in molti casi vi sono dati obsoleti e scarsi, gli autori, si sono affidati per quanto possibile a banche dati, pareri di esperti e fonti letterarie.

Lo studio della FAO, come anche per i bovini, si concentra sulle emissioni dei tre principali gas serra associati alla filiera suina, vale a dire N₂O, CO₂ e CH₄, i cui risultati verranno espressi in kg di CO₂eq/ kg di prodotto.

Per effettuare il calcolo è stato progettato un preciso modello, formato, come per la valutazione dei bovini, da cinque moduli: modulo mandria, modulo letame, modulo alimentazione, modulo sistema e modulo allocazione. L'unica differenza sta nel modulo sistema, dove non sono calcolate le emissioni derivanti dalla fermentazione enterica, essendo il suino un monogastrico. Esiste poi un ulteriore modulo che calcola l'energia indiretta associata alla produzione di beni strumentali e al consumo di energia in azienda non correlato alla produzione di mangimi.

Il LUC, come anche per i bovini, indica i cambiamenti diretti e indiretti, che come indicato dall'articolo della FAO, possono comportare numerose transizioni come il disboscamento, il pascolo, la coltivazione, l'abbandono e la ricrescita forestale secondaria. Il dibattito sui fattori chiave della deforestazione è in corso e i nessi causali (diretti e indiretti) sono complessi e poco chiari. Come LUC di deforestazione viene preso in considerazione la deforestazione associata alla coltivazione di soia in Brasile e Argentina nel 2005 (MacLeod. et al, 2013). Le emissioni derivanti dal LUC sono calcolate con lo stesso sistema dei bovini. Lo stesso vale per i consumi d'acqua, dove sono presi come riferimento i dati presenti all'interno del sito della FAO (<https://www.fao.org>).

2.2.2.2 Valutazione LCA nei paesi UE

Nella valutazione effettuata su sette paesi dell'UE (Ruckli et al., 2021), vengono presi in esame 63 allevamenti. Questi ultimi sono sia convenzionali che biologici e hanno etichette riguardanti la non presenza di organismi geneticamente modificati (OGM) nei mangimi e gli standard di benessere animale superiori ai limiti minimi imposti dall'UE. All'interno delle 63 aziende, 56 hanno terreni propri, che producono parte dei foraggi per l'azienda, e sempre di questo totale, 13 aziende si occupano della riproduzione dei capi, 23 per l'ingrasso e la restante parte si occupa di entrambe le azioni. I dati sono stati raccolti tramite delle visite nell'anno 2018 nelle varie aziende consultando i registri aziendali dell'anno 2017.

Per eseguire la valutazione è stato utilizzato il programma SismaPro 9. I dati raccolti in azienda riguardano: le dimensioni e la produttività dell'azienda, il numero di capi allevati, i consumi di energia, la gestione dei mangimi e del letame e il materiale da lettiera. Nel caso della composizione dei mangimi, delle escrezioni di azoto e del mix energetico, non essendo stato possibile raccogliarli in tutte le aziende, vengono presi in considerazione dei dati

predefiniti. La suddetta valutazione non contiene i dati riguardanti gli impatti delle infrastrutture.

2.2.2.3 Valutazione LCA allevamento spagnolo

In questa valutazione viene preso in considerazione un allevamento di suini, il quale contiene al suo interno 1872 capi, questi ultimi vi rimangono per 120 giorni così da avere tre cicli di produzione all'anno, per un totale di 5616 suini allevati. Durante il periodo di permanenza i suini passano da un peso di 25 kg fino a 105 kg. Gli autori hanno diviso la fase di crescita dei suini in tre sottofasi: A (25-40 kg), B (40-60 kg) e C (60-105 kg) in ognuna delle quali sono calcolati i rispettivi input e output. Per quanto riguarda il trasporto della paglia, è stata ipotizzata una piccola distanza di 5 km. Mentre per quanto riguarda il trasporto di mangime per animali, tenendo conto che il mangime è stato acquistato dal mercato locale (molto vicino all'azienda agricola studiata) è stata inclusa una distanza di 20 km. Per la valutazione dell'impatto del mangime non sono stati considerati gli ingredienti che presentano quantità inferiori a 5 g per kg di mangime. Gli ingredienti che sono stati inclusi nei calcoli corrispondono a una massa totale di 0,99 kg per kg di mangime. (Lamnatou et al., 2016).

Al fine di eseguire la valutazione sono stati utilizzati due database: SimaPro 8 e Agri-footprint, quest'ultimo è indicato per LCA del cibo e del settore agricolo.

2.2.3 Risultati delle valutazioni sulla carne suina

Anche qui come nel caso dei bovini i risultati vengono riportati in tabella (tabella 2-2).

Tabella 2-2: Valori di emissioni e consumi per kg. di carne suina

	Emissioni (kg CO ₂ eq/ kg)	Uso del suolo (m ² /kg)	Consumo d'acqua (m ³ /kg)	Consumo energetico (MJ/kg)
Dati FAO	5,75	/	6,7	/
Studio paesi UE	2,67	/	/	14,5
Allevamento spagnolo	5,5	/	/	35,6
Studio Tuomisto 2011	9,86	18,28	4,51	42,54
Studio Mattick	4,1	15,8	/	16

Anche qui come per i bovini, alcuni dati non sono indicati nello studio oppure espressi con unità di misura differenti, così da rendere il confronto non possibile.

Il report della FAO (MacLeod. et al, 2013) stima che l'intensità di emissioni dell'intera filiera suina sia pari a 6,1 kg di CO₂eq e 51,8 kg. di CO₂ per kg di proteine. Di queste ultime, il 5,7% riguardano le emissioni postfarm (fig. 2-4), le quali corrispondono per kg di prodotto a 0,35 kg CO₂eq/kg di prodotto e 2,95 kg CO₂eq/ kg proteine. La ripartizione delle emissioni si può notare nella figura sottostante (fig. 2-4).

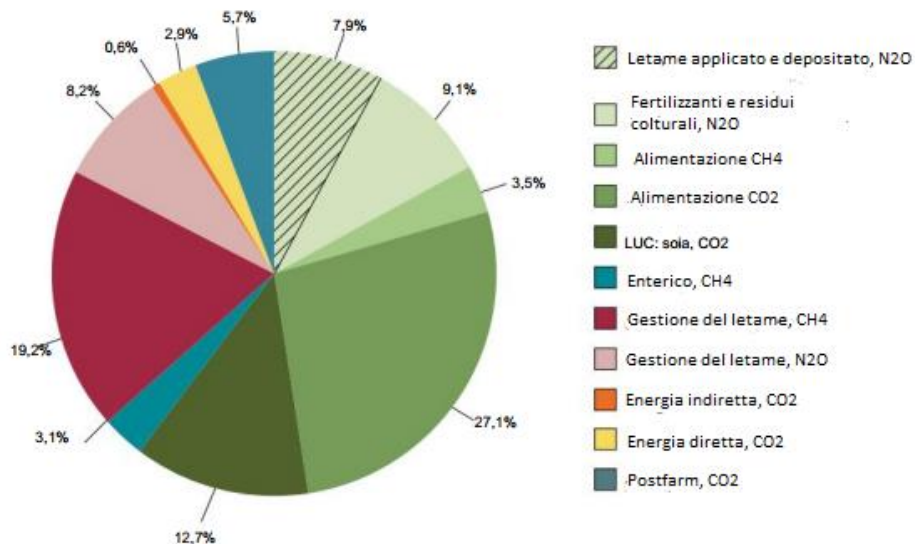


Figura 2-4: Ripartizione delle emissioni di gas serra per i suini secondo la FAO (MacLeod. et al, 2013)

Sempre secondo il report della FAO, la principale fonte d'emissioni di gas serra è la produzione di mangimi (in particolar modo il cambiamento ad uso del suolo e la fertilizzazione dei terreni) e seguita dalla gestione del letame (qui la maggior parte delle emissioni sono riconducibili al CH₄ emesso).

Inoltre nella valutazione effettuata dalla FAO, dei suini vengono anche indicate le emissioni annue per i tre sistemi presi in considerazione, che sono pari a:

- Per i sistemi a cortile a 127,5 milioni di tonnellate di CO₂eq,
- Per il sistema intermedio a 133,9 milioni di tonnellate di CO₂eq,
- Per sistema industriale sono di 406,6 milioni di tonnellate di CO₂eq, come si può notare questo è il sistema più impattante tra i tre, a causa del sistema di allevamento intensivo.

Un' ulteriore differenza si può notare nel caso della quantità d'emissioni per la produzione di mangime nei i tre sistemi presi in considerazione:

- per i sistemi a cortile le emissioni sono pari di 5,3 kg CO₂eq/ kg peso della carcassa (CW),
- per i sistemi intermedi le emissioni sono pari a 5,8 kg CO₂eq/ kg CW,
- per i sistemi industriali le emissioni sono pari a 5,2 kg CO₂eq/ kg CW.

I sistemi intermedi hanno un'impronta di carbonio maggiore rispetto agli altri due sistemi, le cause sono la minore digeribilità della razione rispetto ai sistemi industriali e il maggiore rapporto di conversione dei mangimi (MacLeod. et al, 2013).

Lo studio di Ruckli relativo agli allevamenti dei paesi dell'UE, indica che i risultati sono stati variabili all'interno dei vari tipi di allevamenti presi in esame. La quantità di emissioni più elevata è stata correlata alla produzione di mangimi (sia quelli prodotti in azienda, sia quelli acquistati), seguito dalle emissioni causate dalla gestione del letame.

Nello studio effettuato sull'allevamento spagnolo, gli autori indicano che la prima fonte di emissioni di gas serra è la produzione di mangimi (associato in particolar modo all'uso di fertilizzanti in campo), seguita dal trasporto di quest'ultimi dall'azienda di produzione fino all'allevamento. Mentre la produzione di lettiera ha evidenziato gli impatti più bassi.

Lo studio di Mattick, indica che la maggior parte delle emissioni sono causate dalla preparazione dei mangimi e tutte le attività connesse come la fertilizzazione e la gestione del letame.

2.3 Carne di pollame

2.3.1 Dati e panoramica del settore

La popolazione mondiale di pollame nel 2010 è stata stimata a quasi 22 miliardi di capi, quasi 3 volte di più rispetto al 1980, con i polli che costituiscono il 90% della popolazione (inclusi quasi 6 miliardi di galline ovaiole), mentre la restante parte è formata da: anatre, oche e tacchini. Il settore del pollame contribuisce alla produzione di circa il 33% della carne consumata a livello mondiale (MacLeod. et al, 2013).

Come si può notare dalla fig. 2-5 la produzione globale di carne di pollo nel 2022 è stimata a 138,8 milioni di tonnellate, in aumento marginale dello 0,6% rispetto al 2021, il ritmo di crescita più lento mai registrato, guidato principalmente dalla scarsità di forniture derivante dall'aumento dei costi dei mangimi e dei prezzi dell'energia (FAO, 2022).

La Cina e gli Usa nel 2022 (fig. 2-5) si contendono la leadership produttiva, con una produzione di circa 20 milioni di tonnellate per paese, seguiti da Brasile e UE. Il maggior consumo di carne avicola avviene sempre in Cina, con un consumo pari a 25 milioni di tonnellate, seguito da USA e Brasile. Relativamente all'export la nazione regina è il Brasile con circa 4 milioni di tonnellate di carne avicola, mentre la Cina detiene come nel 2021 il record delle importazioni (FAO, 2022).

Statistiche carne di pollame	Produzione		Import		Export		Utilizzo	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
	estim.	f'cast.	estim.	f'cast.	estim.	f'cast.	estim.	f'cast.
ASIA	54 044	53 927	7 194	7 434	3 043	3 358	58 156	57 996
Cina	24 617	24 158	1 821	1 676	678	827	25 759	25 006
India	3 767	3 822	-	-	4	4	3 764	3 818
Indonesia	3 889	3 939	-	-	2	2	3 887	3 937
Iran	2 183	2 107	70	105	33	16	2 220	2 195
Giappone	2 383	2 403	1 316	1 356	6	6	3 694	3 744
Kuwait	58	60	146	150	9	10	195	201
Malaysia	1 553	1 505	97	169	63	60	1 586	1 614
Sud Corea	1 018	1 013	198	240	45	67	1 166	1 191
Arabia Saudita	910	930	632	514	47	52	1 495	1 392
Thailandia	1 827	1 855	2	2	1 219	1 288	576	568
Turchia	2 305	2 493	41	56	666	763	1 679	1 786
AFRICA	6 803	6 845	2 327	2 321	115	124	9 011	9 042
Angola	63	63	276	287	-	-	339	351
Sud Africa	1 915	1 926	433	431	56	58	2 292	2 299
AMERICA CENTRALE E CARAIBI	5 439	5 573	1 970	1 974	38	50	7 372	7 498
Cuba	37	37	340	332	-	-	377	369
Messico	3 707	3 815	1 092	1 089	10	20	4 789	4 884
SUD AMERICA	23 054	23 417	464	450	4 810	5 226	18 708	18 641
Argentina	2 295	2 336	11	19	216	225	2 090	2 131
Brasile	15 098	15 195	5	5	4 407	4 787	10 696	10 413
Cile	752	782	187	195	178	205	761	772
NORD AMERICA	24 682	25 226	386	405	4 091	3 967	21 034	21 611
Canada	1 494	1 532	210	193	183	164	1 520	1 561
USA	23 188	23 694	173	208	3 908	3 803	19 510	20 046
EUROPA	22 276	22 153	2 064	2 232	3 607	3 417	20 738	20 962
UE	13 295	13 176	598	716	2 178	2 095	11 715	11 797
Russia	4 632	4 787	256	161	338	348	4 555	4 595
Ucraina	1 375	1 257	128	83	464	426	1 038	914
UK e Irlanda del nord	1 987	1 936	838	1 016	384	332	2 441	2 620
OCEANIA	1 604	1 646	117	119	81	91	1 639	1 674
Australia	1 345	1 399	3	5	52	62	1 296	1 343
Nuova Zelanda	226	216	1	1	29	30	198	188
MONDO	137 901	138 787	14 522	14 935	15 789	16 233	136 658	137 424
LIFDC	2 398	2 404	1 655	1 631	12	14	4 041	4 021
LDC	3 738	3 788	1 359	1 389	20	20	5 078	5 157

Figura 2-5: Dati del mercato della carne di pollame a livello mondiale nel 2022 (FAO, 2022).

Per l'anno 2030, si ritiene che la carne di pollame continuerà a essere il motore principale della crescita della produzione di carne (sebbene aumenti a un ritmo più lento rispetto all'ultimo decennio), questo secondo gli autori avverrà: perché i rapporti carne/mangime sono più favorevoli rispetto ad altri ruminanti e insieme al suo breve ciclo di produzione, che consente ai produttori di rispondere rapidamente ai segnali del mercato. La produzione si espanderà rapidamente grazie agli incrementi di produttività sostenuti in Cina, Brasile e Stati Uniti e agli investimenti effettuati nell'UE (OECD-FAO, 2021).

2.3.2 Valutazione dell'impatto ambientale

La valutazione nel caso della filiera dei polli da carne consente di ottenere le emissioni di gas serra e i risultati sono espressi in kg di CO₂eq per kg di prodotto. L'unità funzionale dell'intero sistema 1 kg di prodotto. La valutazione LCA comprende tutti i processi a monte della produzione dei fino alla fattoria, dove gli animali o i prodotti lasciano l'azienda, vale a dire la produzione di fattori di produzione e le attività di produzione in azienda, viene definita come dalla culla alla fattoria.

In questo caso, al fine di avere un quadro generale si andranno a prendere in considerazione differenti valutazioni: una effettuata dalla FAO, le già menzionate valutazioni di Toumisto e Mattick e due valutazioni EPD effettuati su due prodotti dell'azienda Fileni.

2.3.2.1 Valutazione LCA della FAO

La FAO (MacLeod. et al, 2013) come anche per bovini e suini ha effettuato una valutazione di impatto ambientale nell'anno 2012, al fine di quantificare le emissioni globali emesse dagli allevamenti per la produzione di carne di pollo. In questo caso prende come riferimento due differenti tipi di allevamento: commerciali e i sistemi da cortile. Per la raccolta dei dati vengono utilizzate le stesse metodiche indicate nella valutazione dei bovini. Come per gli altri tre tipi di carne vengono quantificate le emissioni dei 3 principali gas serra emessi: CH₄, N₂O e CO₂.

Il sistema per effettuare la valutazione è lo stesso utilizzato per quella delle emissioni suine, formato da cinque moduli: modulo mandria, modulo letame, modulo alimentazione, modulo sistema e modulo allocazione. Anche in questo caso per quantificare le emissioni relative all'uso del suolo, la FAO utilizza lo stesso sistema usato per i due precedenti tipi di carne presi in esame. Infine, come per i bovini e i suini vengono presi come riferimento dei consumi d'acqua per kg di prodotto presenti all'interno del sito della FAO (<https://www.fao.org>).

2.3.2.2 Valutazioni EPD Fileni

Questa EPD consente la valutazione di prestazione ambientale di una carne di pollame, con un processo da monte a valle, cioè dalla culla fino al consumo. In questa tesi però, ci si occuperà soltanto della fase definita “dalla culla al cancello”, che va a prendere in considerazione il solo processo di allevamento e tutte le sue attività connesse come: coltivazione terreni, produzioni di mangimi, prodotti per la pulizia e la sanificazione, produzioni di fertilizzanti e consumo energetico. I dati raccolti, come anche nel caso delle EPD riguardanti la carne bovina, sono classificati in:

- Dati specifici,
- Dati generici: che si dividono a loro volta in dati generici selezionati e dati proxy.

L’articolo dichiara che tutti i dati specifici vengono utilizzati per la valutazione, mentre i dati generici al fine di essere utilizzati necessitano di soddisfare alcune caratteristiche (temporali, geografiche e tecnologiche). Nel caso del consumo elettrico viene preso in considerazione un mix di energia comprata o generata dal gestore, andando a controllare le fatture del singolo allevamento.

La valutazione EPD a prodotti di carne avicola attualmente è stata eseguita dall’azienda Fileni, su due differenti tipi di prodotto: un petto di pollo biologico ed uno convenzionale senza OGM.

Nel caso del pollo biologico, i dati sono stati raccolti nell’anno 2020 su 19 tipi di allevamenti, i quali rispettano le esigenze del benessere animale, qui i polli vi rimangono per 83 giorni. I mangimi provengono dal mangimificio di proprietà dell’azienda situato nelle vicinanze degli allevamenti. Inoltre, i capannoni dove vengono allevati i polli sono coibentati e dotati di pannelli fotovoltaici al fine di produrre energia elettrica. Il prodotto finale avrà un contenuto proteico del 8,5% (Fileni A, 2021).

Nel caso del pollo convenzionale no OGM, i dati sono stati campionati nell’anno 2022 su 20 allevamenti convenzionali, anche questi dotati di capannoni coibentati e pannelli fotovoltaici. I mangimi utilizzati provengono da due mangimifici di proprietà dell’azienda, anche questi situati nelle vicinanze degli allevamenti (Fileni B, 2021).

2.3.3 Risultato delle valutazioni sulla carne avicola

Anche qui come per i due precedenti tipi di carne i risultati sono raccolti in tabella (tabella 2-3).

Tabella 2-3: Valori di emissioni e consumi per kg. di carne di pollame

	Emissioni (kg CO ₂ eq/kg)	Uso del suolo (m ² /kg)	Consumo d'acqua (m ³ /kg)	Consumo energetico (MJ/kg)
Dati FAO	5,03	/	5,7	/
EPD pollo biologico	3,73	/	0,22	23,46
EPD pollo convenzionale	2,61	/	0,24	23,9
Studio Tuomisto 2011	8,9	13,5	1,9	23,3
Studio Mattick	2,3	9,5	/	26,6

L'articolo della FAO (MacLeod. et al, 2013) stima che l'intensità delle emissioni siano pari a 5,4 kg di CO₂eq per kg di prodotto e a 39,5 kg di CO₂ per kg di proteina. Di questi ultimi il 6,4% riguardano le azioni postfarm, le quali sono pari a 0,37 kg CO₂eq/kg di prodotto e 2,53 kg CO₂eq/kg di proteine.

Le principali emissioni, nel caso dei polli destinati alla produzione di carne, sono correlabili alla produzione di mangimi (che corrisponde a circa il 57%) e al LUC. La terza fonte di emissioni più corposa è derivante dall'uso diretto di energia (ovvero riscaldamento, ventilazione e illuminazione in azienda). Le fonti dirette e indirette di N₂O per la produzione di mangimi derivano dalla fertilizzazione dei terreni con prodotti sintetici mentre quelle di CO₂ derivano dall'uso di macchinari nelle operazioni sul campo, dal trasporto, dalla lavorazione delle colture, dalla miscelazione dei mangimi e dalla produzione di materie prime per mangimi non colturali, ad esempio farina di pesce, calce e additivi sintetici (MacLeod. et al, 2013).

Nel caso della valutazione EPD del petto di pollo biologico, la percentuale di emissioni più alta è data dall'utilizzo di fonti fossili (pari a 2,78 kg CO₂eq), seguita da fonti di origine biogenica e da quelle derivanti dal LUC. I consumi energetici derivano, per più della metà, da fonti di origine rinnovabile, inoltre questa valutazione presenta il valore di consumo idrico tra i più bassi presi in esame. Anche per il pollo convenzionale, la fetta più consistente delle emissioni è quella legata alle fonti di origine fossili (2,01 kg CO₂eq), seguita da emissioni di origine biogenica. Anche qui, nel caso dei consumi energetici, una buona fetta da fonti di energia rinnovabili.

Infine lo studio di Toumisto ha riportato il dato più elevato di emissioni (8,9 kg di CO₂eq), e di uso del suolo (13,5 m³/ kg). Mentre nello studio di Mattick è stato evidenziato il valore più elevato di consumo energetico per la produzione di 1 kg di carne (pari a 26,6 MJ/ kg). Sempre lo stesso studio ha evidenziato che la quasi totalità delle emissioni nella carne di pollame è causata dalla produzione di mangimi e dalle attività connesse, come la fertilizzazione dei terreni e il trasporto dalla ditta produttrice fino all'allevamento.

Capitolo 3

IMPATTO AMBIENTALE DELLA CARNE COLTIVATA

3.1 La carne coltivata

La produzione di carne tradizionale è uno dei principali fattori che contribuiscono al degrado ambientale globale. Attualmente, il bestiame allevato per la carne utilizza il 30% della terra terrestre libera dai ghiacci e l'8% dell'acqua dolce globale, mentre produce il 18% delle emissioni globali di gas serra (Tuomisto & Teixeira De Mattos, 2011). Inoltre, questi valori possono aumentare ancora, a causa del consumo sempre più crescente di carne, causato dall'aumento della domanda di quest'ultima nei paesi in via di sviluppo, soprattutto la Cina. L'industria alimentare sta cercando, al fine di diminuire l'impatto ambientale, di creare dei degni sostituti della carne tradizionale, quali insetti, carne vegetale ma soprattutto la carne coltivata detta anche carne artificiale. In quest'ultima viene riposta una grande speranza, perché una gran parte dei consumatori continua a vedere la carne "attraente". Di conseguenza, il target di vendita può essere rappresentato dai consumatori che vogliono essere più sostenibili ma che tendenzialmente sono più restii a cambiare i loro stili di vita. Altri fattori trainanti per la produzione di carne basata sulle cellule, oltre l'ambiente e la sostenibilità, sono: la sicurezza alimentare, la salute/sicurezza pubblica e dei consumatori e i problemi di benessere degli animali associati alla produzione di carne (Warner, 2019).

La carne coltivata viene preparata all'interno di un bioreattore attraverso la crescita di cellule animali, in un particolare terreno di crescita. Alla fine dell'intero processo avremo la produzione di un tessuto animale, il quale potrà essere utilizzato per la produzione di hamburger, macinato e altri numerosi prodotti. Di bioreattori ne esistono numerosi tipi e tra questi si può annoverare il bioreattore a fibra cava, il quale mostra numerosi vantaggi come il design compatto, che ne riduce l'ingombro, la struttura in acciaio inossidabile, che ne facilita le operazioni di pulizia e sanificazione (Tuomisto et al., 2022). Al suo interno le cellule vengono alimentate con un terreno di coltura ricco di ossigeno, amminoacidi, glucosio, vitamine e sali inorganici. Sempre all'interno del bioreattore sono presenti fibre di Polistirene come impalcature definite *scaffold*, che aiutano a creare la struttura del prodotto finale.

3.2 Dati sul settore

L'anno 2022 è stato molto importante per la carne coltivata in laboratorio, infatti ha prodotto nuove scoperte che hanno ulteriormente aumentato lo slancio di questo nuovo settore. Le aziende del settore della carne coltivata sono aumentate fino a toccare quota 156, facendola ormai diventare un'industria globale. Sono aumentati inoltre anche le partnership tra le aziende e gli investimenti totali su questo settore, i quali sono stati sempre in ascesa, anche se nell'ultimo anno sono stati inferiori al 2021 e al 2020 e questo è dovuto alla recessione avvenuta nel periodo post-covid (figura 3-1).

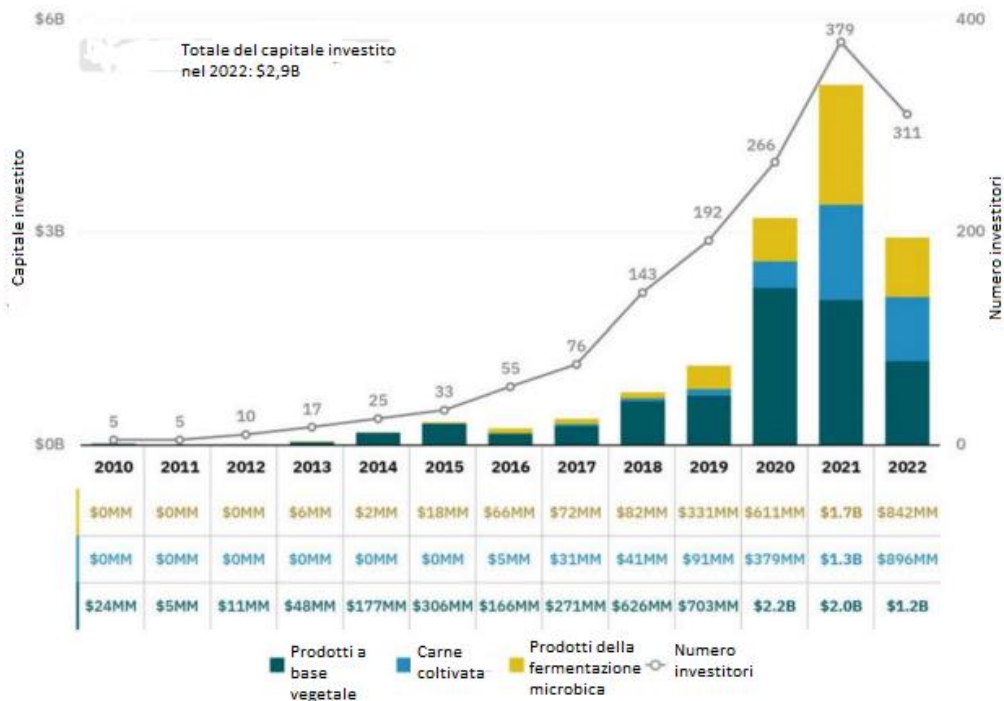


Figura 3-1: Investimenti nel settore delle proteine alternative dal 2010 (Bushnell et al., 2022).

Al giorno d'oggi prodotti a base di carne coltivata possono essere commercializzata solo negli USA e a Singapore, grazie alla validazione da parte dell'ente della sicurezza alimentare nazionale. Anche altri stati come Israele, l'Australia e la Nuova Zelanda hanno intenzione nel breve periodo di liberalizzare il commercio di carne coltivata. Altri paesi come Giappone, Canada e Cina, al giorno d'oggi stanno valutando la commercializzazione. Nell'Unione Europea, la carne coltivata prodotta senza l'uso di modificazioni genetiche è regolamentata come nuovo alimento. Allo stesso tempo i prodotti sviluppati, utilizzando

l'ingegneria genetica, possono invece rientrare nel regolamento sugli alimenti e sui mangimi geneticamente modificati. Le aziende devono presentare domanda alla Commissione europea per l'autorizzazione pre-commercializzazione di tutti i prodotti a base di carne coltivata. L'Autorità europea per la sicurezza alimentare (EFSA) effettua quindi una valutazione della sicurezza per ciascun prodotto, se i risultati della valutazione della sicurezza dell'EFSA sono favorevoli, la Commissione europea, insieme ai rappresentanti degli Stati membri dell'UE, ha l'autorità di concedere l'approvazione finale (Bushnell et al., 2022).

Attualmente un limite legato alla produzione di carne coltivata è il costo, che è stimato al di sopra dei cento dollari al kg. Inoltre sono stati creati due studi tecnico-economici del 2022 che prendono in considerazione due ipotetici impianti nel futuro e ne valutano il prezzo (Bushnell et al., 2022):

- I ricercatori della UC Davis, che hanno preso in considerazione un impianto di produzione a serbatoio agitato da 42 m³ o 210 m³ o in un reattore a ponte aereo da 260 m³, indicano il costo tra 17 e 35 dollari al kg.
- I ricercatori dell'Oklahoma State University hanno valutato il costo di produzione in una struttura più piccola situata a San Francisco, il quale prende in considerazione: il processo di produzione, l'inattività del sistema e gli stipendi. Secondo i ricercatori il costo della carne dovrebbe aggirarsi intorno ai 63 dollari al kg.

Un ulteriore limite è quello del sapore della carne, infatti a detta di molti consumatori interrogati nei test di assaggio è risultato differente rispetto alle carni tradizionali.

Attualmente al fine di venire in contro a questi due problemi sono stati prodotti hamburger “ibridi” formati da una parte vegetale e da una parte costituita da carne coltivata. Questi consentono sia di dare un gusto al prodotto finale, ma anche di abbattere parte dei costi, che renderebbero il prodotto invendibile (Kim et al., 2022).

Sempre secondo il report del 2022 (Bushnell et al., 2022), la carne coltivata nonostante i progressi finora effettuati ha una quota ancora insignificante nel mercato della carne globale, però si prevede che la quota mondiale raggiunga la doppia cifra entro il 2040 e potrebbe anche raggiungere il 35% del mercato totale della carne negli anni successivi. Mentre il report della Kearney, un'azienda di consulenza specializzata in scenari mondiali, prospetta che per il 2030 la carne coltivata produrrà il 10% della carne nel mondo, mentre nel 2040 questa cifra salirà al 35%. Secondo entrambi i report la principale sfida per portare la produzione di carne coltivata su larga scala in doppia cifra a livello mondiale sarà quella di diminuire i prezzi, questo potrà avvenire con la realizzazione di impianti con portate più

elevate rispetto agli attuali e l'utilizzo di energie rinnovabili (che possono abbattere notevolmente i costi di produzione).

3.3 Cellule staminali

La prima sfida che si deve affrontare per la produzione di carne coltivata è la scelta delle cellule da coltivare. Nella carne tradizione la formazione delle cellule muscolo viene definita Miogenesi e inizia durante la formazione del feto e termina con la sua nascita, successivamente le cellule possono accrescersi e allungarsi. Nel caso della carne coltivata per effettuare la formazione del tessuto, bisogna utilizzare particolari tipi di cellule che vengono definite staminali. Le cellule staminali sono un particolare tipo di cellule, che a differenza di quelle normali, possono:

- auto rinnovarsi: creano una copia di sé stesse attraverso la duplicazione,
- differenziarsi: diventano una cellula adulta con determinate funzioni.

Le cellule staminali hanno come caratteristiche la longevità e la derivazione ed entrambe queste caratteristiche vanno ad influire con la coltura cellulare; infatti le cellule con bassa longevità devono essere spesso ricambiate, andando a gravare sui costi dell'azienda.

Esistono numerosi tipi di cellule staminali (Warner, 2019):

- Cellule staminali embrionali: hanno longevità pressoché illimitata, ma possono differenziarsi in una qualsiasi cellula. Potrebbero essere adatte alla coltivazione di carne, ma non vengono utilizzate a causa della loro difficile proliferazione e differenziazione.
- Cellule staminali tessuto-specifiche: generano specifiche cellule in base al tessuto da dove provengono e si dividono circa 50 volte.
- Cellule staminali pluripotenti: sono particolari tipi di cellule che grazie all'ingegneria genetica vengono trasformate da cellule normali a staminali e la loro longevità è ancora pressoché sconosciuta.
- Cellule staminali miosatelliti: sono utilizzate per la produzione di carne sintetica.

Le cellule staminali miosatelliti si differenziano in una cellula muscolare e quindi sono l'ideale per la produzione di carne coltivata, anche se il mantenimento di un'alta qualità di quest'ultime risulta impegnativo. Vengono prelevate tramite biopsia nell'area della colonna vertebrale su degli animali sacrificabili, oppure come avviene in Israele il punto di partenza sono le cellule staminali embrionali (Warner, 2019).

3.4 Sistema di produzione

Dopo aver effettuato l'inoculo all'interno del bioreattore avviene la produzione vera e propria della carne. Qui è presente un adeguato ambiente di crescita, delle temperature ottimali, ossigeno e un terreno ricco di fattori e nutrienti. La prima fase (fig. 3-2) di questo processo è la proliferazione delle cellule staminali, successivamente avviene la fase di differenziazione, qui deve essere aggiunto lo *scaffold*, cioè fibre di collagene che fungono da impalcatura. Ognuna di queste fasi avviene all'interno di un bioreattore separato, ognuno dei quali deve lavorare in condizioni asettiche, che debbono essere mantenute per tutto il processo al fine di evitare la proliferazione di microrganismi patogeni e alteranti (Warner, 2019).

La prima fase è l'inoculo delle cellule staminali prelevate dall'animale nel bioreattore, dove è stato già predisposto il terreno di coltura.

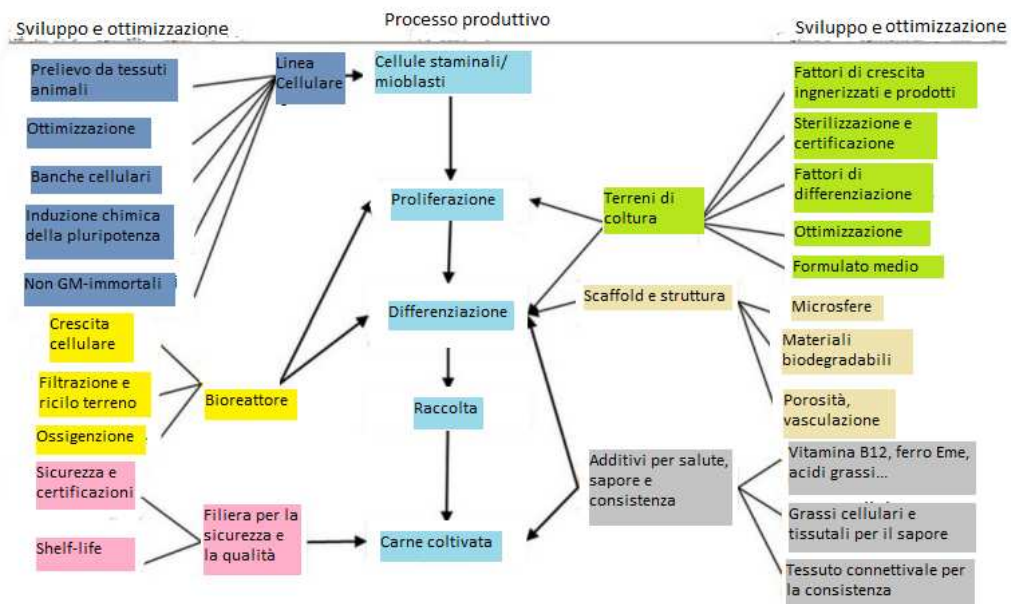


Figura 3-2: Sistema di produzione della carne coltivata (Warner, 2019).

3.4.1 Terreni di coltura

Il terreno di coltura utilizzato nella maggioranza dei casi per la produzione di carne coltivata è il Dulbecco's Modified Eagle Medium (DMEM) integrato con un siero fetale di bovino (FBS) che viene aggiunto sotto forma di polvere. Il siero fetale bovino è una miscela complessa derivata dal sangue animale che contiene fattori di crescita, altre proteine, ormoni, lipidi e nutrienti. Però il principale obiettivo della carne coltivata è quello di ridurre al minimo gli ingredienti di origine animale e quindi evitare l'utilizzo del FBS, quindi è stato messo a punto il terreno Essential 8, che non necessita l'aggiunta di siero fetale (Warner, 2019). Però

quest'ultimo necessità di tempi più lunghi per la fase di proliferazione, anche fino a 25 ore mentre i normali terreni ne impiegano 20 (Tuomisto et al., 2022). I terreni di coltura devono essere ricchi di nutrienti come carboidrati, proteine, lipidi e vitamine perché debbono sostituire il torrente sanguigno, il quale fornisce ossigeno ai tessuti muscolari animali. Qui bisogna fare una considerazione molto importante sul terreno, infatti per produrre un kg di carne devono essere utilizzati 23 l di terreno, i quali al giorno d'oggi hanno un costo di circa 5 dollari americani, che vanno a gravare sui costi aziendali (Vural Gursel et al., 2022).

Come indicato dallo studio di Tuomisto del 2011, il terreno di coltura può essere prodotto a partire dall'idrolisi dei *Cianobatteri*. Soltanto il 50% dell'idrolizzato viene utilizzato come terreno di crescita, perché l'altra parte viene persa sotto forma di CO₂. Di questo 50%, come indicato dall'autore, soltanto l'80% viene utilizzato per la produzione di carne, mentre la restante parte viene utilizzata per la digestione anaerobica. Alcuni dei fattori di crescita che possono essere utilizzati per l'accrescimento e la differenziazione cellulare, possono essere prodotti a partire da batteri ingegnerizzati del tipo *escherichia coli*, al tutto debbono essere integrati specifici fattori di crescita e vitamine. Prima di essere utilizzato, il terreno deve essere sterilizzato tramite l'uso di un'autoclave (Tuomisto & Teixeira De Mattos, 2011).

3.4.2 Fase di proliferazione

Subito dopo l'inoculo avviene la fase di proliferazione, durante questa fase avverranno le divisioni delle cellule staminali che porteranno l'aumento in numero di queste ultime. In questa fase si andrà ad inserire all'interno del sistema un conservante, il benzoato di sodio, il quale viene aggiunto al fine di bloccare la proliferazione di lieviti e muffe (Warner, 2019), inoltre dovranno essere mantenute le condizioni asettiche del sistema. In questa fase la temperatura all'interno dei bioreattori viene portata a circa 37 °C, cioè la temperatura ottimale di crescita per le cellule staminali e il riscaldamento del sistema avviene grazie ad una camicia interna al bioreattore (Tuomisto et al., 2022). Inoltre dovrà avvenire il ricambio costante di nutrienti e ossigeno.

Infine l'intero processo di produzione può avvenire in un singolo recipiente o in più recipienti messi in serie tra di loro, le cui dimensioni vanno via via aumentando così da ottenere un aumento maggiore di cellule (Sinke et al., 2023).

3.4.3 Fase di differenziazione

In questa fase le cellule staminali andranno a differenziarsi in miotubi, anche qui la temperatura, sempre grazie alla camicia interna del bioreattore, deve essere mantenuta a 37 °C, la quale consente la massima velocità del processo di differenziazione dalla cellula. Qui le

cellule necessitano di un supporto, che può essere un'impalcatura a rete di collagene oppure un vettore di microsfele di collagene definito *scaffold* (Warner, 2019). L'impalcatura di collagene consente ai microtuboli di fondersi in miofibrille le quali vanno a formare il tessuto della carne, inoltre gli *scaffold* facilitano il flusso di nutrienti, ossigeno e rifiuti. L'unione tra le cellule e il collagene del reticolo avviene grazie ai recettori dell'istidina presenti nel sarcolemma. Anche in questa fase deve esserci un continuo ricambio di nutrienti e ossigeno. Inoltre, al fine di favorire il processo di differenziazione, la coltura cellulare deve essere sottoposta a stimoli elettrici o meccanici (agitazione da parte di una girante).

Successivamente avviene la rimozione delle cellule dalla matrice, questo avviene grazie all'utilizzo di mezzi chimici e alla manipolazione del pH o della temperatura. Inoltre, se lo scaffold risulta commestibile, può anche essere incluso nella miscela della carne, ma questo non è possibile dato l'elevato costo di produzione e la capacità di essere riutilizzato per ulteriori cicli di lavoro.

3.5 Valutazione impatto ambientale della carne coltivata

L'obiettivo dei vari studi effettuati fino ad ora sull'argomento è quello di quantificare le emissioni di gas serra, l'uso del suolo, il consumo di acqua e di energia per kg di prodotto, per gr di proteina e per la produzione annua dell'impianto. I seguenti valori verranno poi confrontati, nel successivo capitolo, con le valutazioni di impatto ambientale sulla produzione delle tre carni più consumate al mondo oggi giorno: quella bovina, quella suina e infine quella di pollo, effettuate nel precedente capitolo. Tutto questo al fine di valutare se la carne coltivata può essere un valido sostituto della carne tradizionale, allo scopo di diminuire l'impatto ambientale. A differenza però della carne tradizionale, a causa del numero di fonti limitate e della riservatezza di dati di alcune aziende, al momento non è possibile alcuna suddivisione in diversi tipi di carne (es. manzo, pollo).

3.5.1 Unità funzionale

L'unità funzionale presa in esame dai vari studi consultati è di 1 kg di prodotto, ad eccezione dello studio di Tuomisto del 2011, dove l'unità funzionale presa in considerazione è di 1000 kg di prodotto.

Per quantificare le emissioni, tutti gli studi considerati, ad eccezione di uno, hanno preso in considerazione come confini del sistema l'approccio "dalla culla al cancello" e le fasi che ne fanno parte sono: l'ingresso degli input, la produzione di materiali di input e combustibili, la produzione della materia prima e la crescita delle cellule muscolari. Invece lo studio

effettuato dalla ditta SCiFi Foods considera anche gli impatti degli input di origine vegetale (come soia), i quali andranno ad essere aggiunti al prodotto durante la fase di lavorazione, questi ultimi però non verranno presi in considerazione in questa tesi.

3.5.2 Valutazioni prese in esame

Al fine di avere una visione più completa sull'argomento, vengono presi come riferimento diversi studi effettuati sull'argomento.

3.5.2.1 Studio di Tuomisto 2011

Lo studio effettuato da Tuomisto (Tuomisto & Teixeira De Mattos, 2011) prende in considerazione come unità funzionale 1000 kg di prodotto, la cui possibile coltivazione avviene in tre differenti paesi: Spagna, Thailandia e California. Viene indicato che le specie in cui vengono prelevate le cellule non influiscono sull'esito di questo studio, in quanto le specie hanno un impatto solo sul tipo di fattori di crescita utilizzati e ciò non modifica l'impatto ambientale. Il prodotto finale avrà una percentuale di sostanza secca del 30% e un contenuto proteico del 19% della massa.

La prima fase di produzione della carne coltivata coincide con la coltivazione dei *Cianobatteri*, i quali tramite la loro idrolisi e successive trasformazioni producono la biomassa, la quale sarà necessaria per la crescita delle cellule. Parallelamente a questa fase, avviene la produzione di fattori di crescita da parte di *Escherichia Coli* ingegnerizzata, i quali andranno ad essere aggiunti al terreno. Quest'ultima parte non viene presa in considerazione nella valutazione, perché secondo gli autori, l'impatto energetico è minimo e quindi trascurabile.

La coltivazione dei *Cianobatteri* si presume avvenga, in uno stagno con 30 cm di profondità e la raccolta avviene utilizzando dei filtri a nastro a vuoto continuo. Dopodiché si presume che la biomassa venga trasportata per 50 km e per effettuare questo si necessita di un fabbisogno di 2,6 MJ per km (Tuomisto & Teixeira De Mattos, 2011).

Per la fabbricazione del prodotto, l'articolo ipotizza una produzione su larga scala. La prima fase è la sterilizzazione del terreno di coltura tramite l'utilizzo di un'autoclave, che può contenere fino a 1500 litri di biomassa e l'intero processo ha una durata di 20 minuti. Tutto questo comporta un consumo pari a 140 kWh di energia.

Dopodiché avviene la coltivazione all'interno di un bioreattore a cilindro agitato con un volume di 1000 litri, con un diametro di 0,86 m e un'altezza di 1,72 m. L'articolo indica che il volume della coltura è di 30 m³, ipotizzando una densità massima delle cellule muscolari di 1 x 10¹² cellule dm³ e un peso di una cellula di 1 x 10¹² kg. Pertanto, ogni reattore con un

volume di 1 m³ produce 10 kg di carne coltivata durante 60 giorni a 37°C (Tuomisto & Teixeira De Mattos, 2011).

I dati di inventario utilizzati per il processo sono indicati nella figura 3.3

Tabella 2: dati inventario

Coltivazione cianobatteri	
Energia per coltivazione (MJ/m ² /gg)	0.0439
Energia per crescita (MJ/m ² /gg)	0.0015
Energia per costruzione e mantenimento (MJ/m ² /ann)	4.02
Urea	
Input (kg/ kg cianobatteri DM)	0.11
Input di energia primaria per coltivazione (MJ/kg)	22.94
Emissioni per produzione (kg CO ₂ eq/kg)	1.35
Fosfato diammonio	
Input (kg cianobatteri)	0.11
Input di energia primaria per produzione (MJ/kg)	11.68
Emissioni per produzione (kg CO ₂ eq/kg)	1.25
Totale di biomassa di cianobatteri allocata per la coltivazione di carne (kg/U.F.)	720
Sterilizzazione	
Metodo: autoclave volume 1500 L, potenza 140 kWh, temperatura 220°C, tempo 20 min.	
Coltivazione cellule muscolari	
Metodo: bioreattore a cilindro agitato volume 1000 L, altezza 1,72 m, diametro 0,86 m, peso 93 kg, 80 % capacità di riempimento massima, densità cellulare 1 x 10 ⁷ cellule per dm ³ , 60 gg. tempo di un ciclo, 37°C temperatura, 100 rpm rotazione, aerazione 0,05 vvm	

Figura 3-3: Inventario dello studio di Tuomisto (Tuomisto & Teixeira De Mattos, 2011).

Sempre secondo l'articolo, la potenza assorbita per l'agitazione del bioreattore per metro cubo (Pa), è stata stimata a 25 W/m³, per ottenere questo valore è stata utilizzata la seguente formula: $P_a = P_0 \rho N^3 D^5$: dove P_0 è il numero di potenza della girante, 2,14 ρ è la densità media, $1.03 \times 10^3 \text{ kg m}^3$, N^3 è la velocità della girante pari a 1.67 rps; e D^5 è il diametro della girante, 0,30 (si presume essere il 35% del diametro del reattore). Il fabbisogno energetico per l'aerazione è stato stimato in 16 W/m³. Inoltre, l'autore ritiene che il bioreattore sia fatto in acciaio inox e per la produzione di 1kg di quest'ultimo sono necessari 30,6 MJ di energia. Infine l'autore presume che il bioreattore venga utilizzato per 20 anni (Tuomisto & Teixeira De Mattos, 2011).

Mentre per uso di acqua si indica come acqua diretta, l'acqua usata direttamente per il processo di produzione e come acqua indiretta quella utilizzata per la produzione di fonti energetiche. L'impronta idrica include l'acqua blu (acqua di superficie e sotterranea) e acqua verde (acqua piovana). La perdita d'acqua è calcolata separatamente per ciascuna regione di produzione. Si presume che l'acqua di ingresso iniziale per il sistema dei *Cianobatteri* sia acqua di mare. L'input di acqua per la produzione di *Cianobatteri* è costituito dall'acqua necessaria per sostituire l'acqua persa come evaporazione netta (pioggia di evaporazione) e l'acqua incorporata dalla biomassa dei *Cianobatteri*. Di questa acqua incorporata si presume che il 40% vada perso durante la sterilizzazione del terreno e la quantità di acqua necessaria per il processo di coltivazione sia pari a 30 m³. Per quantificare i consumi dei tre paesi vengono presi in considerazione un mix energetico formato da energie rinnovabili e non rinnovabili, tipiche di ognuno dei tre paesi presi in esame (Tuomisto & Teixeira De Mattos, 2011).

In questo studio però, vi è la carenza di un dato fondamentale, la quantità di carne prodotta annualmente dall'impianto preso in considerazione. Però questa carenza è stata superata grazie all'ausilio di alcuni di alcuni dati che erano disponibili nelle informazioni di supporto; il tempo di un ciclo di produzione, che è pari a 60 giorni e la carne prodotta per ogni ciclo di produzione cioè 1000 kg. Effettuando quindi un semplice calcolo si può dedurre che durante l'anno si effettuano 6 cicli di produzione, i quali comportano una produzione annua pari a 6000 kg di carne, cioè 6 tonnellate. Questi dati valgono per tutti e tre gli scenari presi in considerazione.

3.5.2.2 Studio di Smetana

Lo studio effettuato da Smetana (Smetana et al., 2015), non solo va a valutare l'impatto della carne coltivata, ma si valuta anche l'impatto di altri sostituti della carne tradizionale come prodotti a base di farina di soia, di insetti, di micoproteine, di glutine e di latticini. Il metodo utilizzato per la valutazione è il ReCiPe V1.08, tale approccio consente il confronto complessivo dei prodotti a punteggio singolo, nonché un'analisi dettagliata con molteplici fattori di caratterizzazione, come: cambiamento climatico, riduzione dello strato di ozono, tossicità umana, acidificazione, eco tossicità, occupazione del suolo, riduzione di metalli e combustibili fossili. Un'altra metodologia integrata (IMPACT 2002+), che comprende i metodi IMPACT 2002, Eco-indicator 99, CML e IPCC, è stata utilizzata per l'analisi di sensibilità per indicare l'affidabilità dei principali risultati di confronto degli studi. Il LUC è un importante aspetto ambientale dei prodotti alimentari e dei mangimi, ma la sua stima e il suo calcolo non seguono un unico approccio standardizzato. In questo studio al fine di

effettuare il calcolo dell'uso del suolo vengono utilizzati i dati della FAOSTAT relativi all'anno 2012 (Smetana et al., 2015).

Inoltre lo studio ha ipotizzato un contenuto proteico della carne coltivata pari al 26% (Smetana et al., 2015). Le fasi di produzione prese in considerazione dallo studio di Smetana, nel caso della carne sintetica le seguenti:

- Coltivazione dei *Cianobatteri*, al fine di produrre la biomassa di crescita delle cellule e la raccolta di quest'ultima, in questo caso gli autori prendono come riferimento il sistema indicato da Tuomisto.
- La crescita della carne all'interno dell'idrolizzato dei *Cianobatteri*, dove sono aggiunti i fattori di crescita come vitamine.

3.5.2.3 Studio Mattick.

Lo studio effettuato da Mattick ed altri autori (Mattick et al., 2015) consente di valutare il consumo energetico del ciclo di vita, il potenziale di riscaldamento globale, il potenziale di eutrofizzazione e l'uso del suolo associato alla coltivazione di biomassa in vitro, con un modello su larga scala come tecnologia alimentare emergente negli Stati Uniti.

L'impianto preso in considerazione dagli autori potrebbe produrre 66000 kg di prodotto annuo, il quale conterrà un 7% di proteine. La prima fase del processo preso in esame è la raccolta delle cellule miosatellite dall'animale e la preparazione dei terreni di coltura. Questi ultimi hanno come componenti basilari: glucosio, acqua e miscele predefinite denominate "terreni basali" che contengono aminoacidi, lipidi, vitamine e sali. Infine avviene il trasporto del terreno di coltura all'impianto di lavorazione.

L'inventario del ciclo di vita si basa su un precedente studio. La fase di proliferazione inizia con una densità di coltura iniziale di 2×10^5 cellule/ml in un bioreattore a serbatoio agitato contenente terreno basale, in questa fase c'è un tasso di crescita di 0,0254 cellule per ora. Questa fase termina con il raggiungimento di 4×10^6 cellule/ml o 210 kg di biomassa, che viene raggiunto in circa 5 giorni. La seconda fase è quella di differenziazione, dove si avrà la fusione con i microtubuli degli scaffold; questa fase dura circa 7 ore. L'autore presume che l'impianto abbia una superficie di 717 m². Il prodotto finale avrà una percentuale di sostanza secca del 17% e un contenuto proteico del 7%. LCA descritto è un'analisi dall'inizio alla fine dell'espansione della biomassa delle cellule animali, in vitro, modellata utilizzando il pacchetto software LCA SimaPro 7.3.3 di PRé Consultants (Mattick et al., 2015).

Il consumo energetico industriale è stato calcolato utilizzando il metodo della domanda cumulativa di energia, che converte gli apporti energetici finali in apporti energetici primari

utilizzando valori di riscaldamento fissi per i combustibili. L'uso del suolo è stato rilevato mediante il metodo dell'impronta ecologica, che quantifica l'occupazione diretta del suolo associata alle attività umane. Sebbene questo metodo stimi anche i valori del suolo integrato nel tempo necessario per produrre combustibili e assimilare rifiuti, gli usi indiretti del suolo sono esclusi da questa analisi. Tutti gli altri impatti sono stati rilevati tramite i metodi di caratterizzazione del Center of Environmental Science of Leiden University dell'anno 2001, che esprimono gli impatti ambientali in termini di utilizzo delle risorse ed emissioni, piuttosto che dei risultati realizzati. Un esempio di quest'ultima è il potenziale di riscaldamento globale che converte le emissioni di gas serra in massa equivalente di CO₂. L'autore presume che l'energia di base della struttura richiesta per l'illuminazione, riscaldamento, ventilazione e altri scopi fosse pari a 513 MJ/m² all'anno.

Per ottenere il prodotto finale è necessario uno stimolo meccanico, il quale si ottiene agitando il fluido tramite la rotazione della girante. La velocità di quest'ultima deve essere sufficientemente elevata da mantenere la sospensione della coltura, ma non così elevata da danneggiare le cellule. Per questo motivo la velocità della girante è spesso limitata a 1,5 m/s. Per compensare il calore prodotto dalla respirazione cellulare, la regolazione termica è stata modellata come il processo di pompaggio di acqua a temperatura ambiente (23 °C) attraverso uno scambiatore di calore nelle pareti del bioreattore.

In questo LCA si presuppone che le procedure di pulizia seguano un processo di tre fasi: il serbatoio viene prima risciacquato con acqua deionizzata e drenata, quindi viene aggiunta una soluzione di idrossido di sodio all'1% p/v, riscaldata da 23 a 77,5 °C e drenata ed infine il serbatoio viene risciacquato nuovamente con acqua deionizzata.

3.5.2.4 Valutazione di un bioreattore a fibra cava

In questo articolo, viene fatta una valutazione di impatto ambientale di un moderno impianto dove la coltivazione avviene all'interno di bioreattori a fibra cava, situato in Galles nel Regno Unito (Tuomisto et al., 2022). Questi ultimi presentano un design compatto, con struttura in acciaio inossidabile che ne favorisce le operazioni di pulizia e di sanificazione. Questo bioreattore consente la coltivazione di 1–2×10⁸ cellule/ml. Il processo di trasformazione è composto da tre bioreattori in serie, al cui interno hanno fibre di polistirene come impalcature.

L'unità funzionale presa come riferimento è 1 kg di prodotto finale, il quale sarà composto dal 30% di sostanza secca e dal 20% di proteine.

L'analisi va a coprire tutte le fasi che riguardano: l'estrazione delle materie prime, la produzione di energia, la produzione di fattori di produzione per il mezzo di coltura della carne

coltivata, i fabbisogni energetici per il bioreattore, le operazioni e il controllo della temperatura e la pulizia del bioreattore. Dall'analisi sono stati esclusi la costruzione dell'impianto e delle attrezzature (es. acciaio inossidabile), il successivo processo di lavorazione e l'imballaggio del prodotto (Tuomisto et al., 2022). Questo perché la durata di un bioreattore è di circa 20 anni e lo smaltimento e il riciclo dell'acciaio ha un impatto minimo ed inoltre perché la carne appena uscita dal bioreattore può non necessitare di trasformazioni, infatti può essere paragonata alla carne cruda. Per giunta l'autore prende in considerazione uno scenario base e degli scenari alternativi.

Come scenario base (CMB) lo studio prende in considerazione come terreno di crescita per la carne in vitro il DMEM, il quale viene aggiunto sottoforma di polvere, a cui viene integrato FBS (10 % del totale durante la fase proliferazione e il 2 % del totale durante la differenziazione). Prima che il mezzo entri nel bioreattore è necessario un riscaldamento a 37°C il quale avviene grazie ad una camicia interna. Il processo consiste in una fase di proliferazione di 16 giorni in cui le cellule si duplicano e in una fase di differenziazione di 7 giorni in cui le cellule si differenziano e si fondono insieme in scaffold e producono proteine. Alla fine del processo avviene anche la separazione per i prodotti secondari in due differenti categorie ossia i prodotti di scarto da quelli potenzialmente preziosi (lattato e ammoniaca) e viene effettuato un riciclo dell'acqua. Per la pulizia e la sanificazione, viene utilizzata una soluzione di idrossido di sodio a 77°C e successivamente avviene una sterilizzazione con vapore a 121°C (Tuomisto et al., 2022).

Inoltre, sempre nello stesso studio è stato preso in considerazione uno scenario di coltivazione alternativo (CMC), dove al fine di ridurre al minimo le fonti di origine animale è stato eliminato l'uso del siero fetale bovino e il substrato di coltura sarà quindi composto da un solo terreno cioè l'Essential 8. Infine viene preso in considerazione un ulteriore scenario, dove il terreno utilizzato per lo scenario di base (composto da DMEM con aggiunta di FBS), subisce una crescita della biomassa del 128% (CMB128) durante il periodo di differenziazione. L'inventario preso in considerazione dagli autori è indicato nella figura 3-4.

	Input	Unità	CMB	CMB128	CMC
Ingredienti	DMEM	L	403.1 (77.1)	176.9 (33.8)	
	FSB	kg	0.19 (0.05)	0.08 (0.02)	
	Terreno senza siero fetale	L			176.9 (30.3)
	Glutamina	kg	0.10 (0.02)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)
Bioprocesso	Acqua del rubinetto	L	403.1 (77.1)	176.9 (33.8)	52.2 (8.9)
	Elettricità media UK	MJ	19.2 (2.9)	8.4 (1.3)	
	Energia eolica	MJ			8.4 (1.3)
	Ossigeno	kg	0.56 (0.06)	0.24 (0.02)	0.24 (0.02)
	Poliestirene	kg	1.10 (0.01)	0.05 (0.005)	0.05 (0.005)
Pulizia del bioreattore	Elettricità media UK	MJ	1.71 (0.17)	0.85 (0.09)	
	Energia eolica	MJ	0		0.85 (0.09)
	Idrossido di sodio	kg	0.06 (0.006)	0.03 (0.003)	0.03 (0.003)
	Acqua del rubinetto	L	17.7 (1.77)	8.2 (0.82)	8.2 (0.82)
Sterilizzazione acque reflue	Elettricità media UK	MJ	15.5 (1.55)	6.8 (0.68)	
	Energia eolica	MJ			1.78 (0.18)
	Outputs				
	Carne coltivata	kg	1	1	1
	Lattato	kg	1.74	0.77	0.77
	Ammonia	g	2.2	1.0	1.0
	Acque reflue	L	420.8	187.0	52.2

Figura 3-4 Inventario dello di Tuomisto sul bioreattore a fibra cava. (Tuomisto et al., 2022)

Come fonti di energia gli autori prendono in considerazione un mix energetico tipico del Regno Unito, composto da energia eolica e solare per il processo di produzione della carne coltivata e per la produzione di aminoacidi. Le fonti energetiche degli altri input non sono state modificate e, pertanto, gli scenari dell'energia eolica e solare non sono completamente indipendenti dai combustibili fossili, i quali sono utilizzati per l'energia del bioreattore, per la produzione di terreni, per la pulizia e la sterilizzazione (Tuomisto et al., 2022).

Come principio generale è stato utilizzato il database Ecoinvent 3.6 (Ecoinvent) quando possibile, come nel caso degli input come energia e gli ingredienti dei terreni di coltura. Le ricette del DMEM e dell'Essential 8 si basavano sugli elenchi degli ingredienti dei produttori dei vari terreni. I dati LCI (figura 3-4) per la produzione di aminoacidi e la produzione di altri ingredienti medi sono basati su due studi precedentemente effettuati. Per quanto riguarda la quantificazione degli impatti di FBS, l'approccio di sostituzione è basato sulla logica presentata in un precedente studio (Tuomisto et al., 2022). Nello scenario di base si è ipotizzato che nessuna dell'acqua utilizzata nel terreno di coltura sia stata riciclata, poiché viene utilizzata acqua marina al fine di raffreddare la camicia interna. Mentre nello scenario alternativo si è ipotizzato il riciclo del 75% di quell'acqua sulla base del recupero di un'unità di purificazione a osmosi inversa, l'acqua prima di rientrare nel sistema necessita di una sterilizzazione mediante microfiltrazione (Tuomisto et al., 2022). Per la decontaminazione delle acque reflue nello scenario di riferimento è stato utilizzato il trattamento termico, mentre non sono state conteggiate nella valutazione le sostanze utilizzate per la rimozione delle impalcature.

Anche in questo caso, come nel primo studio preso in considerazione, vi è la mancanza dei dati relativi alla produzione annua di carne dell'impianto preso in considerazione, però nelle

informazioni di supporto sono indicati alcuni dati utili, come il tempo in giorni di un ciclo di produzione che è pari a 23,6 giorni per lo scenario CMB, 22,4 giorni per lo scenario CMB128 e 25 giorni per lo scenario CMC. Degli ulteriori dati indicati nelle informazioni di supporto sono la quantità di carne prodotta per ciclo di produzione, la quale è pari a 50 kg e il numero di bioreattori dell'impianto cioè 14. Dopo aver effettuato dei calcoli possiamo dire che la produzione annua di carne di un bioreattore a fibra cava è pari a: 10,83 tonnellate nello scenario CMB, 11,41 tonnellate nel CMB128 e 10,22 tonnellate nel CMC.

Inoltre gli autori hanno effettuato un'analisi di sensibilità con il metodo Monte Carlo. Gli intervalli di incertezza utilizzati nell'analisi erano basati sulle deviazioni standard dell'uso di energia del bioreattore e sulle stime del fabbisogno medio, mentre per i requisiti del polistirene, gli impatti delle operazioni di pulizia, la quantità di acque reflue generate, l'ossigeno e gli input. In questo caso gli intervalli di incertezza sono stati fissati a $\pm 10\%$.

3.5.2.5 Studio di Sinke

Il seguente studio effettuato sull'argomento, ha come principale obiettivo quello di rappresentare uno scenario di produzione di una carne macinata con un impianto di scala commerciale, il quanto più realistico possibile, per l'anno 2030 (Sinke et al., 2023). I dati presi in considerazione provengono da 15 aziende operanti nel settore della carne coltivata, sia produttrici, sia attive nella filiera e la raccolta di questi ultimi è avvenuta nel periodo 2019-2022. È stato così modellato un impianto che permette la produzione di 10000 tonnellate annue, il prodotto finale avrà un contenuto proteico in media del 21% (con estremi pari al 18% e al 25%).

Il processo di produzione comprende una fase di proliferazione (preceduto dall'inoculo delle staminali in una vial) che avviene in tre bioreattori posizionati in serie, dopodiché avverrà una fase di differenziazione in quattro differenti bioreattori posizionati in parallelo. La prima fase del processo è l'inoculo delle cellule all'interno del primo bioreattore per la proliferazione, il quale avrà un volume di 250 ml; il processo di proliferazione all'interno di quest'ultimo avrà una durata di 10 giorni. Passato questo lasso di tempo avviene la raccolta del 50% delle cellule e l'inoculo all'interno di un secondo bioreattore, il quale ha un volume di 50 litri, anche qui la durata del processo è di 10 giorni. Successivamente avviene la raccolta del 50% delle cellule, le quali verranno inserite all'interno di un bioreattore a serbatoio agitato che ha un volume di lavoro pari a 10000 L, qui avverrà la proliferazione su larga scala per un tempo di 12 giorni (figura 3-5).

Allo scadere dei 10 giorni, avviene la raccolta del 100% del contenuto cellulare e la semina su degli scaffold commestibili per un'ulteriore differenziazione e maturazione, che avviene in

4 reattori di perfusione che operano in parallelo, ognuno dei quali ha un volume di lavoro di 2000 litri. Questa fase ha una durata di 10 giorni e da ogni bioreattore si ottiene 770 kg di carne coltivata per un totale di 3080 kg in un ciclo, la cui durata è pari a 42 giorni. Alla fine di ogni processo il sistema necessita di manutenzione e pulizia, la quale avviene attraverso l'utilizzo di un sistema clearing in place (Sinke et al., 2023).

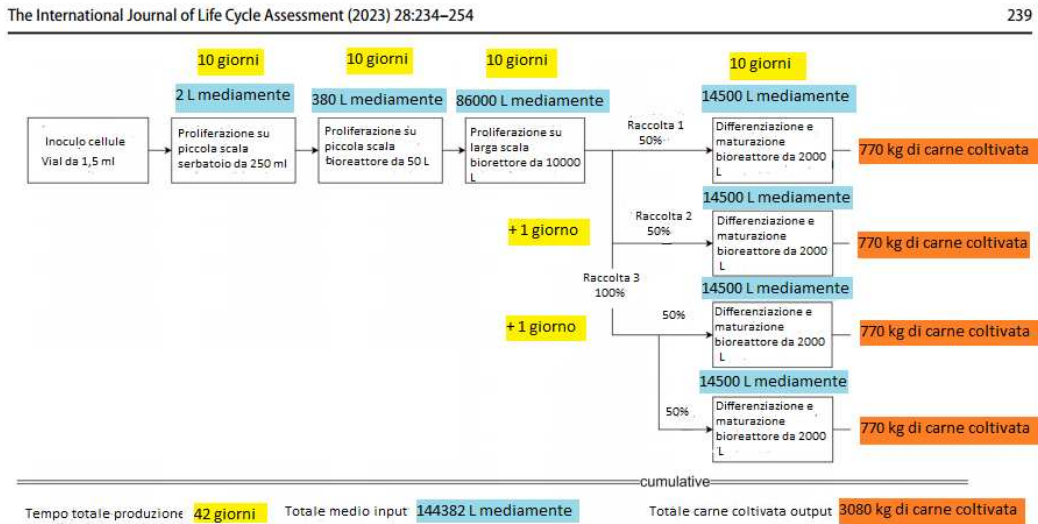


Figura 3-5 Sistema di produzione preso in considerazione nello studio di Sinke (Sinke, 2023).

Al fine di calcolare i valori che corrispondono alla quantità di ingredienti medi necessari per la produzione di 1 kg di carne, lo studio (Sinke et al., 2023) sviluppa tre differenti scenari (fig. 3-6) per i terreni di coltura. Gli scenari inclusi sono: due scenari estremi che riflettono il limite superiore e inferiore dei dati, oltre ad un probabile scenario di riferimento basato sulla media del set di dati, in alcuni casi aggiustati verso l'alto o verso il basso.

Come si può notare dalla figura 3-6 le principali fonti di energia, carbonio e azoto per la carne coltivata sono il glucosio e gli amminoacidi. Il 75% degli amminoacidi viene fornito dall'idrolizzato di soia e il restante 25% è costituito da amminoacidi a singolo prodotto provenienti da produzione microbica o chimica, mentre il glucosio viene fornito come normale glucosio da mais per uso alimentare.

Componenti	Scenario medio-basso (g)	Scenario base (g)	Scenario medio-alto (g)	Ingredienti principali
Amminoacidi (totali), di cui:	200	283	400	L-Glutammina, L-Arginina cloridrato e una moltitudine di altri amminoacidi
<i>Amminoacidi da idrolizzato</i>	<i>150</i>	<i>212</i>	<i>300</i>	
<i>Amminoacidi da prodotti convenzionali</i>	<i>50</i>	<i>71</i>	<i>100</i>	
Zuccheri (totali), di cui:	320	400	500	Glucosio e Piruvato
<i>Zucchero: Glucosio</i>	<i>319</i>	<i>398</i>	<i>396</i>	
<i>Zucchero: Piruvato</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	
Proteine ricombinanti	0,2	3	50	Albumina (dominante nel medio - alto scenario), insulina, trasferina.
Sale	100	224	500	Cloruro di sodio e bicarbonato di sodio
Fattori di buffering	2	26	350	HEPES
Vitamine	0,2	2	20	l- inositolo e cloruro di colina
Fattori di crescita	<< 1	<< 1	<< 1	
Acqua	20,000	44,721	100,000	Acqua ultrapura
Totale (g)	21,142	46,342	102,620	
Totale (l)	21	47	103	

Figura 3-6: Elenco ingredienti del terreno di coltura per Kg di carne coltivata. (Sinke, 2023).

Le proteine ricombinanti hanno funzioni importanti nel mezzo, principalmente come fattori di crescita che svolgono un ruolo importante nel controllo di vari percorsi cellulari o come proteine che possono trasportare e fornire nutrienti ed altre macromolecole. Si presume che queste proteine fossero prodotte in modo ricombinante mediante fermentazione microbica. (Sinke et al., 2023).

Per il consumo di energia sono stati modellati tre differenti mix energetici (Sinke et al., 2023):

- Il mix energetico convenzionale si basava su uno scenario politico globale dichiarato per il 2030 nel World Energy Outlook, dove il calore è generato utilizzando gas naturale.
- Il mix energetico sostenibile si basava sull'elettricità eolica solare fotovoltaica on-shore (entrambi formano il 50%) e sul calore da fonti geotermiche.
- Un mix energetico totalmente sostenibile, il quale si basa al 100% su fonti rinnovabili come l'eolico e il fotovoltaico.

La domanda di energia per l'impianto, la produzione di materiali e gli ingredienti a monte del sistema sono basati su dati primari (materiali a monte) e modelli computazionali per processi di coltura cellulare su larga scala.

L'acqua viene utilizzata nel processo per il terreno di coltura cellulare, la pulizia e il lavaggio dopo la raccolta. Tutta l'acqua è stata modellata come acqua ultra pura, per la quale la produzione è stata modellata sulla base di dati primari riservati. Mentre per acque reflue, secondo gli autori, si intendono i metaboliti dei rifiuti prodotti, i quali sono calcolati sulla

base del bilancio di massa degli input e degli output includendo il metabolismo delle fonti di carbonio e azoto. Per questo studio, viene modellato il trattamento delle acque reflue e non è stato ipotizzato alcun riciclaggio di componenti medi ad eccezione dell'acqua (Sinke et al., 2023).

Infine per le attrezzature le ipotesi dell'acciaio e della lana di vetro degli impianti di calcolo si basavano su studi precedentemente fatti, a cui è stato aggiunto un 10% riguardante: la massa per tubazioni, gli scambiatori di calore e la manutenzione di tutte le apparecchiature. Si presume che la vita media dell'impianto sia da attribuirsi sui 20 anni.

3.5.2.6 Studio dell'azienda SCiFi Food

Un'ulteriore analisi effettuata per la valutazione dell'impatto ambientale della carne coltivata è quella effettuata sull'azienda americana SCiFi Foods (Kim et al., 2022), situata in California, la quale aveva la necessità di una valutazione LCA per valutare il nuovo prodotto che l'azienda sta per lanciare sul mercato, un hamburger prodotto con carne coltivata a cui vengono aggiunti dei materiali di origine vegetale come soia e cocco, subito dopo la fase di coltivazione delle cellule. Il contenuto proteico della carne coltivata non viene indicato, per cui viene preso come riferimento il 20% indicato nello studio di Sinke (contenuto proteico medio dei prodotti di 15 aziende). Secondo quanto indicato nel sito dell'azienda SCiFi Food, l'impianto indicato nella valutazione potrebbe produrre fino a 13000 tonnellate di carne annue.

La valutazione (Kim et al., 2022) effettuata riguarda l'approccio dalla culla al cancello, che secondo gli autori è composta da cinque fasi, le quali includono l'estrazione delle materie prime, la coltivazione delle cellule e la produzione dell'hamburger finale. In questa tesi però verranno indicati solo gli impatti relativi alla coltivazione delle cellule e alla produzione delle sue materie prime, tralasciando gli impatti degli ingredienti di origine vegetale (aggiunti in fase di lavorazione) e la fase di lavorazione successiva dove sono aggiunte le parti vegetali. Inoltre, il seguente studio effettua una comparazione con due hamburger vegetali prodotti negli USA negli ultimi anni.

Questo studio ha preso in considerazione quattro categorie di impatto: emissioni di gas serra, domanda di energia, uso del suolo e uso dell'acqua. Per effettuare la valutazione gli autori hanno utilizzato un software denominato OpenLca, ove sono stati inseriti tutti gli input e l'energia utilizzata. Gli impatti del ciclo di vita in ciascuna categoria sono stati convertiti in un'unità standard: le emissioni di gas serra sono rappresentate in unità di kg di CO₂eq, la domanda di energia in MJ, l'uso del suolo in m² e il consumo di acqua in m³.

Al fine di effettuare la valutazione l'azienda SCiFi Food ha fornito tutti i dati qualitativi e quantitativi, i quali però non sono stati pubblicati perché di proprietà dell'azienda.

Inizialmente sono stati indicati tutti i nutrienti necessari per il la crescita delle cellule muscolari e le relative utenze, i quali sono stati inseriti tutti nel software OpenLca (figura 3-7):

- Sali: vengono classificati come sali 18 tipi (cloruro di calcio, solfato ferroso...), di cui solo 12 vengono inseriti nel database, i restanti 6 sono sostituiti con sali che hanno una produzione e una catena di approvvigionamento simile.
- Amminoacidi: dei 21 utilizzati ne sono presenti solo 6 che sono stati inclusi nel software. Gli altri composti sono stati sostituiti utilizzando Lisina e Treonina poiché questi sono prodotti utilizzando processi simili agli amminoacidi sostituiti.
- Vitamine: nel database non erano presenti dati sul ciclo di vita per 11 vitamine. Pertanto, i composti sono stati sostituiti da glutammina e lisina poiché i processi di produzione biotecnologici (ossia fermentazione e trasformazione microbica/enzimatica) sono concepiti per la produzione commerciale di vitamine e composti correlati e il processo di produzione delle vitamine è simile agli altri processi di fermentazione.
- Lipidi: vengono presi in considerazione come se fossero estratti dall'olio di soia e dall'acido grasso.
- Altro: composti secondari quali D-glucosio, acqua, Selenito di sodio e acido ascorbico.
- Utenze: indica la fonte di calore utilizzata per la coltivazione cellulare che poi viene convertita in calore. Mentre l'elettricità utilizzata per l'intero processo viene calcolata utilizzando dei dati medi statunitensi.

	USCLI	Ecoinvent V3.8	ELCD V3.0	Agri-Footprint V5.0	Agribalyse V3.0.1
Composti (62)	6	18	2	2	20
Sali (16)	5	12	1	1	12
Amminoacidi (21)	0	3	0	0	6
Vitamine 11	0	0	0	0	0
Lipide (2)	0	0	0	0	1
altro (12)	1	3	1	1	2
Input (colore e elett.)	0	0	0	0	0

Figura 3-7: Nutrienti utilizzati dall'azienda SciFi Food per la crescita cellulare (Kim et al., 2022).

In seguito nello studio vengono individuati gli input vegetali del nuovo hamburger che però non verranno presi in considerazione in questa tesi.

Gli autori inoltre, come indicato nell'articolo (Kim et al., 2022), hanno effettuato una valutazione Monte Carlo, al fine di verificare la sensibilità dei dati ottenuti, calcolandone la deviazione standard intorno ai valori medi presi in esame.

3.6 Risultati degli studi presi in esame.

Di seguito vengono riportati i risultati delle precedenti valutazioni prese in considerazione, nel caso delle valutazioni riguardanti 1 gr di proteina prodotta e l'impatto prodotto annualmente dall'impianto, i dati, non essendo disponibili, sono stati calcolati a partire dai dati grezzi presenti all'interno delle valutazioni e delle informazioni di supporto allegate agli articoli.

Secondo il primo studio preso in considerazione in questa tesi (Tuomisto & Teixeira De Mattos, 2011), le emissioni di gas serra per 1 kg di prodotto finale ottenuto sono pari a: 2,24 kg di CO₂eq/kg nel caso della California, 1,87 kg di CO₂eq/kg per la Spagna e 1,89 kg di CO₂eq/kg per la Thailandia e un uso del suolo pari a 0,2 m²/kg di prodotto per tutti e tre gli stati. Mentre il consumo di acqua espresso in m³/ kg di prodotto è stato di: 0,37 per la California, 0,52 per la Spagna e 0,38 per la Thailandia. Infine per il consumo di elettricità la California è al primo posto con 31,8 MJ/kg, seguito dalla Spagna con 31,7 MJ/kg e dalla Thailandia con 25,5 MJ/kg.

La produzione di *Cianobatteri* rappresenta circa il 23% del consumo totale di energia, il 28% delle emissioni di gas a effetto serra e il 17% del consumo indiretto di acqua. Il processo di coltivazione delle cellule muscolari ha il maggior contributo ai risultati, rappresentando il 72% del consumo totale di energia, il 71% delle emissioni totali di gas serra e l'82% del consumo indiretto di acqua. Il più alto apporto di acqua era necessario per sostituire la perdita per evaporazione nella coltivazione di *Cianobatteri*. Il trasporto della biomassa dei *Cianobatteri* all'impianto di produzione invece ha un impatto significativamente basso (Tuomisto & Teixeira De Mattos, 2011).

Sempre secondo gli autori, la Thailandia ha avuto il minor consumo di energia primaria a causa del basso fabbisogno di energia primaria per la produzione di elettricità. Mentre la California ha avuto le più alte emissioni di gas serra a causa dell'elevata percentuale di carbone nel mix elettrico. Il consumo idrico è stato più elevato in Spagna a causa delle precipitazioni elevate e dell'ingenti percentuale di energia idroelettrica nel mix elettrico europeo. I requisiti di terra per la produzione di materie prime per la produzione di carne coltivata variano a seconda dell'ubicazione della struttura.

Per quanto riguarda gli impatti per la produzione di gr di proteina prodotta i risultati ottenuti dai calcoli sono:

- California: 0,01 kg di CO₂eq/gr come emissioni, 0,001 m²/gr di uso del suolo, 0,002 m³/kg come consumo di acqua e 0,17 MJ/gr di consumi elettrici.
- Spagna: 0,01 kg di CO₂eq/ kg come emissioni, 0,001 m²/gr di uso del suolo, 0,003 m³/g come consumo di acqua e 0,17 MJ/ gr come uso di energia elettrica.
- Thailandia: 0,01 kg di CO₂eq/ gr come emissioni, 0,001 m²/ gr di uso del suolo, 0,002 m³/kg come consumi di acqua e 0,13 MJ/ gr di consumi elettrici.

Mentre per quanto riguarda gli impatti e i consumi annui, i risultati sono pari a:

- California: 13440 kg di CO₂eq come emissioni, 12000 m²/ kg come uso del suolo, 2220 m³/ kg come consumi di acqua e 0,19 TJ/ kg di elettricità usata.
- Spagna: 11220 kg di CO₂eq come emissioni, 12000 m²/ kg come uso del suolo, 3120 m³/ kg come consumi di acqua e 0,19 TJ/ kg di consumi elettrici.
- Thailandia: 11340 Kg di CO₂eq come emissioni, 12000 m²/ kg di uso del suolo, 2280 m³/ kg come consumi di acqua e 0,15 TJ/ kg di consumi elettrici.

Nello studio effettuato da Smetana, avviene la comparazione di vari sostituti della carne. La carne coltivata secondo gli autori viene indicata come la più impattante, ad eccezione dell'occupazione di terreni agricoli e dell'eco tossicità terrestre e di acqua dolce (Smetana et al., 2015). L'elevato impatto della carne sintetica è dovuto all'elevato consumo di energia,

necessario per la coltivazione all'interno del bioreattore e in secondo luogo correlato all'utilizzo da parte dei Cianobatteri, questo perché viene preso in considerazione un mix energetico non rinnovabile. Anche dal punto di vista proteico la carne coltivata risulta la più impattante rispetto agli altri sostituti presi in considerazione dallo studio.

I risultati, per la carne coltivata in laboratorio, sono pari a 24.25 kg CO₂eq/kg nel caso delle emissioni di gas serra, 0,6 m²/kg come uso del suolo e come uso di energia un valore di 331,8 MJ/ kg, mentre il consumo di acqua è pari a 0,42 m³/kg.

Le emissioni e consumi per gr di proteina ottenute dai calcoli sono risultate: 0,09 kg di CO₂eq/ gr come emissioni, 0,002 m²/ gr di uso del suolo, 0,002 m³/ kg come consumo di acqua e 1,28 MJ/ gr di consumi elettrici.

Nello studio dove viene valutato l'impatto ambientale dell'impianto di produzione negli USA, il quale utilizza un bioreattore a serbatoio agitato (Mattick et al., 2015), suggerisce che la grande fetta dell'impatto ambientale è causata dal consumo di energia. Di quest'ultima la maggior parte è necessaria per la produzione di supporti basali e il loro trasporto, la seconda fetta dall'energia utilizzata è quella utilizzata per il processo di coltivazione (figura 3-8). Però, a discapito di questo, la coltivazione in vitro richiede meno utilizzo del suolo.

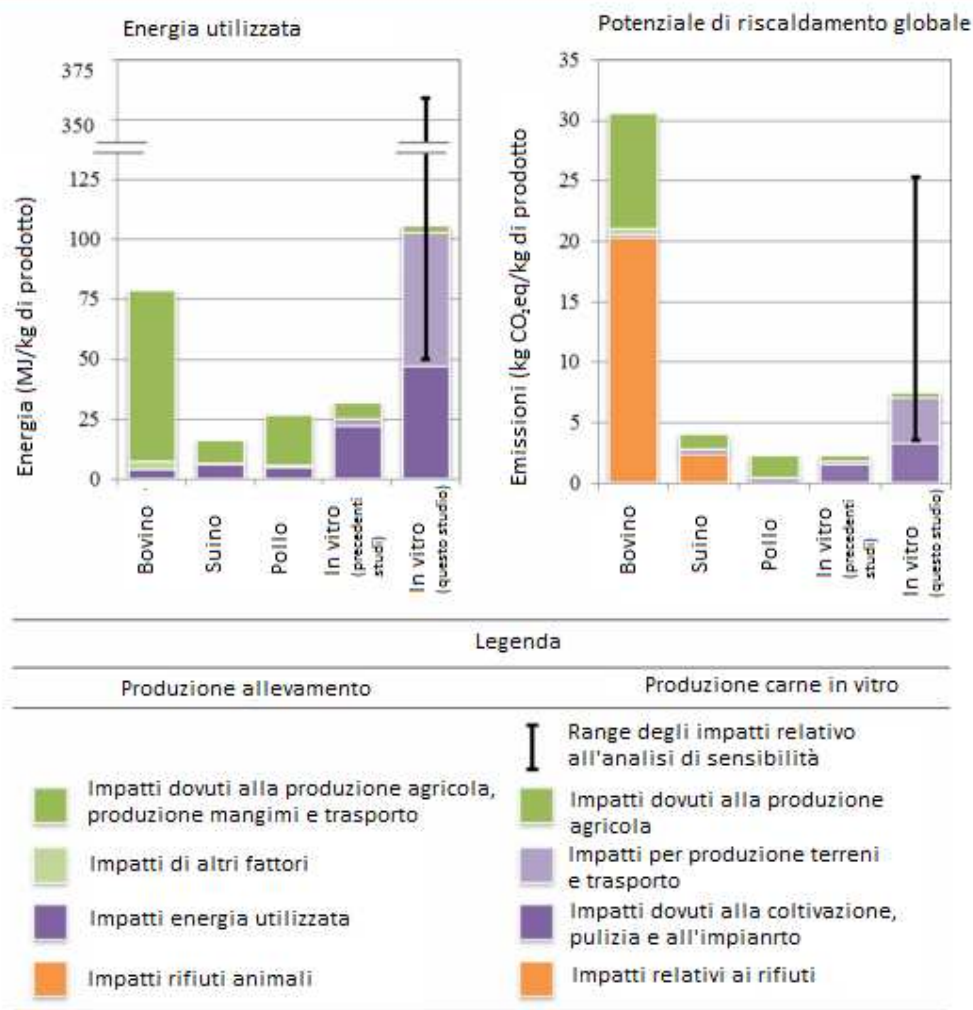


Figura 3-8: Consumo di energia e emissioni secondo lo studio effettuato da Mattick (Mattick et al., 2015).

L'uso eccessivo di energia dei terreni basali può essere correlato alla presenza di amminoacidi al loro interno, i quali possono essere prodotti sinteticamente in una serie di passaggi che iniziano con la produzione di mais, seguito dalla sua macinazione, dalla saccarificazione dell'amido di mais in glucosio e dalla fermentazione del glucosio.

Mentre l'analisi sull'incertezza effettuata dagli autori riguarda due principali parametri: la grandezza dell'impianto e la massima proliferazione cellulare, la quale può variare tra $1,67 \times 10^6$ cellule/ml e 2×10^7 cellule/m. La seguente analisi ha indicato che all'aumentare della grandezza del possibile impianto le emissioni di CO₂eq tendono ad aumentare, mentre la maggior proliferazione porterebbe alla diminuzione delle emissioni. I valori di emissioni di gas serra per kg di prodotto sono pari a 7,5 kg di CO₂eq di prodotto, un uso del suolo pari a

5,5 m²/ kg e un consumo di energia pari a 106 MJ/ kg. Per quanto riguarda le emissioni e i consumi per gr di proteina prodotta sono pari a: 0,11 kg di CO₂eq/ gr come emissioni, 0,08 m²/ gr di uso del suolo e 1,51 MJ/ gr di consumi elettrici. Infine i consumi annui dell'impianto sono pari a: 495 x 10³ kg di CO₂eq come emissioni, 363 x 10³ m² come uso del suolo e 6,99 TJ di elettricità usata.

Secondo gli autori dell'articolo riguardane la valutazione di impatto ambientale effettuata su un bioreattore a fibra cava (Tuomisto et al., 2022), i consumi e le emissioni dello scenario base CMB erano 1,7–2,3 volte superiori rispetto alla CMB128 e 3,8–5,7 volte superiori rispetto allo scenario CMC a seconda della categoria di impatto. I valori di emissioni per kg di CMB, CMB128 e CMC sono rispettivamente 25,19, 12,64 e 4,98 kg di CO₂eq, mentre i valori di uso del suolo sono rispettivamente: 6,89, 3,36 e 1,84 m²/kg. I consumi di acqua espressi in m³/ kg sono pari a: 0,54 per il CMB, 0,32 per il CMB128 e 0,12 nel CMC, mentre i consumi di energia sono pari a 532,78 MJ/ kg nel CMB, 231 MJ/ kg nel CMB128% e 94.09 MJ/ kg nel CMC. La produzione di mezzi di coltura è stata la parte più impattante negli scenari alternativi, mentre nel caso dello scenario di base l'uso di energia per la coltivazione cellulare è stato dichiarato la categoria più impattante.

Il contributo maggiore dell'impronta di carbonio è stato relativo alla produzione dei terreni di coltura, in particolare la produzione di amminoacidi, glucosio, vitamine e minerali in tutti e tre i differenti terreni presi in considerazione. Il contributo del siero fetale bovino è compreso tra il 0,2-13% dell'impatto totale del mezzo di coltura standard, a seconda della categoria di impatto, quando è stata utilizzata l'allocazione basata sulla sostituzione. La produzione dei fattori di crescita ha contribuito per lo 0,5–1,7% agli impatti del terreno privo di siero. Quest'ultimo (Essential 8) ha avuto un impatto ambientale inferiore al 28-44% rispetto al terreno di coltura utilizzato nel CMB.

La principale differenza tra i valori dei tre scenari presi in esame, al fine di ridurre l'impronta di carbonio, è stata ottenuta modificando il tipo di cella e ipotizzando un aumento di massa del 128 durante la fase di differenziazione delle cellule, che hanno causato una diminuzione del fabbisogno di terreno di coltura da 426 litri nel CMB a 187 litri. Inoltre l'uso del terreno privo di siero, non essendo estratto dagli animali, ha così ridotto l'impatto ambientale, anche se impiega più ore per effettuare il raddoppio cellulare. L'uso di acqua di mare come acqua di raffreddamento per i bioreattori ha ridotto il consumo di energia per il raffreddamento, ma questo ha avuto solo un effetto minore sui risultati, con una riduzione dell'impatto inferiore all'1%. Il riciclo dell'acqua effettuato negli scenari alternativi ha ridotto gli impatti ambientali dovuti alla riduzione del volume di acqua necessaria per essere

sterilizzata prima dello smaltimento e per essere trattata presso l'impianto di trattamento delle acque reflue.

Per quanto riguarda le emissioni e i consumi per gr di proteina prodotta i risultati sono i seguenti:

- Scenario CMB: 0,13 kg CO₂eq/ gr di emissioni 0,03 m²/ gr di uso del suolo, 0,003 m³/ gr consumo di acqua e 2,66 MJ/ gr consumo di energia.
- Scenario CMB128: 0,06 kg CO₂eq/ gr di emissioni prodotte 0,02 m²/ gr di uso del suolo 0,002 m³/ gr di consumi di acqua e 1,16 MJ/ gr di consumo di energia.
- Scenario CMC: 0,02 kg CO₂eq/ gr di emissioni prodotte, 0,01 m²/ gr di uso del suolo, 0,001 m³/ gr e 0,47 MJ/ gr di consumo di energia.

Mentre nello scenario delle emissioni annue, i risultati sono:

- Scenario CMB: 273 x 10³ kg CO₂eq, 74,6 x 10³ m² di uso del suolo, 5848 m³ di consumi d'acqua e 5,8 TJ di consumi elettrici.
- Scenario CMB128: 144 x 10³ kg CO₂eq, 38,3 x 10³ m² come uso del suolo 3700 m³ di consumi d'acqua e 2,6 TJ di consumi di energia.
- Scenario CMC: 51 x 10³ kg CO₂eq, 18,8 x 10³ m² come uso del suolo 1226 m³ di consumi d'acqua e 1 TJ di consumi elettrici.

Mentre nella valutazione effettuata su un probabile impianto di produzione nel 2030 (Sinke et al., 2023), gli autori indicano che l'impronta di carbonio della carne coltivata è sensibile alla selezione del mix energetico. Nello scenario energetico medio globale, l'impronta di carbonio è pari a 14,4 kg di CO₂eq/kg di carne, il benchmark ambizioso (totalmente rinnovabile) ha un'impronta di carbonio inferiore a 2,9 kg di CO₂eq/kg di carne, mentre nello scenario parzialmente rinnovabile l'impronta è di 4,1 kg di CO₂eq/kg di carne.

Il consumo di energia, secondo gli autori, è determinato principalmente dallo scambiatore di calore, in particolare dal raffreddamento del sistema (circa il 75%), seguito poi dal riscaldamento del mezzo di coltura, dall'areazione e dall'agitazione. I consumi energetici per kg di prodotto sono pari a: 278 MJ nel caso della media globale, 176 MJ nel caso dello scenario parzialmente rinnovabile e 164 MJ per il benchmark ambizioso.

L'impronta di carbonio del terreno di coltura è determinata principalmente dalla produzione di amminoacidi, dalla produzione microbica o chimica (29–37%), a seconda del mix energetico durante la produzione, seguita da proteine ricombinanti (8–29%), glucosio (22–29%) e idrolizzato di soia (12-16%). Nello scenario medio-alto, l'albumina e acido solfonico zwitterionico, contribuiscono entrambi in modo significativo poiché sono utilizzati in concentrazioni più elevate e hanno un'impronta associata elevata. In base al kg di ingredienti,

le proteine ricombinanti hanno di gran lunga la più alta impronta di carbonio, seguite dagli aminoacidi e dalla produzione microbica o chimica. Si tratta di processi biochimici ad alta intensità energetica che attualmente per lo più non sono prodotti su larga scala (ad eccezione di alcuni aminoacidi) e quindi non godono dei benefici delle economie di scala (Sinke et al., 2023). Altri contributi all'impronta di carbonio sono la produzione di scaffold, il riciclo dell'acqua e l'utilizzo delle apparecchiature.

L'uso del suolo secondo gli autori è correlabile per circa il 10-20% al terreno occupato per la produzione di energia rinnovabile (solare ed eolica), infatti nel caso dello scenario del mix energetico medio globale è di 2,41 m²/ kg, nel caso del mix energetico in parte rinnovabile 2,47 m²/ kg e 2,48 m²/ kg per il mix totalmente rinnovabile. Mentre l'uso dell'acqua è molto basso, perché secondo gli autori, la metà dell'acqua utilizzata nel bioreattore viene riciclata (nel benchmark ambizioso è circa il 75%), mentre l'altra parte proviene dalle catene di approvvigionamento, come la produzione biochimica degli ingredienti. Il consumo di acqua, espresso in m³/kg è pari a 0,07 per lo scenario medio globale, 0,08 per gli altri due.

Per quanto riguarda i risultati ottenuti dai calcoli per gr proteina sono i seguenti:

- Scenario medio globale: emissioni pari a 0,07 kg CO₂eq/ gr, uso del suolo pari a 0,01 m²/ gr, consumo d'acqua pari a 0,0003 m³/ gr e consumi elettrici pari a 1,32 MJ/ gr proteina.
- Scenario in parte rinnovabile: emissioni pari a 0,02 kg CO₂eq/ gr, uso del suolo pari a 0,0004 m²/ gr, consumo d'acqua pari a 0,01 m³/ gr e consumi elettrici pari a 0,83 MJ/ gr proteina.
- Scenario totalmente rinnovabile: emissioni pari a 0,01 kg CO₂eq/ gr, uso del suolo pari a 0,01 m²/ gr, consumo d'acqua pari a 0,0004 m³/ gr e consumi elettrici pari a 0,78 MJ/ gr proteina.

Per quanto riguarda le emissioni annue:

- Scenario medio globale: emissioni pari a 144 x 10⁶ kg CO₂eq, uso del suolo pari a 241 x 10³ m², consumo d'acqua pari a 700 x 10³ m³ e consumi elettrici pari a 278 TJ.
- Scenario in parte rinnovabile: emissioni pari a 41 x 10⁶ kg CO₂eq, uso del suolo pari a 247 x 10² m², consumo d'acqua pari a 800 x 10³ m³ e consumi elettrici pari a 176 TJ.
- Scenario totalmente rinnovabile: emissioni pari a 29 x 10⁶ kg CO₂eq, uso del suolo pari a 248 x 10² m², consumo d'acqua pari a 800 x 10³ m³ e consumi elettrici pari a 164 TJ.

Infine, i risultati ottenuti dalla valutazione del prodotto della ditta SCiFi Foods, hanno identificato una quantità di emissioni pari a 3,84 kg CO₂eq/ kg di prodotto per l'intero processo, di queste soltanto 2,6 kg CO₂eq/ kg sono imputabili alla coltivazione di carne e alla produzione dei relativi ingredienti. Mentre ha comportato l'uso di 37 MJ/ kg per il processo di coltivazione, come l'uso del suolo un valore di 0.08 m²/ kg e un utilizzo di acqua dello 0.02 m³/ kg (figura 3-9). Secondo gli autori la fonte più considerevole dell'impatto ambientale è quella relativa al processo di coltivazione della carne, seguito dalla produzione degli input utilizzati per la coltivazione della biomassa cellulare. I valori di uso del suolo e del consumo idrico sono relativamente bassi, mentre si è ottenuto come valore di utilizzo di energia 37 MJ a causa dell'utilizzo di fonti geotermiche ed eoliche.

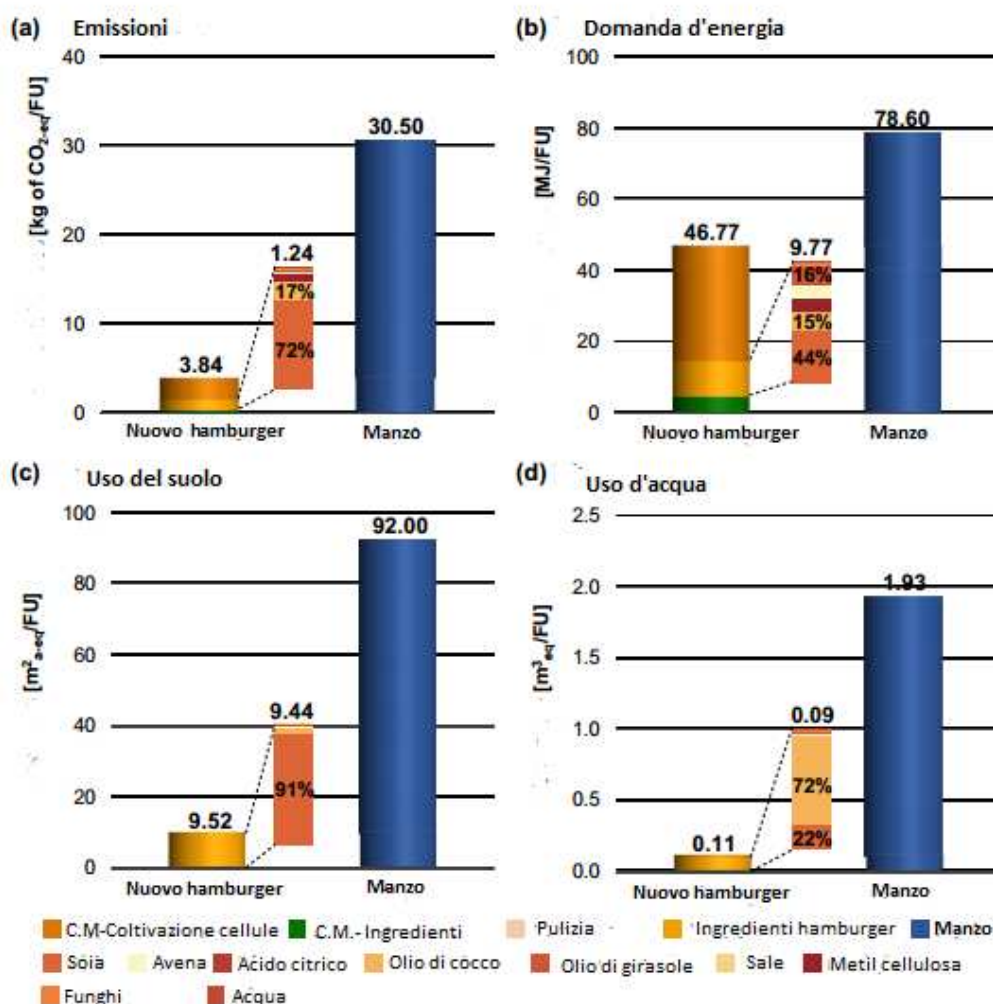


Figura 3-9: risultati della valutazione effettuata sul prodotto dell'azienda SciFi Food, in confronto con un prodotto simile bovino (Kim et al., 2022).

I valori ottenuti per la produzione di 1 gr di proteine sono pari a: 0,01 kg di CO₂eq/ gr di emissioni di gas serra, 0,001 m²/ gr di uso del suolo, 0,0001 m³/ gr di uso d'acqua e 0,19 MJ di energia utilizzata.

Mentre considerando la produzione di 13000 tonnellate di carne annua i valori di impatto dell'impianto di produzione sono pari a: 33,8 x 10⁶ kg CO₂eq, 10,4 x 10⁵ m² di uso del suolo, 2,6 x 10⁵ m³ d'acqua utilizzati e 48,1 TJ utilizzati.

Sempre gli autori hanno effettuato la simulazione Monte Carlo al fine di calcolare l'incertezza dei valori ottenuti, la quale ha indicato un coefficiente di variazione pari a 6.8% per le emissioni, 4,6% per l'uso di energia, 14,9% per l'uso di acqua e 130% per uso del suolo. La principale incertezza della valutazione è attribuibile al rendimento del motore del bioreattore; infatti, le emissioni di gas serra sono molto sensibili in quest'ultimo (variazioni del 16%), poiché sono significativamente influenzate dall'elettricità utilizzata nel motore. Tuttavia, la variazione dell'uso del suolo dovuta all'efficienza del motore è trascurabile (Kim et al., 2022).

3.7 Comparazione dei risultati

Tutti i risultati numerici delle varie valutazioni dell'impatto ambientale relative alla carne coltivata, sono stati riportati nelle tabelle 7 (impatti per 1 kg di prodotto), 8 (impatti per 1 gr proteina prodotta) e 11 (impatti ambientali annui) presenti nell'appendice di questa tesi, questo al fine di effettuare una media del prodotto carne coltivata e poterlo comparare con la carne tradizionale.

Nel caso dei risultati relativi all'impatto ambientale di 1 kg di prodotto, si può notare una distanza tra i dati presi in considerazione dei vari studi, in particolare sul livello di emissioni e sull'utilizzo di energia e questo può essere causato dalla relativa incertezza che sussiste nei vari studi. Quest'ultima è correlata alla tipologia di fonte energetica che si va ad utilizzare per l'impianto e la produzione degli ingredienti medi (Sinke et al., 2023), infatti avremo impatti ed usi di energia più alti se si andranno ad usare combustibili di natura fossile. Un altro fattore che influisce, anche se in maniera minore rispetto alla fonte energetica, è il tipo di impianto che si prende in considerazione. La medesima considerazione può essere fatta per le emissioni e i consumi energetici relativi alla produzione di 1 gr di proteina.

Anche l'uso del suolo per 1 kg di carne e gr di proteina prodotta ha indicato risultati variabili tra gli studi, questo è correlato alla composizione del substrato di crescita e alla presenza del FBS. Infatti nel caso della presenza di quest'ultimo i risultati sono stati notevolmente maggiori. Infine, anche i consumi idrici espressi dai vari studi mostrano risultati

variabili, questo è associato alla tipo di terreno e se si effettua il riciclo delle acque reflue nell'impianto di produzione.

Un'altra considerazione che si può fare è quella relativa agli impianti di produzione presi in esame è la loro capacità produttiva. Gli impianti che si possono classificare come di scala commerciale sono quello dell'azienda SCiFi Food e quello preso in considerazione dallo studio di Sinke, mentre tutti gli altri si possono classificare come di scala di laboratorio.

Capitolo 4

CONFRONTO DELLE VALUTAZIONI

4.1 Precisazioni e limitazioni

Al fine di effettuare la comparazione vengono prese in considerazione i seguenti fattori:

- Emissioni di gas serra: espresse in CO₂eq,
- Uso del suolo: espresso in m²,
- Consumo d'acqua: espresso in m³,
- Consumo energetico: espresso in Joule.

La scelta degli indicatori sopramenzionati è stata maturata in seguito alla visione dei risultati delle valutazioni riguardanti la carne coltivata dove, salvo in alcuni casi sporadici, non sono indicati il potenziale di eutrofizzazione, la formazione di particolato, il potenziale di acidificazione ed altri valori. Questo perché le valutazioni relative alla coltivazione della carne in vitro sono molto recenti e limitate. Il confronto riguarda: la comparazione delle emissioni e dei consumi relativi ad 1 kg di carne prodotta, poi il confronto per 1 gr di proteine prodotte, le emissioni e consumi effettuati nell'arco temporale di un anno e infine un prospetto per l'anno 2030.

Come già indicato nei precedenti capitoli, in alcuni studi non vi erano tutti i dati riguardanti le emissioni e i consumi annui e per gr di proteina prodotta nei vari tipi di carne. Però, conoscendo il contenuto proteico, la produzione dei vari impianti, la produzione di ogni ciclo produttivo e il tempo in giorni di quest'ultimo, effettuando un determinato calcolo, si possono conoscere le emissioni e i consumi sia per l'arco temporale di un anno sia per 1 gr di proteina prodotta nei vari tipi di carne. Tutti i dati precedentemente indicati sono presenti all'interno delle pubblicazioni prese in esame o nelle informazioni di supporto allegati in queste ultime.

La principale limitazione è avvenuta a causa della carenza del contenuto proteico in alcuni articoli relativi alle carni convenzionali prese in esame, per sopperire alla carenza del primo fattore, viene preso come riferimento un contenuto proteico standard, indicato nel testo: Lawrie's. Scienza della carne. Un ulteriore limite è la carenza di dati relativi al consumo energetico e l'uso del suolo in alcuni studi della carne tradizionale.

Come si può notare dalle prime tre tabelle, nel caso della carne convenzionale vi è una discrepanza tra i dati espressi, questo perché i tipi di allevamenti presi in considerazione sono molto differenti tra di loro e possono far variare i fattori presi in considerazione per la comparazione. Infatti le valutazioni espresse dalla FAO riguardano tutti i paesi del globo, includendo anche paesi sottosviluppati e in via di sviluppo, nei quali molto spesso si utilizzano tecniche di allevamento meno efficienti. Mentre le valutazioni EPD prendono in considerazione degli allevamenti specifici della filiera italiana, che attuano le più moderne tecniche di allevamento, le quali portano ad avere una limitazione dei consumi e quindi maggior efficienza.

Anche nel caso della carne coltivata in laboratorio vi è una grande discrepanza tra i dati dell'inventario; la causa di questo può essere ricercata nella struttura e nei processi dei differenti impianti presi in considerazione, nei tipi di terreno utilizzati e nella loro preparazione ed infine dal mix energetico utilizzato. Infatti, nel caso di mix elettrici derivanti principalmente da fonti fossili gli impatti sono stati elevati, mentre nel caso di fonti rinnovabili come l'eolico e il solare, gli impatti sono notevolmente più bassi.

4.2 Comparazione tra le carni convenzionali

Prima di effettuare il confronto tra la carne coltivata e quella convenzione, viene effettuato un breve confronto tra i tre tipi di carne convenzionale presi in considerazione: bovina, suina e avicola.

4.2.1 Comparazione per kg di prodotto

Andando a confrontare i dati relativi ai tre tipi di carne si può notare che la carne bovina risulta avere le emissioni di gas serra maggiori tra i tre tipi. Il valore medio ponderato, pari a 43,2 kg di CO₂eq/ kg, molto più elevato rispetto alle altre categorie (5,79 kg di CO₂eq/ kg per i suini e 4,62 kg di CO₂eq/ kg per i polli). Questo è riconducibile, in primo luogo alla fermentazione enterica attuata dall'animale, la quale emette come prodotto di scarto il metano in elevate quantità all'interno dell'atmosfera. La seconda fonte di emissioni è quella relativa allo stoccaggio e alla conservazione del letame prodotto, il quale emette in atmosfera un'elevata quantità di N₂O (Gerber et al., 2013). La terza grande fetta dalle emissioni bovine riguarda invece le emissioni causate dalla coltivazione e dal cambiamento di uso del suolo da foresta a campi coltivabili. Mentre il secondo tipo di carne più impattante risulta essere quello dei suini, in questo caso il valore è correlato principalmente alle emissioni di CO₂ relative all'alimentazione e dalla gestione del letame, che causa elevate emissioni di N₂O e in secondo

luogo dal cambiamento di uso del suolo. Invece per i polli, il valore dell'impronta di carbonio è correlato alle emissioni di CO₂ derivanti dall'alimentazione, dal cambiamento di uso del suolo e dalla fertilizzazione dei terreni con le deiezioni (pollina) che causano elevate emissioni di N₂O (MacLeod. et al, 2013).

Per l'utilizzo del suolo il valore più alto tra i tre si riscontra sempre nei bovini (86,26 m³), questo è sia dovuto alla maggior quantità di razione richiesta giornalmente, il quale si traduce in una maggiore necessità di terreni, sia dall'utilizzo di pascoli in alcune aziende. Mentre per il consumo d'acqua, anche questa volta i bovini si piazzano al primo posto, questo è causato dalla maggiore grandezza dell'animale, il quale necessita di un maggior apporto idrico per la sopravvivenza e per lo svolgimento delle funzioni rispetto ad un pollo. Inoltre il bovino necessita di un quantitativo più elevato di mangime per la razione giornaliera e questo si traduce in maggiori campi da irrigare per la coltivazione di materie prime. Anche per il consumo di energia i bovini si classificano al primo posto, seguiti sempre da suini e avicoli. Il tutto è rappresentato nella figura 4-1.

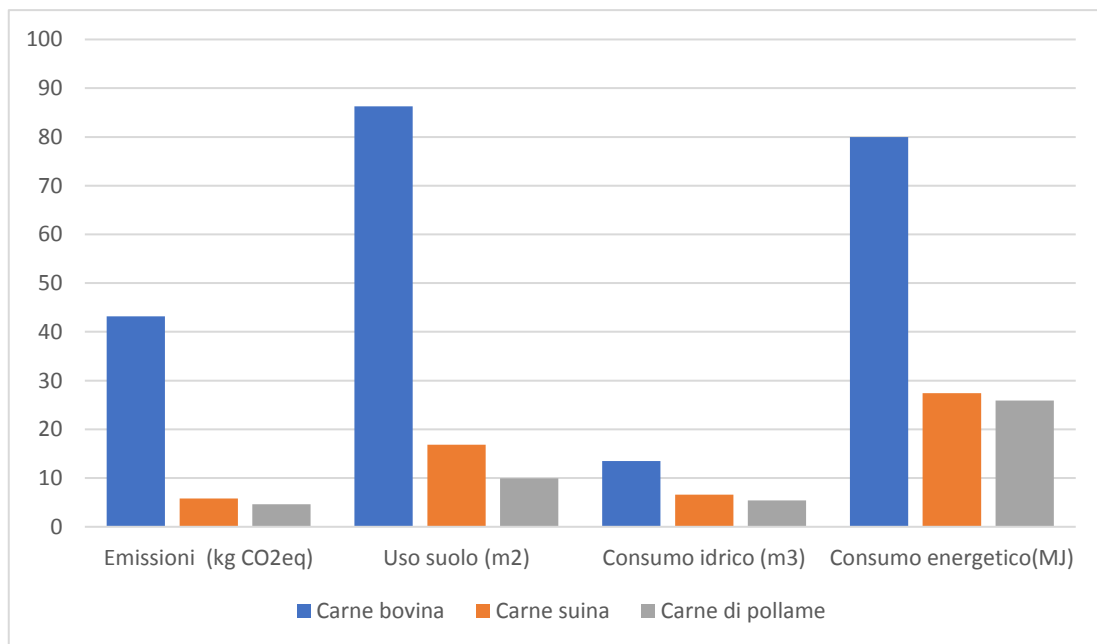


Figura 4-1: Comparazione per kg di carne tradizionale prodotta.

4.2.2 Confronto per gr. di proteina prodotte

Inizialmente bisogna indicare che il contenuto proteico medio dei vari studi presi in esame risulta maggiore nelle carni di suini, dove è pari a 218 gr/ kg, seguito dal pollame con un contenuto medio pari a 219 gr/ kg e dai bovini dove è pari a 215 gr/ kg. Come si può notare

dalla figura 4-2, i bovini hanno il maggior numero di emissioni, consumi d'acqua, uso del suolo e consumi di energia su gr di proteina prodotta di molto superiore alle altre due categorie e le cause da attribuirvi sono le stesse indicate per 1 kg di carne. La carne di pollo risulta essere secondo i dati la minor impattante dal punto di vista del consumo d'acqua e uso del suolo, mentre per consumo di energia i suini risultano avere il valore più basso (pari a 0,13 MJ/ gr) a causa del maggior contenuto proteico rispetto agli avicoli.

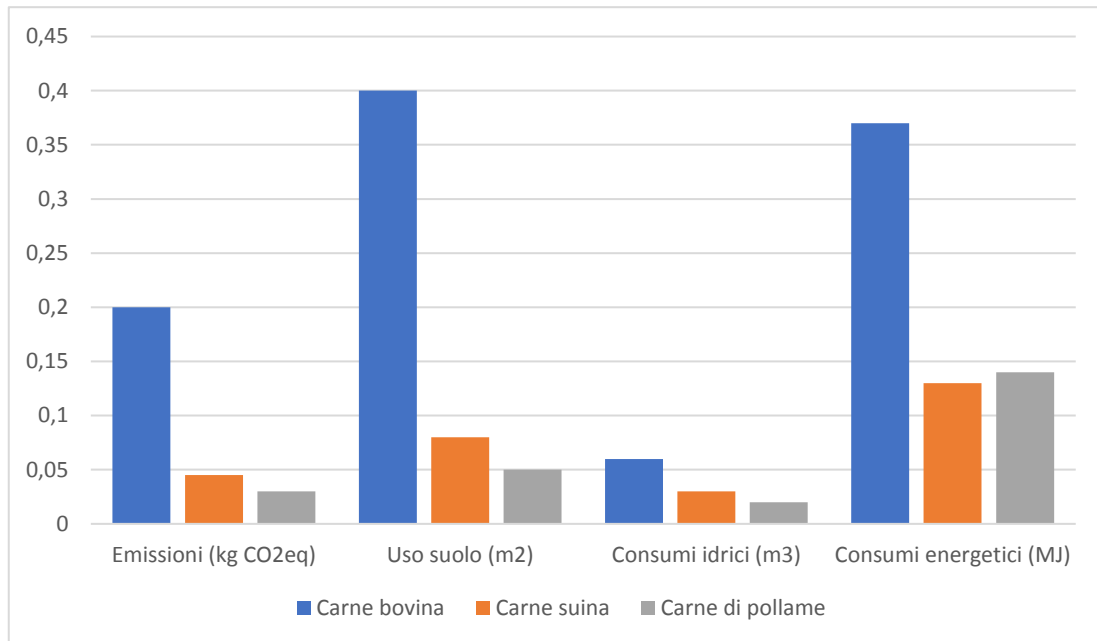


Figura 4-2: Comparazione per gr di proteina prodotta.

4.2.3 Comparazione delle produzioni annue

Dal punto di vista delle produzioni annue secondo il report del 2022 (FAO, 2022) la carne più prodotta a livello mondiale è quella di pollo, seguita da quella di suino e quella bovina, questi dati sono stati utilizzati per il calcolo delle emissioni e consumi.

Come si può notare dalla figura 4-3, le emissioni più alte con una percentuale del 70%, vengono registrate sempre dai bovini ($3,19 \times 10^9$ tonnellate di CO_2eq), anche se producono una quantità minore di carne e questo è dovuto al fatto che le emissioni per kg di prodotto sono notevolmente maggiori. Il livello più basso è registrato dagli avicoli ($6,41 \times 10^8$), anche se hanno una produzione annua maggiore e questo è dovuto dal basso livello d'emissioni. Infatti l'UE, molto sensibile alle tematiche ambientali, al fine di abbattere in piccola parte le emissioni di gas serra derivanti dall'allevamento della carne, sta puntando per i prossimi anni ad una maggiore produzione di carne di pollo, andando a diminuire quella di bovini e suini sul

suolo comunitario (OECD-FAO, 2021). Mentre per quanto riguarda l'uso del suolo e il consumo di acqua, la carne di pollame, risulta avere i valori più bassi anche se con una produzione maggiore rispetto agli altri due tipi di carne. Infine per il consumo di energia annuo la carne suina risulta essere la migliore con un valore di $3,42 \times 10^6$ TJ anche minore della carne di pollame, questo a causa della minor produttività mondiale della carne suina.

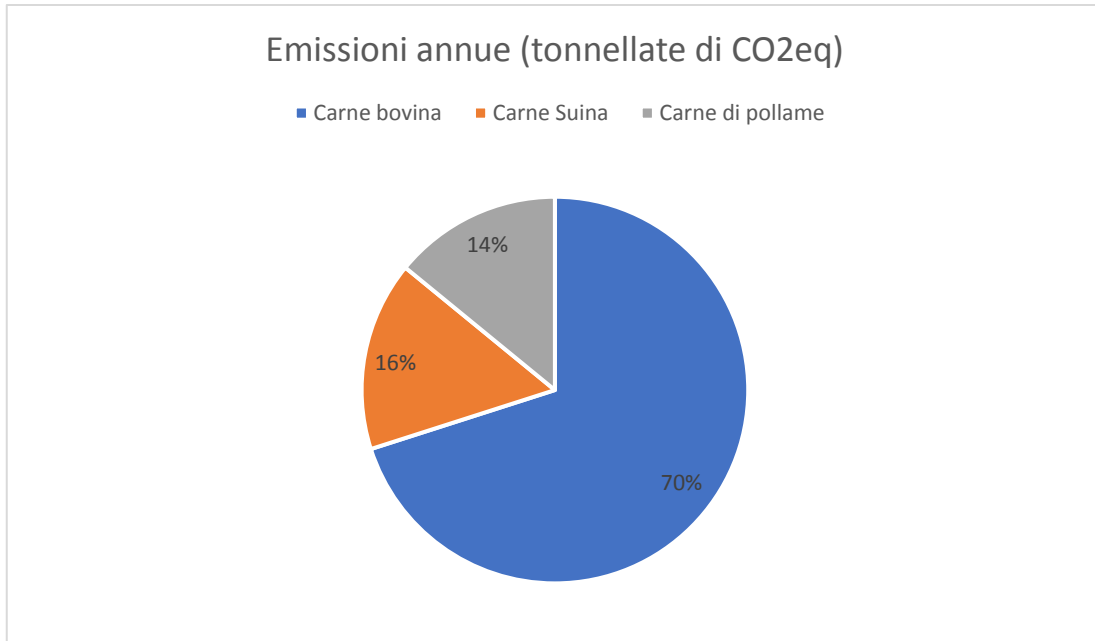


Figura 4-3: Percentuale delle emissioni annue dei 3 tipi di carne prese in considerazione.

4.3 Comparazione tra la carne convenzionale e quella coltivata

4.3.1 Comparazione per kg di prodotto

Al giorno d'oggi la carne coltivata in laboratorio, produce un valore di emissioni medio per kg di prodotto pari a 8,71 kg di CO₂eq, anche se però i singoli valori presi in esame sono molto differenti tra di loro (fig. 4-4), questo perché il settore si trova ancora agli albori e nei prossimi anni anche a causa dei sostanziosi investimenti, avverranno degli ulteriori sviluppi tecnologici, i quali potranno dare più certezze. Andando poi a comparare il precedente risultato con i valori medi di emissioni per kg di prodotto degli altri tre tipi di carne presi in considerazione, in questa tesi si può notare che soltanto la carne di bovino ha avuto un valore medio superiore, il quale è pari a 43,2 kg di CO₂eq/ kg di prodotto (fig. 4-4), mentre le carni di suino e di pollo hanno avuto dei valori medi di emissioni di gas serra inferiori, i quali sono rispettivamente 5,79 e 4,62 kg di CO₂/ kg (fig. 4-4). Come già indicato nel precedente paragrafo la causa delle elevate emissioni è in parte riconducibile alla fermentazione enterica.

Secondo i dati presi in considerazione nei vari articoli, la carne in vitro risulta avere una quantità di emissioni superiori a quelle dei suini e dei polli, a causa principalmente dell'utilizzo di energia per la crescita delle cellule, la quale ha contribuito a circa il 70% dell'impatto ambientale. Inoltre, come indicato dai quasi tutti gli studi, la causa principale di questo elevato valore è il mix energetico utilizzato nell'impianto per la coltivazione cellulare e per la produzione delle materie prime. Infatti come si può notare dai dati dello studio effettuato da Sinke, l'utilizzo del mix energetico medio globale attualmente in uso, il quale è composto da energia in parte rinnovabile e in parte da fonti non rinnovabili, causa un quantitativo di emissioni pari a 14,4 kg di CO₂eq/ kg, il quale è di molto superiore allo scenario dove si utilizzano interamente fonti rinnovabili che è pari a 2,9 kg di CO₂eq per kg. Quest'ultimo quantitativo risulta inferiore alle emissioni causate dalla produzione di 1 kg di carne di pollo. La seconda causa del valore dell'impronta di carbonio è la produzione di ingredienti necessari per la coltivazione della carne in vitro, in particolar modo gli amminoacidi e i fattori di crescita che vengono aggiunti al terreno.

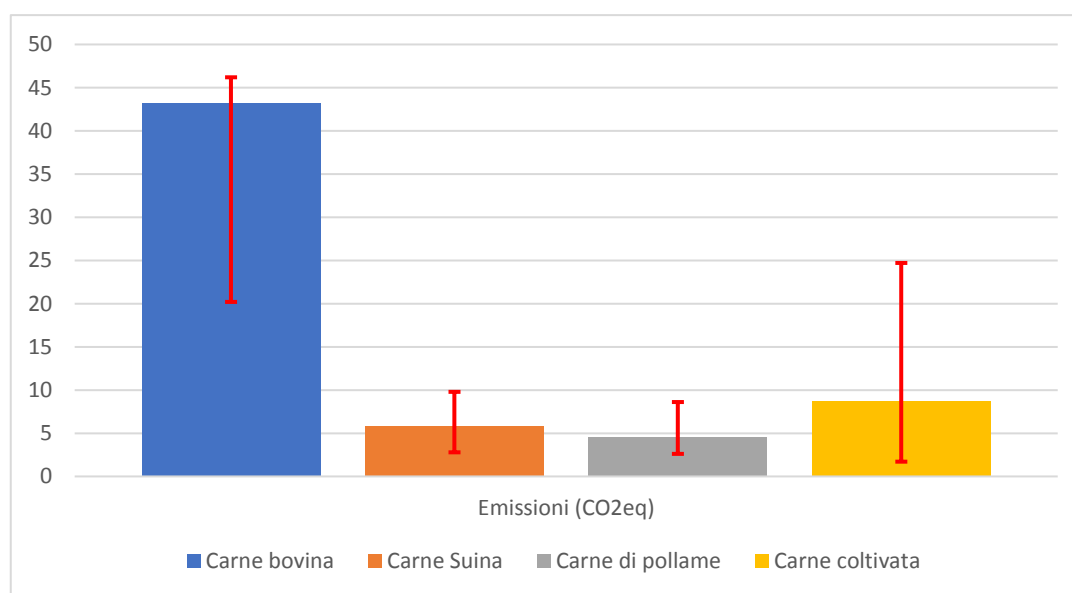


Figura 4-4: Comparazione delle emissioni per kg di prodotto.

La principale nota dolente della carne artificiale è la grande quantità di energia utilizzata per il processo produttivo e per la coltivazione degli ingredienti (anche se per questi ultimi l'energia utilizzata è molto minore).

La quantità media di energia utilizzata, secondo i dati presi in considerazione dai vari studi, per la carne coltivata risulta essere pari a 170,01 MJ/ kg, che risulta essere la più elevata (fig. 4-5) rispetto alle altre 3 fonti di carne prese in considerazione (i consumi della carne coltivata

risultano quasi il doppio dell'energia utilizzata per la produzione di 1 kg di carne bovina), anche se i vari studi esaminati indicano risultati molto diversi tra di loro a causa dei differenti impianti presi in esame. Questo avviene perché la carne sintetica, rispetto alla carne tradizionale necessita di elettricità o calore per i processi biochimici e per la crescita cellulare, mentre nel caso della carne tradizionale l'energia biochimica proviene dalla razione ingerita dall'animale. Nello studio di Tuomisto., viene descritto che il principale apporto energetico nella coltivazione della carne consiste nel raffreddamento necessario per mantenere la temperatura interna del bioreattore a 37°C e nel riscaldamento necessario per i mezzi nutritivi (Vural Gursel et al., 2022). Però il maggior utilizzo di energia nella carne coltivata si riflette in un minor uso del suolo, questo perché non vi è necessità di elevate materie prime per il mantenimento (Sinke, 2023).

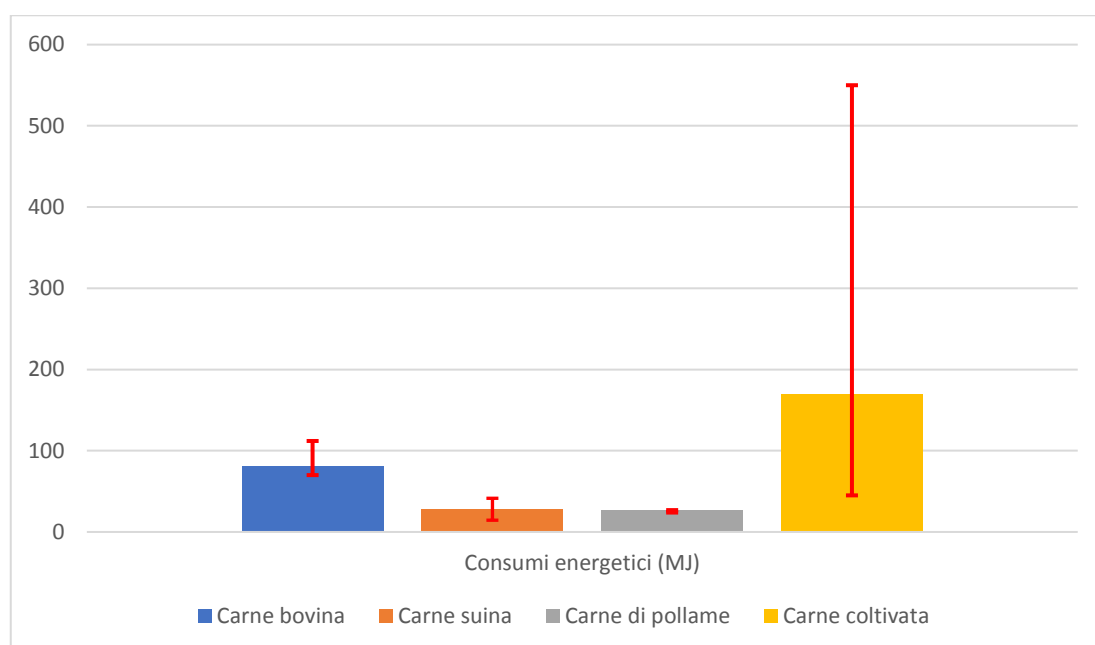


Figura 4-5: Comparazione dei consumi energetici per kg di prodotto.

Dal punto di vista dell'uso del suolo (fig. 4-6) e del consumo d'acqua (fig. 4-7), la carne coltivata risulta avere i valori più bassi tra le 4 categorie prese in esame. Nel caso dell'uso del suolo, la carne coltivata ha un valore pari a 2,19 m²/ kg (fig. 4-6) e un consumo di acqua pari a 0,27 m³/ kg di carne. Il minor uso del suolo porta ad avere una miglior conversione degli ingredienti in prodotti finali e un maggior spazio di terre libere (Sinke, 2023). Questo ultimo è un punto molto fondamentale, infatti la maggior disponibilità di terreni non destinati alla coltivazione di materie prime per l'alimentazione degli animali, potrebbe permettere sia di diminuire l'impatto dei cambiamenti climatici, sia di evitare ulteriori perdite di biodiversità

(Tuomisto & Teixeira De Mattos, 2011) a seguito della conversione di foreste e boschi in terreni, come sta accadendo da qualche anno a questa parte nella foresta Amazzonica.

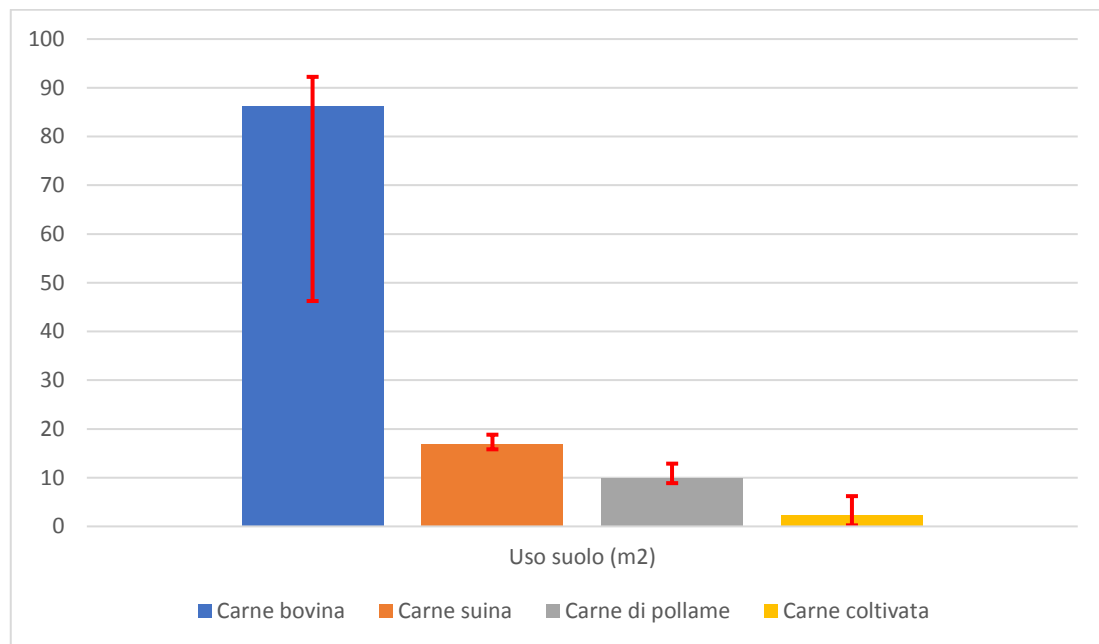


Figura 4-6: Comparazione dell'uso del suolo per kg di prodotto.

Il consumo di acqua è di molto inferiore rispetto alle carni tradizionali (fig. 4-7), infatti in questo caso l'acqua è utilizzata sia come consumo diretto per gli animali, ma anche per la produzione di mangimi e per l'irrigazione dei terreni utilizzati per la coltivazione di alcune materie prime usate per l'alimentazione come il mais. Mentre nel caso della carne coltivata i consumi idrici, secondo Tuomisto, sono riconducibili per l'80% alla sostituzione di acqua persa per evaporazione durante il processo di coltivazione dei *Cianobatteri*, mentre la restante parte è utilizzata per la coltivazione delle cellule all'interno del bioreattore. Secondo gli altri studi presi in esame l'uso di acqua è correlato al processo di coltivazione e pulizia del bioreattore.

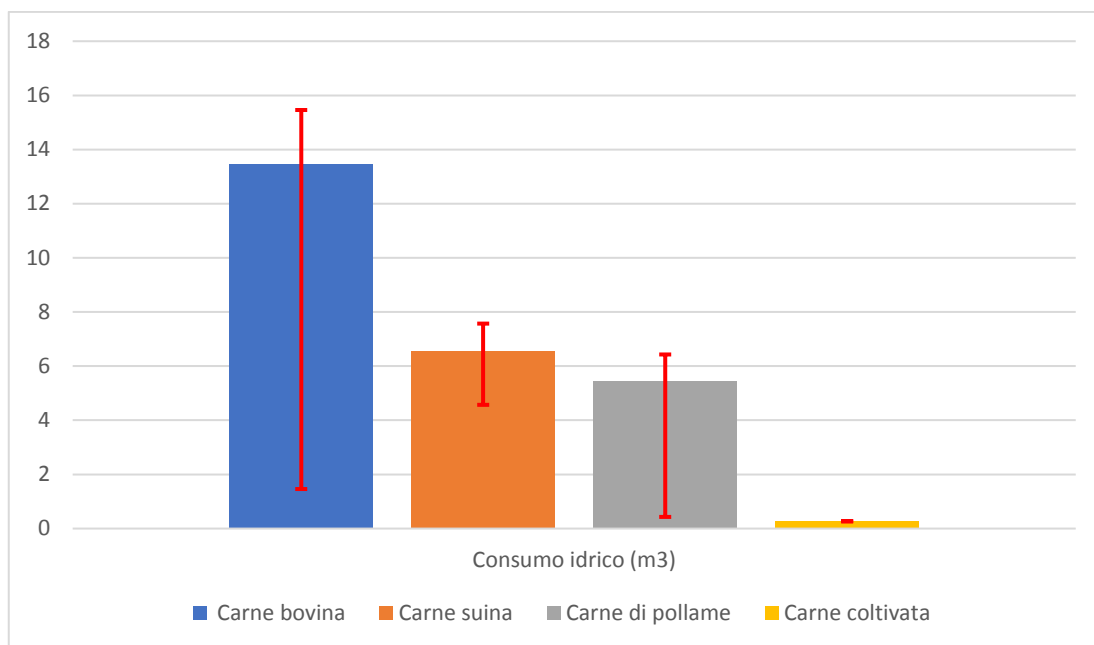


Figura 4-7: Comparazione dei consumi idrici per kg di prodotto.

4.3.2 Comparazione per gr di proteina prodotta

Nel caso del contenuto proteico la carne coltivata, negli studi presi in considerazione, risulta avere un contenuto proteico medio del 19,4%, anche se vi è uno studio che si discosta di molto dal valore medio, cioè quello di Mattick, che indica un contenuto proteico della carne presa in esame molto basso, pari al 7%. Nel caso non si vada a considerare questo studio, il contenuto proteico medio si alza a 20,5%. In entrambi in casi si può notare che il contenuto medio di proteine risulti simile agli altri tre tipi di carne presi in considerazione.

L'impronta di carbonio per produzione di 1 gr. di proteine (fig. 4-8) nel caso della carne coltivata risulta essere pari a 0,05 kg di CO₂eq/ gr di proteina e 0,04 kg di CO₂eq/ gr nel caso non venga preso in considerazione lo studio di Mattick (in entrambi i casi vi è una notevole distanza tra i valori presi in considerazione). In entrambi i casi le emissioni medie risultano essere di molto minori rispetto alla carne bovina, le quali sono pari a 0,2 kg di CO₂eq/ gr di proteina, inoltre come per il confronto per 1 kg di carne, le emissioni sono superiori rispetto a quelle del pollame, le quali hanno un valore pari a 0,03 kg di CO₂eq/ gr. Infine, come si può notare dal grafico 3-8, le emissioni della carne suina (pari a 0,045 kg di CO₂eq/ gr) risultano superiori all'emissione della carne coltivata solo nel caso in cui non si considera lo studio di Mattick.

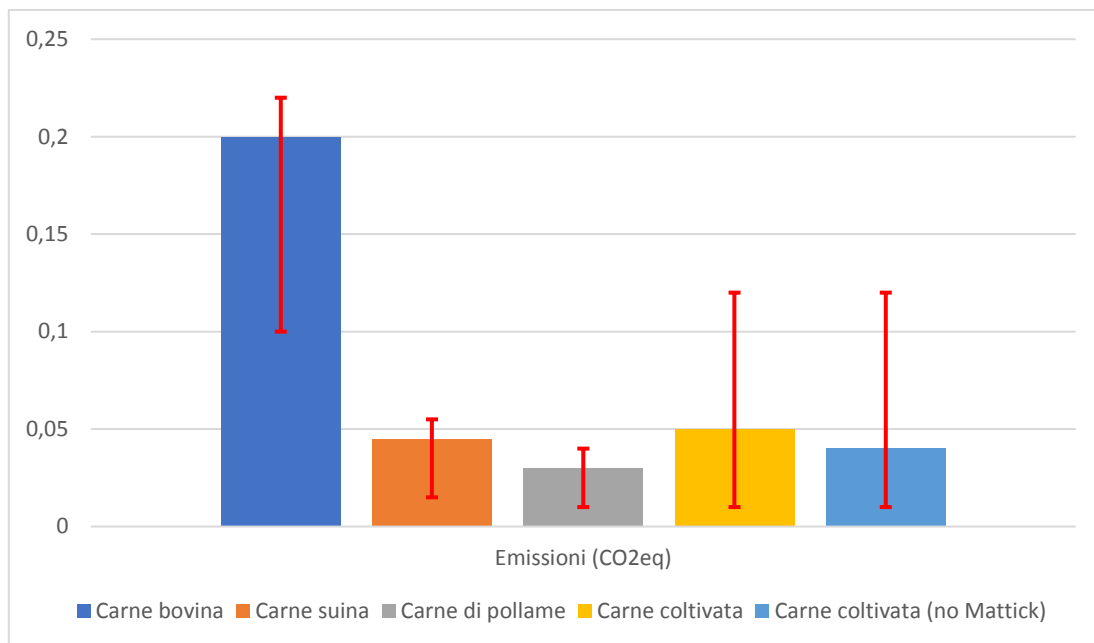


Figura 4-8: Comparazione delle emissioni per gr di proteina.

Per l'uso di energia per la produzione di 1 gr. di proteine (fig. 4-9), la carne in vitro risulta avere le emissioni medie pari a 0,89 MJ/ gr e 0,83 MJ/ gr senza considerare lo studio di Mattick, inoltre come si può notare dalla fig.4-9 i vari studi riguardanti la carne coltivata indicano risultati molto differenti tra di loro, questo perché sono presi in considerazione differenti impianti. In entrambi i casi sono notevolmente superiori agli altri tre tipi di carne che sono pari a: 0,37 MJ/ gr per i bovini, 0,13 MJ/ gr per i suini e 0,14 MJ/ gr per gli avicoli, questo a causa dell'energia necessaria per il processo di coltivazione cellulare.

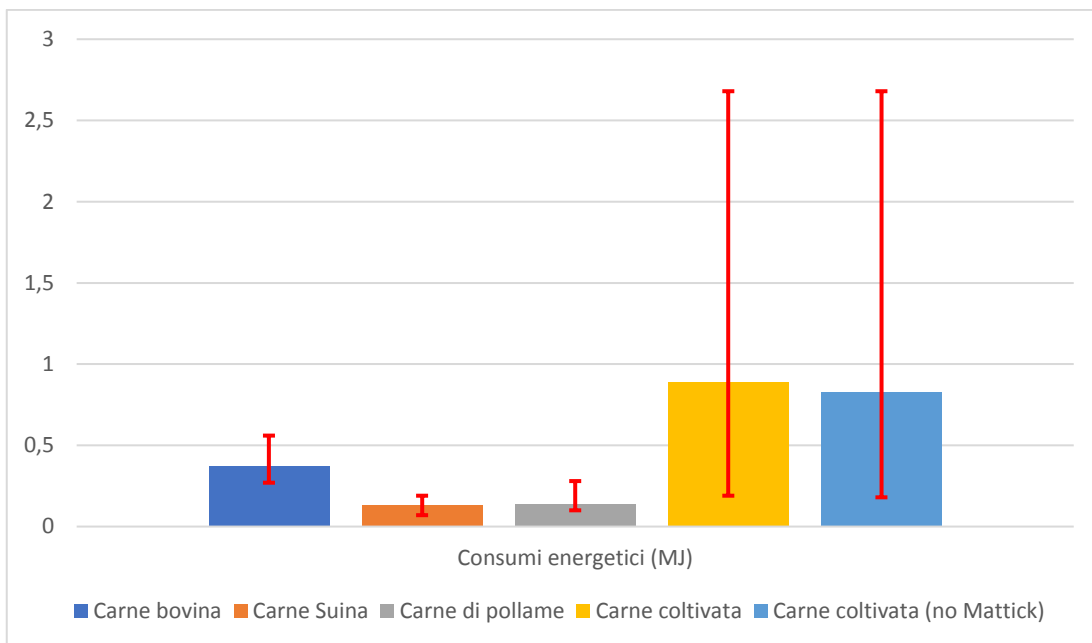


Figura 4-9: Comparazione dei consumi elettrici per gr di proteina.

Discorso inverso per l'uso del suolo (fig. 4-10) e il consumo d'acqua (fig. 4-10), dove la carne in vitro risulta avere i valori più bassi per gr di proteina prodotta, sia nel caso della presenza dello studio di Mattick, sia nel caso della sua non considerazione. I valori di uso del suolo è pari a 0,01 per entrambi gli scenari, mentre i consumi idrici hanno un valore di 0,001 per entrambi gli scenari.

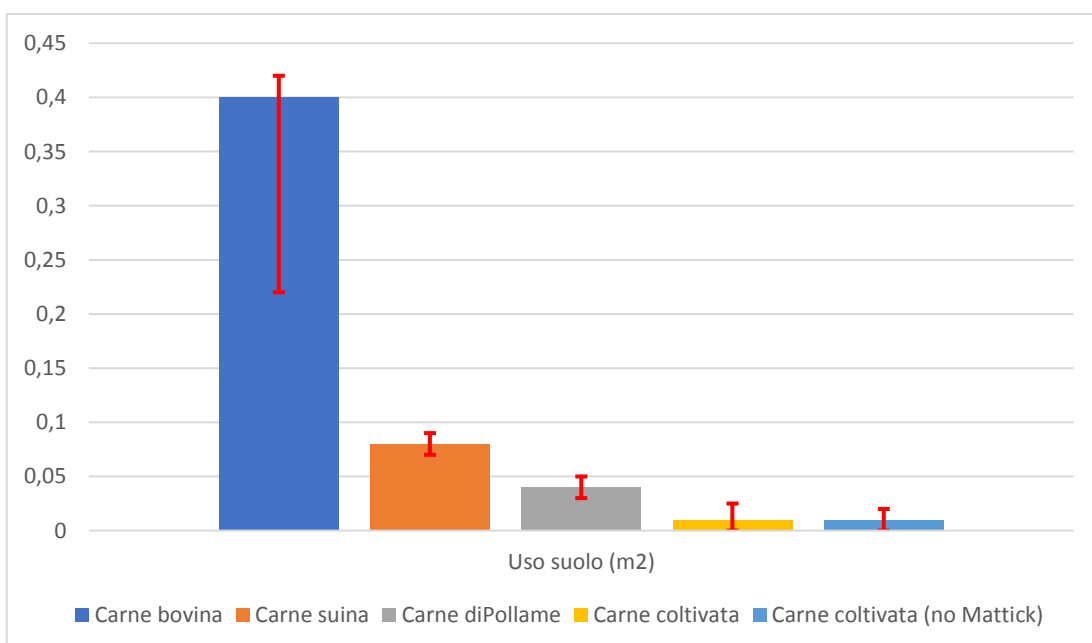


Figura 4-10: Comparazione uso del suolo per gr di proteina.

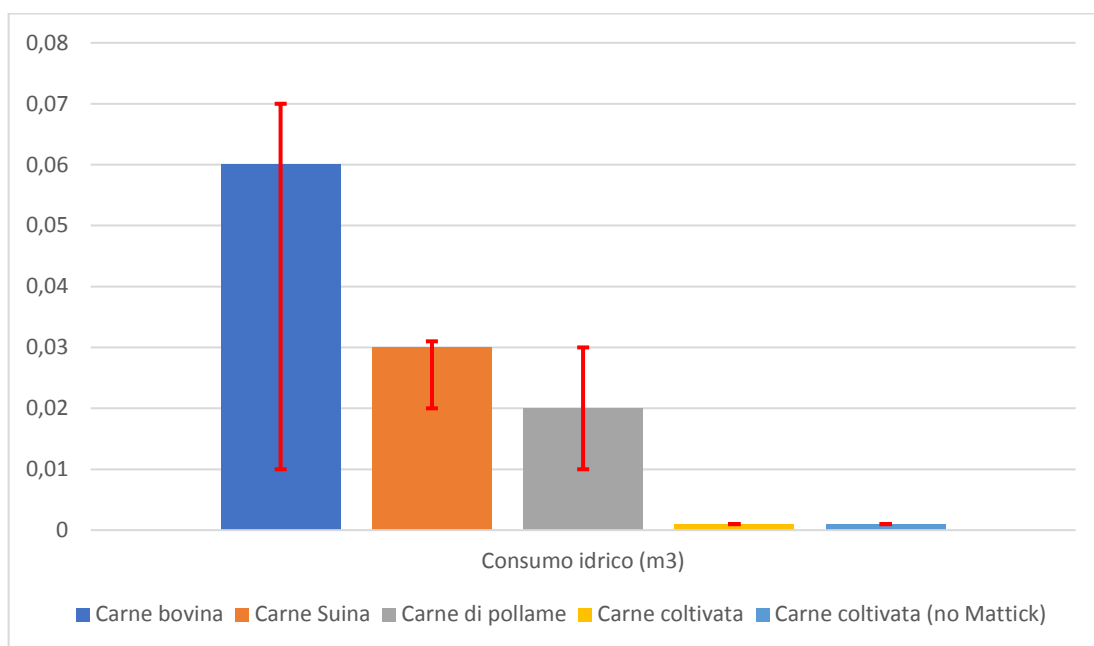


Figura 4-11: Comparazione dei consumi idrici per gr di proteina.

4.3.3 Comparazione della produzione annua

Per quanto riguarda la produzione annua delle carni convenzionali è stato preso come riferimento il report del 2022 (FAO, 2022), il quale riguarda i dati mondiali relativi alle specie di carne più consumate al mondo, i valori sono di:

- Carne bovina: 73,9 milioni di tonnellate annue prodotte,
- Carne suina: 124,6 milioni di tonnellate annue prodotte,
- Carne avicola: 138,8 milioni di tonnellate annue prodotte.

Mentre per quanto riguarda la carne coltivata, essendo la quantità prodotta annua non indicata nei vari articoli presi in considerazione in questa tesi, al fine di effettuare un confronto viene presa in esame la produttività dei vari impianti indicati negli articoli. Questi ultimi sono stati classificati in questa tesi, al fine di avere una visione più chiara, in:

- Impianti di larga scala: qui possiamo indicare gli impianti con una produzione superiore alle 100 tonnellate annue; quindi, gli impianti dell'azienda SCiFi Food e l'impianto proposto da Sinke e la produzione annua totale di questo tipo d'impianti è pari a 23000 tonnellate.
- Impianti di laboratorio: qui vi si possono classificare gli impianti con produzione inferiori alle 100 tonnellate, qui si prendono in considerazione tutti gli impianti ad eccezione dei due sopramenzionati che hanno una produzione totale di 116 tonnellate.

Per effettuare il conteggio degli impianti di larga scala, nel caso dello studio di Sinke viene preso in considerazione lo scenario medio globale, questo perché nell'articolo sono presi in esame tre scenari energetici per un solo impianto di produzione.

Da come si può notare dalla tabella 11 dell'appendice, la produzione totale dei vari impianti di carne in vitro è ancora lontanissima dalla produzione totale dei tre tipi di carne. Questo si traduce in una quantità di emissioni annue, consumo di energia, uso di acqua e uso del suolo di gran lunga minore rispetto agli altri tre tipi di carne. La causa di questa bassa produttività è da attribuirsi alla fase embrionale in cui il settore si trova al giorno d'oggi.

Per il motivo indicato, al fine di avere una visione sulle produzioni annue, si può fare una comparazione prendendo come riferimento un ipotetico scenario futuro per l'anno 2030, utilizzando come riferimento i livelli medi d'emissione e di consumi per 1 kg di prodotto degli studi presi in considerazione. Al fine di avere un prospetto per la produzione annua totale viene preso come riferimento il report della società Kearney, un'azienda di consulenza specializzata in scenari globali, la quale prospetta che entro l'anno 2030 avverrà una significativa diminuzione dei costi di produzione della carne coltivata e questo la porterà ad avere il 10% della produzione globale di carne. Mentre avverrà un calo dei prodotti convenzionali, i quali si attesteranno ad un 72% e la restante fetta del mercato sarà occupata dai prodotti con proteine di origine vegetale (Kearney, 2019). Secondo il prospetto della FAO (OECD-FAO, 2021), nel 2030 la produzione di carne convenzionale si attesterà sulle 373 milioni di tonnellate, di queste:

- La carne bovina ne produrrà 75 milioni,
- La carne suina ne produrrà 127 milioni,
- La carne di pollame ne produrrà a 152 milioni.

Prendendo come riferimento che il 72% delle carni prodotte possano essere i 373 milioni di tonnellate indicate dalla FAO, effettuando un rapido calcolo, si può indicare che la produzione di carne coltivata sia pari a 51,8 milioni di tonnellate per l'anno 2030.

In questo ipotetico scenario, la carne in vitro risulta avere, anche se con produzioni relativamente più basse rispetto alla carne convenzionale, il maggior consumo di energia (grafico 4-11) per i processi di produzione, mentre le emissioni di gas serra (grafico 4-12), l'uso del suolo e i consumi d'acqua saranno molto più bassi rispetto agli altri tre tipi di carne data la più bassa produttività. Questi valori, come già indicato precedentemente, sono da prendere con le pinze data l'incertezza delle stime e l'utilizzo dei valori medi per 1 kg di prodotto attuali; infatti, soprattutto nel caso della carne coltivata, con il progredire del settore, questi valori saranno sicuramente abbassati, soprattutto il livello di emissioni prodotte.

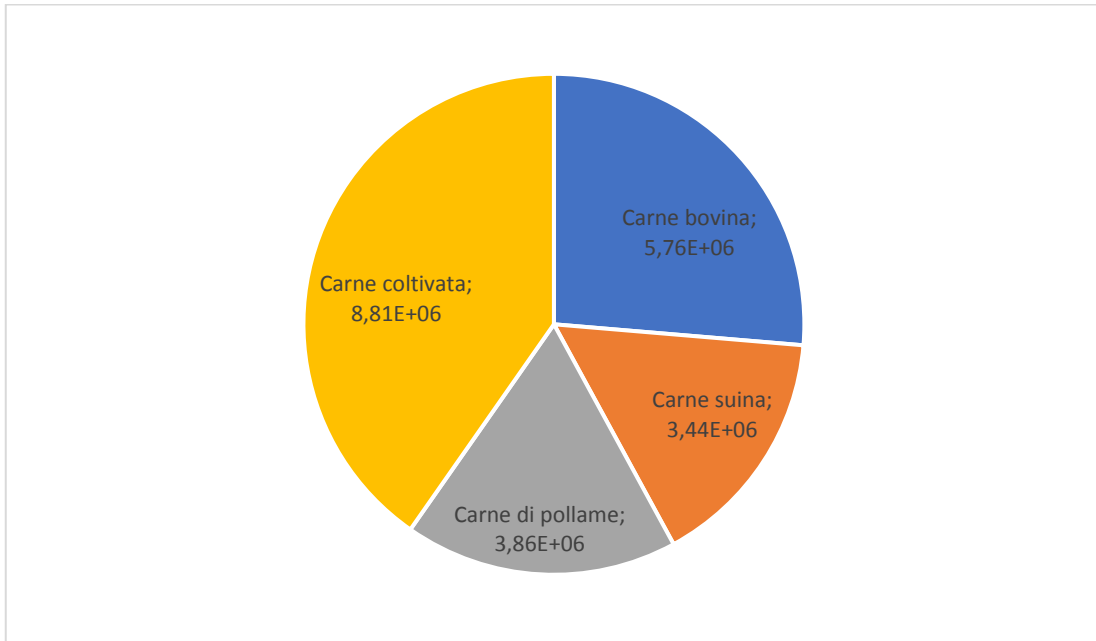


Figura 4-12: Consumi elettrici (TJ) nello scenario ipotetico del 2030.

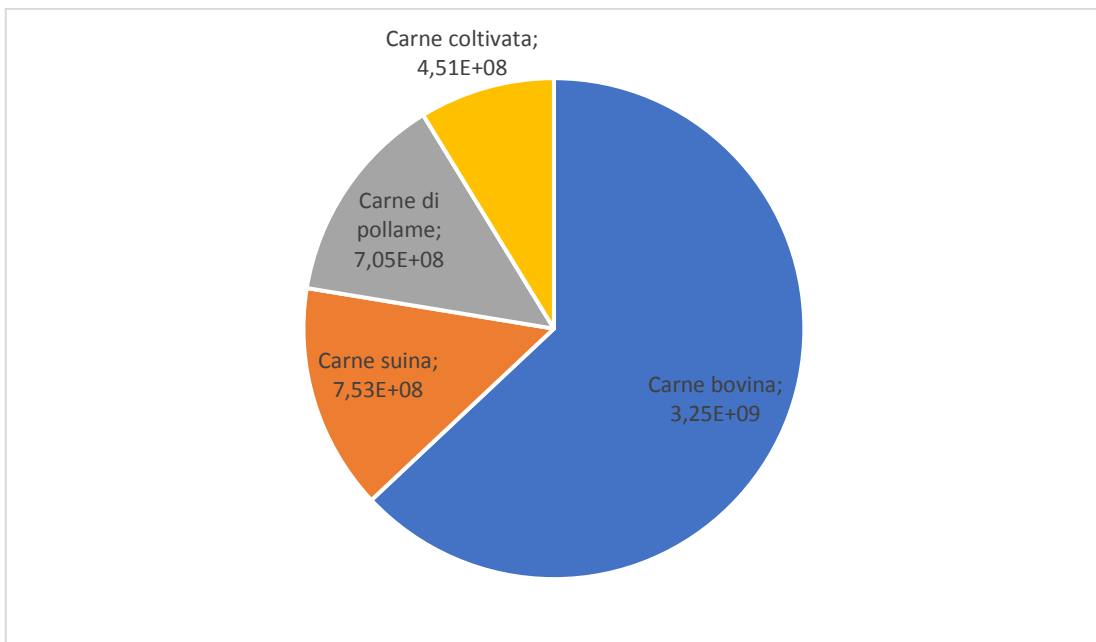


Figura 4-13: Emissioni prodotte (tonn. CO₂eq) nello scenario ipotetico del 2030.

CONCLUSIONI

Al giorno d'oggi, anche se il settore della carne coltivata si trova ancora agli albori, questa può essere definita una valida alternativa alla carne convenzionale a causa del minor consumo di acqua e uso di terreni, anche se esistono ancora delle incertezze. Una nota dolente della carne coltivata è però il consumo di energia, che risulta essere al giorno d'oggi notevolmente più elevato rispetto agli altri tre tipi di carne presi in considerazione e tutto questo si riflette chiaramente sull'elevato costo che ha oggi la carne coltivata.

Per quanto riguarda le emissioni di gas serra, considerando il mix energetico globale utilizzato al giorno d'oggi, dove vi è ancora una notevole presenza di fonti di origine fossile, la carne coltivata risulta avere valori superiori a quelli prodotti dalla carne suina e avicola, anche se già notevolmente inferiori rispetto a quella bovina. Però l'utilizzo per il processo di produzione degli ingredienti e il processo di coltivazione di energia prodotta da fonti rinnovabili, come l'eolico o il fotovoltaico, potranno far diminuire il valore di emissioni di gas serra, rendendola così competitiva con la carne di origine suina e avicola. L'utilizzo di energie rinnovabili non potrebbe avere un analogo effetto sul miglioramento della sostenibilità della carne convenzionale in quanto molto meno dipendente dall'energia elettrica.

I cospicui investimenti che ci sono oggi in questo settore potranno portare al miglioramento degli impianti e dei processi di produzione. Tutto questo, abbinato all'utilizzo di fonti di energia rinnovabili, probabilmente porteranno di conseguenza ad una riduzione dell'impronta di carbonio e dei consumi di energia, nonché al contenimento dei costi di produzione.

Infine, ai futuri studi LCA riguardanti la carne coltivata si consiglia, oltre a ridurre le incertezze, a implementare la valutazione LCA a parametri quali il potenziale di eutrofizzazione dell'acqua, l'acidificazione terrestre, formazione del particolato e la formazione di ossidanti fotochimici al fine di avere una visione più completa sull'argomento.

BIBLIOGRAFIA

- Bushnell, C., Specht, L., & Almy, J. (2022). 2022 Cultivated Meat State of the Industry Report.
- Coop A, The International EPD® System. (2020). Dichiarazione ambientale di prodotto della carne di vitello a carne bianca a marchio Coop. (www.environdec.com).
- Coop B, The International EPD® System. (2020). Dichiarazione ambientale di prodotto della carne di bovino adulto a marchio Coop. (www.environdec.com).
- EPD International (2017) General Programme Instructions for the International EPD® System. (www.environdec.com).
- European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010.
- FAO. (2022). Meat Market Review: Emerging trends and outlook. 2022. Rome.
- FAO. (2019). Water use in livestock production systems and supply chains– Guidelines for assessment (Version 1). Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership. Rome.
- FAOSTAT database. (<https://www.fao.org/faostat/en/>)
- Fileni A, The International EPD® System. (2021). Environmental Product Declaration PETTO DI POLLO BIOLOGICO. (www.environdec.com).
- Fileni B, The International EPD® System. (2021). Environmental Product Declaration PETTO DI POLLO CONVENZIONALE OGM FREE. (www.environdec.com).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (<https://www.fao.org>).
- Gerber, P., Opio, C., Mottet, A., Falcucci, A., Tempio, G., MacLeod, Vellinga, T., Henderson, B., & Steinfeld, H., Animal Production and Health Division. (2013). Greenhouse gas emission from ruminant supply chains - a global life cycle assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

- Godfray, H. C. J., Aveyard, P., Garnett, T., Hall, J. W., Key, T. J., Lorimer, J., Pierrehumbert, R. T., Scarborough, P., Springmann, M., & Jebb, S. A. (2018). Meat consumption, health, and the environment. In *Science* (New York, N.Y.) (Vol. 361, Issue 6399).
- ISO 14040/14044:2021. ISO series on Life Cycle Assessment (Valutazione del ciclo di vita), UNI EN ISO 14040:2021 e 14044:2021. www.iso.org.
- Jeffrey D. Wood, Chapter 20 - Meat Composition and Nutritional Value, Editor(s): Fidel Toldra', In *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, Lawrie's Meat Science (Eighth Edition)*, Woodhead Publishing, 2017, Pages 635-659.
- Kearneley. When consumers go vegan, how much meat will be left on the table for agribusiness. (2019). (<https://www. Kearney.com>).
- Kim, S., Beier, A., Schreyer, H. B., & Bakshi, B. R. (2022). Environmental Life Cycle Assessment of a Novel Cultivated Meat Burger Patty in the United States. *Sustainability* (Switzerland), 14(23).
- Lamnatou, X. Ezcurra-Ciaurriz, D. Chemisana, L.M. Plà-Aragónés, Environmental assessment of a pork-production system in North-East of Spain focusing on life-cycle swine nutrition, *Journal of Cleaner Production*, Volume 137, 2016, Pages 105-115, ISSN 0959-6526.
- MacLeod, M., Gerber, P., Mottet, A., Tempio, G., Falcucci, A., Opio, C., Vellinga, T., Henderson, B., & Steinfeld, H., Animal Production and Health Division. (2013). Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains: a global life cycle assessment. Food and Agriculture Organization of the United (FAO). Rome.
- 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.
- Mattick, C. S., Landis, A. E., Allenby, B. R., & Genovese, N. J. (2015). Anticipatory Life Cycle Analysis of In Vitro Biomass Cultivation for Cultured Meat Production in the United States. *Environmental Science and Technology*, 49(19), 11941–11949.

MEAT OF MAMMALS (FRESH, CHILLED OR FROZEN) PRODUCT CATEGORY
CLASSIFICATION: UN CPC 2111, 2113. (2022). (www.environdec.com)

MEAT OF POULTRY (FRESH, FROZEN OR CHILLED) PRODUCT CATEGORY
CLASSIFICATION: UN CPC 2112, 2114, 2117. (2022). (www.environdec.com)

Michael A. Clark, Nina G. G. Domingo, Kimberly Colgan, Sumil K. Thakrar, David Tilman, John Lynch, Inês L. Azevedo and Jason D. Hill (2020). Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets. In *Science* (New York, N.Y) (Vol.370, Issue 6517).

OECD-FAO AGRICULTURAL OUTLOOK 2021-2030 © OECD/FAO (2021). Pag. 163-177.

Ruckli, A.K.; Dippel, S.; Durec, N.; Gebaska, M.; Guy, J.; Helmerichs, J.; Leeb, C.; Vermeer, H.; Hörtenhuber, S. Environmental Sustainability Assessment of Pig Farms in Selected European Countries: Combining LCA and Key Performance Indicators for Biodiversity Assessment. *Sustainability* 2021, 13, 1123.

SCiFi Foods official site. (<https://scififood.com>)

Sinke, P., Swartz, E., Sanctorum, H. et al. Ex-ante life cycle assessment of commercial-scale cultivated meat production in 2030. *Int J Life Cycle Assess* 28, 234–254 (2023).

Sinke, P. (2021). LCA of cultivated meat Future projections for different scenarios *ecoinvbron*. www.cedelft.eu.

Tuomisto, H. L., Allan, S. J., & Ellis, M. J. (2022). Prospective life cycle assessment of a bioprocess design for cultured meat production in hollow fiber bioreactors. *Science of the Total Environment*, 851.

Tuomisto, H. L., & Teixeira De Mattos, M. J. (2011). Environmental impacts of cultured meat production. *Environmental Science and Technology*, 45(14), 6117–6123.

Vural Gursel, I., Sturme, M., Hugenholtz, J., & Bruins, M. (2022). Review and analysis of studies on sustainability of cultured meat. (Report / Wageningen Food & Biobased Research; No. 2248). Wageningen Food & Biobased Research.

Warner, R. D. (2019). Review: Analysis of the process and drivers for cellular meat production. *Animal*, 13(12), 3041–3058.

RINGRAZIAMENTI

Al termine del mio lavoro di tesi desidero ringraziare, primo fra tutti, il mio relatore, il Prof. Duca Daniele e per la sua professionalità, i suoi consigli e la sua disponibilità con cui mi ha accompagnato a questo traguardo.

In seguito, vorrei ringraziare i miei genitori, per avermi aiutato a superare i momenti più difficili.

Infine, vorrei ringraziare mia sorella e i miei amici e tutti coloro che mi sono stati vicini in questo lungo percorso e mi hanno spronato a dare sempre di più.

APPENDICE

Tabella 1: Risultati valutazioni per kg di carne nei bovini.

	Emissioni gas serra (kg CO₂eq/ kg)	Uso del suolo (m²/ kg)	Consumi idrici (m³/ kg)	Consumi energetici (MJ/ kg)
Studio FAO	46	/	15,9	/
EPD vitello	20,4	/	1,25	84
EPD manzo	21,03	/	0,97	115
Studio Toumisto	48	49,4	14,78	72
Studio Mattick	30,5	92	/	78,6
Valore medio	43,2	86,25	13,46	79,98
Range	20,04 - 46	49,4 - 92	0,97 – 15,9	72 - 115

Tabella 2: Risultato valutazioni per gr di proteina nei bovini.

	Contenuto proteico	Emissioni gas serra (kg CO₂eq/ gr)	Uso suolo (m²/ gr)	Consumi idrici (m³/ gr)	Consumi energetici (MJ/ gr)
Studio FAO	21,5%	0,21	/	0,07	/
EPD vitello	20,7%	0,10	/	0,01	0,40
EPD manzo	20 %	0,11	/	0,01	0,58
Studio Toumisto	21,5 %	0,22	0,23	0,07	0,33
Studio Mattick	21,5 %	0,14	0,43	/	0,37
Valore medio	21,5 %	0,20	0,40	0,06	0,37
Range	20 – 21,5 %	0,10 – 0,22	0,23 – 0,43	0,01- 0,07	0,33 – 0,58

Tabella 3: Risultati valutazioni per kg di carne nei suini.

	Emissioni gas serra (kg CO₂eq/ kg)	Uso suolo (m²/ kg)	Consumi idrici (m³/ kg)	Consumi energetici (MJ/ kg)
Studio FAO	5,75	/	6,7	/
Studio paesi Ue	2,67	/	/	14,5
Allevamento spagnolo	5,5	/	/	35,6
Studio Toumisto	9,86	18,28	4,51	42,54
Studio Mattick	4,1	15,8	/	16
Valore medio	5,79	16,81	6,57	27,43
Range	2,67 – 9,86	15,8 – 18,28	4,51 – 6,7	14,5 – 42,54

Tabella 4: Risultato valutazioni per gr di proteina nei suini.

	Contenuto proteico	Emissioni gas serra (kg CO₂eq/ gr)	Uso suolo (m³/ gr)	Consumi idrici (m³/ gr)	Consumi energetici (MJ/ gr)
Studio FAO	21,8 %	0,05	/	0,03	/
Studio paesi UE	21,8 %	0,01	/	/	0,07
Allevamento spagnolo	21,8 %	0,03	/	/	0,16
Studio Toumisto	21,8 %	0,05	0,08	0,02	0,19
Studio Mattick	21,8 %	0,02	0,07	/	0,07
Valore medio	21,8 %	0,045	0,08	0,03	0,13
Range	/	0,01 – 0,05	0,07 – 0,08	0,02 – 0,03	0,07 – 0,19

Tabella 5: Risultati valutazioni per kg di carne nei polli.

	Emissioni gas serra (kg CO₂eq/ kg)	Uso suolo (m³/ kg)	Consumi idrici (m³/ kg)	Consumi energetici (MJ/ kg)
Studio FAO	5,03	/	5,7	/
EPD pollo bio	3,73	/	0,22	23,46
EPD pollo convenzionale	2,61	/	0,24	23,9
Studio Toumisto	8,9	13,5	1,9	23,3
Studio Mattick	2,3	9,5	/	26,6
Valore medio	4,62	9,94	5,43	25,88
Range	2,3 – 8,9	9,5 – 13,5	0,22 – 5,7	23,3 – 26,6

Tabella 4: Risultato valutazioni per gr di proteina nei polli.

	Contenuto proteico	Emissioni gas serra (kg CO₂eq/ gr)	Uso suolo (m³/ gr)	Consumi idrici (m³/ gr)	Consumi energetici (MJ/ gr)
Studio FAO	22,3 %	0,04	/	0,03	/
EPD pollo bio	8,5 %	0,04	/	0,003	0,28
EPD pollo conenzionale	8,5 %	0,03	/	0,003	0,28
Studio Toumisto	22,3 %	0,04	0,06	0,01	0,10
Studio Mattick	22,3 %	0,01	0,04	/	0,12
Valore medio	21,9 %	0,03	0,05	0,02	0,14
Range	8,5 – 22,3 %	0,01 – 0,04	0,04 – 0,06	0,003 – 0,03	0,10 – 0,28

Tabella 5: Risultati valutazioni per kg di carne coltivata prodotta.

	Emissioni (kg CO₂eq/ kg)	Uso suolo (m²/ kg)	Consumi idrici (m³/ kg)	Consumi energetici (MJ/ kg)
Toumisto California	2,24	0,2	0,37	31,8
Toumisto Spagna	1,87	0,2	0,52	31,7
Toumisto Thailandia	1,89	0,2	0,38	25,5
Studio Smetana	24,25	0,6	0,42	331,8
Studio Mattick	7,5	5,5	/	106
Bioreattore a fibra cava CMB	25,19	6,89	0,54	532,78
Bioreattore a fibra cava CMB 128%	12,64	3,36	0,32	231,43
Bioreattore a fibra cava CMC	4,98	1,84	0,12	94,09
Sinke media globale	14,4	2,41	0,07	278
Sinke energia in parte rinnovabile.	4,1	2,47	0,08	176
Sinke energia totalmente rinnovabile.	2,9	2,48	0,08	164
Studio SCiFi Food	2,6	0,08	0,02	37
Valore medio	8,71	2,19	0,27	170,01
Range	1,87 – 25,19	0,08 – 6,89	0,02 – 0,54	25,5 – 532,78

Tabella 8: Risultato valutazioni per gr di proteina nella carne coltivata.

	Contenuto proteico	Emissioni (kg CO₂eq/ gr)	Uso suolo (m²/ gr)	Consumi idrici (m³/ gr)	Consumi energetici (MJ/ gr)
Toumisto California	19 %	0,01	0,001	0,002	0,17
Toumisto Spagna	19 %	0,01	0,001	0,003	0,17
Toumisto Thailandia	19 %	0,01	0,001	0,002	0,13
Studio Smetana	26 %	0,09	0,002	0,002	1,28
Studio Mattick	7 %	0,11	0,08	/	1,51
Bioreattore a fibra cava CMB	20 %	0,13	0,03	0,003	2,66
Bioreattore a fibra cava CMB 128%	20 %	0,06	0,02	0,002	1,16
Bioreattore a fibra cava CMC	20 %	0,02	0,01	0,001	0,47
Sinke media globale	21 %	0,07	0,01	0,0003	1,32
Sinke energia in parte rinnov.	21 %	0,02	0,01	0,0004	0,84
Sinke energia totalmente rinnov.	21 %	0,01	0,01	0,0004	0,78

Studio SCiFi Food	20 %	0,01	0,001	0,0001	0,19
Valore medio	19,4 %	0,05	0,01	0,001	0,89
Range	7 – 26 %	0,01 – 0,13	0,001 – 0,08	0,0001 - 0,003	0,13 – 2,66
Valore medio no Mattick	20,5 %	0,04	0,01	0,001	0,83
Range no Mattick	19 – 26 %	0,01 – 0,13	0,001 – 0,03	0,0001 - 0,003	0,13 – 2,66

Tabella 9: Comparazione dei valori medi per kg di carne.

	Emissioni (kg CO₂eq/ kg)	Uso suolo (m²/ kg)	Consumi idrici (m³/ kg)	Consumi energetici (MJ/ kg)
Carne bovina	43,2	86,26	13,46	79,98
Carne suina	5,79	16,82	6,57	27,43
Carne di pollame	4,62	9,94	5,43	25,88
Carne coltivata	8,71	2,19	0,27	170,01

Tabella 10: Comparazione dei valori medi per gr di proteina.

	Contenuto proteico	Emissioni (kg CO₂eq/ gr)	Uso suolo (m³/ gr)	Consumi idrici (m³/ gr)	Consumi energetici (MJ/ gr)
Carne bovina	21,5 %	0,20	0,40	0,06	0,37
Carne suina	21,8 %	0,045	0,08	0,03	0,13
Carne di pollame	21,9 %	0,03	0,05	0,02	0,14
Carne coltivata	19,4 %	0,05	0,01	0,001	0,89

Carne coltivata, no Mattick	20,5 %	0,04	0,01	0,001	0,83
------------------------------------	--------	------	------	-------	------

Tabella 11: Comparazione delle emissioni e dei consumi annui.

	Produzione annua (tonnellate)	Emissioni (tonnellate CO₂eq/ kg)	Uso suolo (m² / kg)	Consumi idrici (m³/ kg)	Consumi energetici (TJ/ kg)
Carne bovina	7,39 x 10 ⁷	3,19 x 10 ⁹	6,37 x 10 ¹²	9,94 x 10 ¹¹	5,91 x 10 ⁶
Carne suina	12,46 x 10 ⁷	7,22 x 10 ⁸	2,10 x 10 ¹²	8,18 x 10 ¹¹	3,42 x 10 ⁶
Carne di pollame	13,88 x 10 ⁷	6,41 x 10 ⁸	1,38 x 10 ¹²	7,53 x 10 ¹¹	3,59 x 10 ⁶
Carne coltivata impianti laboratorio	116	10 x 10 ²	4,98 x 10 ⁵	1,83 x 10 ⁴	16,9
Carne coltivata grandi impianti	23000	1,78 x 10 ⁵	2,51 x 10 ⁷	9,60 x 10 ⁵	3,26 x 10 ³

Tabella 12: Comparazione delle emissioni e dei consumi per l'anno 2030.

	Produzione 2030 (tonnellate)	Emissioni (tonnellate CO₂eq/ kg)	Uso suolo (m² / kg)	Consumi idrici (m³/ kg)	Consumi energetici (MJ/ kg)
Carne bovina	75 x 10 ⁶	3,24 x 10 ⁹	6,47 x 10 ¹²	1,01 x 10 ¹²	6,00 x 10 ⁶
Carne suina	127 x 10 ⁶	7,35 x 10 ⁸	2,14 x 10 ¹²	8,34 x 10 ¹¹	3,48 x 10 ⁶
Carne di pollame	152 x 10 ⁶	7,02 x 10 ⁸	1,51 x 10 ¹²	8,25 x 10 ¹¹	3,93 x 10 ⁶
Carne coltivata	51,8 x 10 ⁶	4,51 x 10 ⁸	1,13 x 10 ⁹	1,38 x 10 ¹⁰	8,81 x 10 ⁶

